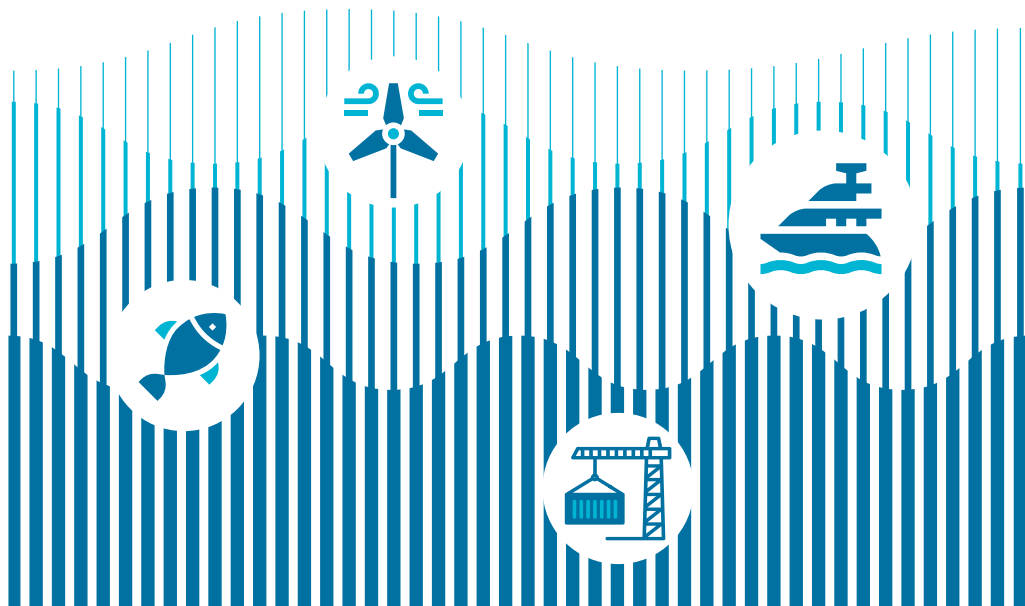


글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구

A Study on the Development of an Analysis Model
for the Effectiveness of Global Supply Chain Risk Hedge Policies

강무홍 · 이주호 · 김병주 · 원승환 · 조성우



글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구

A Study on the Development of an Analysis Model
for the Effectiveness of Global Supply Chain Risk Hedge Policies

강무홍 · 이주호 · 김병주 · 원승환 · 조성우



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	강무홍, 이주호, 김병주, 원승환, 조성우
내부연구진	연구책임자 강무홍 한국해양수산개발원 물류·해사산업연구본부 부연구위원 공동연구원 이주호 한국해양수산개발원 물류·해사산업연구본부 연구위원 공동연구원 김병주 한국해양수산개발원 해운연구본부 전문연구원
외부연구진	공동연구원 원승환 국립군산대학교 교수 공동연구원 조성우 국립군산대학교 교수

연구기간	2024. 1. 1. ~ 2024. 10. 31.
------	-----------------------------

보고서 집필내역

연구책임자	강무홍 연구총괄, 제1장 제1절, 제2절 일부, 제2장 제2절 일부, 제3장 제1절, 제2절 일부, 제3절 일부, 제4절 일부, 제4장 제1절, 제5장 제1절, 제2절 일부, 제3절
내부연구진	이주호 제5장 제2절 일부 김병주 제1장 제2절 일부, 제2장 제1절, 제2절 일부, 제3장 제2절 일부, 제5장 제2절 일부
외부연구진	원승환 제3장 제2절 일부, 제3절 일부, 제4절 일부, 제4장 제2절 일부 조성우 제3장 제2절 일부, 제3절 일부, 제4절 일부, 제4장 제2절 일부

산·학·연·정 연구자문위원	박두진 동명대학교 교수 서수완 동서대학교 교수 이철웅 고려대학교 교수 최용석 순천대학교 교수 진승준 해양수산부 사무관
-------------------	---

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

세계 경제는 그 어느 때보다도 복잡하고 불확실한 환경에 직면해 있다. 코로나19 팬데믹, 미·중 무역 분쟁, 러시아·우크라이나 전쟁, 기후 변화로 인한 자연 재해 등 다양한 요인이 글로벌 공급망을 위협하고 있으며, 이러한 위기 상황에서 공급망 안전성과 회복력은 국가 경제의 생존과 직결되는 문제로 떠올랐다.

우리나라는 공급망의 중요성을 깊이 체감하고 있는 국가 중 하나다. 글로벌 시장에서 반도체, 이차전지 등 주요 산업이 차지하는 비중이 큰 만큼, 해당 산업의 공급망이 위기에 처할 경우 국가 경제 전반에 미치는 파급력은 매우 크다. 따라서 글로벌 공급망의 리스크를 정확히 분석하고 정책적 대응 방안을 마련하는 일이 시급한 과제가 되었다.

이번 연구는 한국해양수산개발원이 국가적 차원에서 글로벌 공급망 리스크에 대응하기 위해 추진한 중요한 연구이다. 본 연구는 글로벌 공급망에서 발생할 수 있는 다양한 리스크를 시뮬레이션하고, 이를 통해 정책 효과를 분석하는 모형을 개발하였다. 이 모형은 정책 입안자들이 보다 신속하고 효과적인 대응 방안을 마련하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 것이다.

특히, 여러 가지 학술적 접근법을 결합하여 현실적인 분석을 시도했다. 메타휴리스틱과 시뮬레이션 방법론을 통해 복잡한 공급망 내의 다양한 변수들을 체계적으로 분석하였고, 이를 기반으로 정책 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 이 과정에서 국내외 전문가들과의 긴밀한 협력을 통해 현장감 있는 데이터를 수집·분석하여 보다 현실적인 정책 대안을 제시할 수 있었다.

본 연구는 단순히 학술적 성과에 그치지 않고, 정책 입안 과정에서 실질적인 지침으로 활용될 수 있을 것이다. 반도체 및 이차전지 산업과 같이 국가 경제의 핵심 산업에 대한 리스크 관리 방안을 마련함으로써, 우리나라가 직면할 수 있는 공급망 리스크에 대한 사전 대응 능력을 강화하고 장기적으로 국가 경쟁력을 더욱 높이는 데 기여할 것이다.

마지막으로, 본 연구가 성공적으로 완성될 수 있도록 아낌없는 지원을 해주신 모든

관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다. 먼저 연구 책임을 성실하게 수행한 강무홍 부연구위원을 비롯한 이주호 연구위원, 김병주 전문연구원, 국립군산대학교 원승환 교수, 조성우 교수 등 연구진의 노고에 깊은 감사를 표한다. 아울러 자문 및 외부평가위원으로 참여해 주신 동명대학교 박두진 교수님과 동서대학교 서수완 교수님, 고려대학교 이철웅 교수님, 순천대학교 최용석 교수님, 그리고 해양수산부 진승준 사무관님께도 깊은 감사를 드린다. 또한, 본 보고서의 심사와 감리를 맡아 적절한 조언으로 완성도를 높여 주신 최상희 연구부원장, 박광서 기획조정본부장, 이연경 물류·해사산업연구본부장, 길광수 명예연구위원을 비롯하여 발간되기까지 도움 주신 모든 분께 깊은 감사를 표하고 싶다.

이 보고서는 그간 노력의 결실로, 앞으로도 한국해양수산개발원은 국가 경제와 해양수산업의 지속 가능한 발전을 위해 끊임없이 노력할 것이다. 우리가 함께 노력하여, 글로벌 공급망 리스크에 더욱 강력히 대응할 수 있는 기반을 마련하는 데 힘을 모아갈 것이다.

2024년 12월
한국해양수산개발원
원장 김 종 덕

목차

정책제안 _ i

요약 _ iii

Executive Summary _ ix

01	서론 _1	
	제1절 연구 배경 및 목적	1
	1. 연구 배경	1
	2. 연구 목적	6
	제2절 연구 내용과 방법	7
	1. 연구 내용	7
	2. 선행연구와 본 연구의 차별성	8
	3. 연구 방법	10
02	관련 연구 분석 및 모형 선정 _15	
	제1절 기존 연구와의 차별성 분석	15
	1. 대상 및 범위 측면	15
	2. 방법론 측면	18
	제2절 분석 모형 선정	22
	1. 기존 문헌조사 결과	22
	2. 인터뷰 조사 결과	24
	3. SWOT 분석을 통한 모형 개발 방향 설정	26
	4. 모형 기반 정책효과 분석 개념	28

03

공급망 리스크 대응 효과 분석 모형 개발_33

제1절 공급망 리스크 정의 및 주요 정책	33
1. 주요 산업별 교역국 및 공급망 리스크 영향 전망	33
2. 공급망 리스크 정의 및 영향	39
3. 공급망 리스크 대응 주요 정책	47
제2절 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발	52
1. 개요	52
2. 휴리스틱 모형 설계 및 개발	53
3. 시뮬레이션 모형 설계 및 개발	60
제3절 공급망 리스크 시나리오 설정 및 실험	72
1. 휴리스틱 모형 검증을 위한 시나리오 설정 및 실험	72
2. 시뮬레이션 모형 검증을 위한 시나리오 설정 및 실험	83
제4절 시사점	102

04

공급망 리스크 대응 정책 효과_103

제1절 국가 정책별 효과 분석	104
1. 해외 거점 항만 개발 정책	104
2. 해상 무역로 다양화 정책	109
3. 대형 터미널 운영 및 대체 부두 구축 정책	118
4. 소결	121
제2절 기업 정책별 효과 분석	124
1. 멀티 소싱	124
2. 리스크 완화 재고	128
3. 소결	134

05 연구결과와 정책제언_137

제1절 연구 요약 및 결과	137
제2절 기여점 및 활용방안	140
1. 글로벌 공급망 지원 물류전략 수립	140
2. 해외 주요 거점 항만 확보	141
3. 해상 운송 다각화 검토	144
4. 공급망 리스크 대응 협의체 및 시스템 구축	146
제3절 연구의 한계점 및 향후 과제	148

참고문헌_151

부록_163

표 목차

〈표 2-1〉 수요조사 대상 및 내용	26
〈표 2-2〉 모형 개발 SWOT 분석	28
〈표 3-1〉 주요 품목별 생산, 수출 및 소재·부품·제조장비 수입 규모(2022년 기준) 34	
〈표 3-2〉 해양수산분야 극단적 위험 도출 과정	41
〈표 3-3〉 글로벌 기업들의 글로벌 공급망 재편 현황	45
〈표 3-4〉 기존 연구에서의 공급망 리스크 및 대응 방안/효과 종합	46
〈표 3-5〉 공급망 리스크 및 대응 정책	47
〈표 3-6〉 수에즈 운하 통항 및 희망봉 우회 시 비교	50
〈표 3-7〉 본 연구의 염색체(chromosome) 표현	57
〈표 3-8〉 MIP 최적해 및 휴리스틱 최적해 최적성 비교	59
〈표 3-9〉 시뮬레이션의 과정	61
〈표 3-10〉 공급망의 회복력 강화에 필요한 요인	63
〈표 3-11〉 시뮬레이션 모형의 입력 항목	65
〈표 3-12〉 시뮬레이션 모형의 개체 속성 항목	66
〈표 3-13〉 시뮬레이션 모형의 상태 변수 항목	67
〈표 3-14〉 시뮬레이션 모형의 출력 항목	68
〈표 3-15〉 팔레트 기준 화물 무게 및 개수 가정	74
〈표 3-16〉 판매처별/기간별 부품 주문량(PD_{pqt}) 및 납품기한(TW_{pqt})	74
〈표 3-17〉 판매처별 부품 발주비용(OR_{pq}) 및 보관비용(PIC_{pq})	75
〈표 3-18〉 부품 생산자 보관비용(MIC_{jq})	75
〈표 3-19〉 부품별/원료공급자별 가능여부(SC_{qj})	76
〈표 3-20〉 판매처와 부품 생산자 간 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp}) 76	
〈표 3-21〉 주요 경유항별 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}) 세부 사항(40피트 컨테이너 기준) 77	
〈표 3-22〉 생산자와 원료공급자 간 운송비(MT_{ij}) 및 운송기간(MTL_{ij}), 운송가용량(MTL_{ij}) 77	
〈표 3-23〉 주요 경유항별 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}) 세부 사항(40피트 컨테이너 기준) 78	
〈표 3-24〉 실험 결과 I(일반적인 상황 - 부품 발주량 및 생산자)	80
〈표 3-25〉 실험 결과 I(일반적인 상황 - 원료공급자 및 부품별 생산량)	80
〈표 3-26〉 민감도 분석 결과	81
〈표 3-27〉 변경된 운송비(MT_{ij}) 및 운송기간(MTL_{ij}), 운송가용량(MTL_{ij})	82
〈표 3-28〉 실험 결과 II(미국 IRA 발효 - 원료공급자 및 부품별 생산량)	83

〈표 3-29〉 기준 시나리오 내용	83
〈표 3-30〉 일차 공급망 리스크 요인 및 개념	87
〈표 3-31〉 공급망에서 리스크 요인 (교란 및 중단 사례)	88
〈표 3-32〉 공급망 리스크 요인 및 개념	89
〈표 3-33〉 태풍의 연평균 빈도 및 평균 발생 간격	91
〈표 3-34〉 태풍의 평균 지속 기간 및 가용도	92
〈표 3-35〉 가뭄의 평균 발생 간격, 평균 지속 기간, 가용도	96
〈표 3-36〉 전쟁의 지정학적 위험 지수, 평균 발생 간격, 평균 지속 기간, 가용도	97
〈표 3-37〉 지진의 연평균 빈도	98
〈표 3-38〉 지진의 평균 발생 간격, 평균 지속 기간, 가용도	98
〈표 3-39〉 시나리오 실험 결과 - 부품 공급량과 공급 성능 영향도	100
〈표 3-40〉 시나리오 실험 결과 - 납기 준수율	101
〈표 3-41〉 시나리오 실험 결과 - 조달기간	101
〈표 3-42〉 시나리오 실험 결과 - 재고유지비	101
〈표 4-1〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})(미 동부 파업 I)	106
〈표 4-2〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 I - 부품 발주량 및 생산자)	107
〈표 4-3〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})(미 동부 파업 II)	107
〈표 4-4〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 II - 부품 발주량 및 생산자)	108
〈표 4-5〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(미국 동부 항만 파업)	109
〈표 4-6〉 변경된 운송비(MT_{ij}) 및 운송기간(MTL_{ij}), 운송가용량(MTL_{ij})(수에즈 마비)	110
〈표 4-7〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 확보) - 원료공급자 및 부품별 생산량)	111
〈표 4-8〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 미확보) - 원료공급자 및 부품별 생산량)	112
〈표 4-9〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(수에즈 마비)	113
〈표 4-10〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})(파나마 가뭄)	114
〈표 4-11〉 실험 결과(파나마 가뭄 - 원료공급자 및 부품별 생산량)	115
〈표 4-12〉 실험 결과(파나마 가뭄 - 부품 발주량 및 생산자)	115
〈표 4-13〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp}) (파나마 붕괴 및 희망봉 우회 추가)	116
〈표 4-14〉 실험 결과(파나마 붕괴 및 희망봉 경로 경유 - 원료공급자 및 부품별 생산량)	117
〈표 4-15〉 실험 결과(파나마 붕괴 및 희망봉 경로 경유 - 부품 발주량 및 생산자)	117

〈표 4-16〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(파나마 가뭄 및 붕괴)	118
〈표 4-17〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(자연재해 발생)	120
〈표 4-18〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(노동자 파업)	121
〈표 4-19〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(미국 동부 항만 파업)	121
〈표 4-20〉 싱글 소싱의 장단점	126
〈표 4-21〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 부품 공급량과 공급 성능 영향도	127
〈표 4-22〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 납기 준수율	127
〈표 4-23〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 조달기간	128
〈표 4-24〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 재고유지비	128
〈표 4-25〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 부품 공급량과 공급 성능 영향도	133
〈표 4-26〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 납기 준수율	134
〈표 4-27〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 조달기간	134
〈표 4-28〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 재고유지비	134
〈표 4-29〉 전체 시나리오의 부품 공급량 평균과 공급 성능 영향도	135

그림 목차

〈그림 1-1〉 국내 택배시장 매출액 추이(단위: 억 원, %)	2
〈그림 1-2〉 LA/LB항 코로나19 팬데믹전후 연료소모량 추정 비교 (좌: 2019년, 우: 2020년)	3
〈그림 1-3〉 파나마 운하 인근 항만 방문 선박수 변화	4
〈그림 1-4〉 본 연구의 흐름도	8
〈그림 1-5〉 전문가 인터뷰 및 설문(좌: CJ대한통운, 우: HMM, 하: FNS USA)	11
〈그림 2-1〉 모형 기반 정책효과 분석 개념도	30
〈그림 2-2〉 Popper(2008)의 미래예측방법 다이아몬드 중 본 연구의 모형별 위치 ·	31
〈그림 3-1〉 반도체 수출국 비중	35
〈그림 3-2〉 반도체 소재·부품 수입국 비중	36
〈그림 3-3〉 반도체 제조장비 수입국 비중	36
〈그림 3-4〉 반도체 수입 및 제품 수출 흐름도(단위: %)	36
〈그림 3-5〉 이차전지 수출국 비중	38
〈그림 3-6〉 이차전지 소재 수입국 비중	38
〈그림 3-7〉 이차전지 장비 수입국 비중	38
〈그림 3-8〉 리튬이온전지 소재 수입 및 제품 수출 흐름도(단위: %)	38
〈그림 3-9〉 항만 재난 시 대체부두 개념도(물량이전)	42
〈그림 3-10〉 항만의 공급망 리스크	43
〈그림 3-11〉 측정지표와 판단지표간 영향 관계도	44
〈그림 3-12〉 현실과 시뮬레이션 모델의 세계	60
〈그림 3-13〉 시뮬레이션 모델링 방법 비교	62
〈그림 3-14〉 공급망 운영 모듈 I	69
〈그림 3-15〉 공급망 운영 모듈 II	70
〈그림 3-16〉 리스크 모듈 (호찌민 원료공급자에 대한 태풍 리스크)	71
〈그림 3-17〉 시각화 모듈	71
〈그림 3-18〉 문제 정의	73
〈그림 3-19〉 실험 결과 I(일반적인 상황)	79
〈그림 3-20〉 실험 결과 II(미국 IRA 발효)	82
〈그림 4-1〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 I)	106
〈그림 4-2〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 II)	108

〈그림 4-3〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 확보))	111
〈그림 4-4〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 미확보))	112
〈그림 4-5〉 실험 결과(파나마 가뭄)	114
〈그림 4-6〉 실험 결과(파나마 붕괴 및 희망봉 경로 경유)	117
〈그림 4-7〉 탄력성 통제 요소	129
〈그림 4-8〉 사전 대응 정책(리스크 완화 재고)을 갖춘 공급망	131
〈그림 4-9〉 사전 대응 정책(백업 공장)을 갖춘 공급망	132
〈그림 5-1〉 관세청 무역 마이데이터 C-EWS 소개	148

약어 목록

- ADS(자동종속감시): Automatic Dependent Surveillance
- AIS(자동식별시스템): Automated Identification System
- CHIPS(반도체 산업 육성법): Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors and Science Act
- CUT: California United Terminals
- DEA(자료포락분석): Data Envelopment Analysis
- ETS: Emission Trading System
- EU: European Union
- EWS(조기경보시스템): Emergency Warning System
- FTZ(자유무역지대): Free Trade Zone
- GA(유전 알고리즘): Genetic Algorithm
- GPR(지정학적 위험 지수): Geopolitical Risk Index
- HPH: Hutchison Port Holdings
- ILA(국제항만노동자협회): International Longshoremen's Association
- IRA(인플레이션 감축법): Inflation Reduction Act
- ITT(터미널 간 환적): Inter-Terminal Transport
- JIT: Just In Time
- LA: Los Angeles
- LB: Long Beach
- MIP(혼합정수계획법): Mixed Integer Programming
- NJ: New Jersey
- NP-Hard: Non-deterministic Polynomial-time hard
- NY: New York
- PBCM(즈니스 연속성 관리): Port Business Continuity Management
- PCA(주성분 분석): Principal Component Analysis

-
- PSA: Port of Singapore Authority
 - SAA: Sample Average Approximation method
 - SIPG: Shanghai International Port Group
 - USMX(미국해양협회): United States Maritime Alliance
 - VAR(벡터자기회귀모형): Vector Autoregression

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. (문헌 조사 및 전문가 인터뷰, 세미나 개최) 국내외 기존 연구와 전문가 의견을 종합하여 모형의 기초를 확립
2. (SWOT 분석) 연구의 강점과 약점, 기회와 위협 요소를 종합적으로 분석하여 최적의 모형 및 개발 방안 도출
3. (메타휴리스틱과 시뮬레이션 모형 개발) 두 가지 모형을 개발하여 복잡한 공급망 내 변수들을 효과적으로 분석

■ 정책제안

1. 우리나라 공급망 안정화 기반 마련을 위한 **글로벌 공급망 지원 물류전략 수립**
2. 한국형 글로벌 터미널 운영사 육성을 통한 **해외 주요 거점 항만 확보**
3. 글로벌 리스크 분산을 위한 **해상 운송 다각화 검토**
4. 공급망 리스크에 선제적으로 대응할 수 있는 **협업체 및 시스템 구축**

요 약

글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구

강무홍 · 이주호 · 김병주 · 원승환 · 조성우

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

- (글로벌 경제 환경의 변화) 코로나19 팬데믹, 미·중 무역 분쟁, 러시아·우크라이나 전쟁 등으로 인해 글로벌 공급망의 안정성이 크게 위협받고 있음
- (우리나라 경제의 특수성) 우리나라는 반도체, 이차전지 등 특정 산업에 대한 의존도(비중)가 높아, 글로벌 공급망 리스크 발생 시 경제 전반에 미치는 영향이 큼
- (공급망 리스크 관리의 필요성) 공급망 리스크에 대한 사전 대응이 필요하며, 이를 위한 정책적 대안 마련이 필수적임

2) 국정과제 연계성

- 본 연구는 글로벌 공급망 리스크 대응 방안을 제시하고 이를 안정화하는 연구로 '19. 거시경제 안정과 대내외 리스크 관리 강화'와 '20. 산업경쟁력과 공급망 강화하는 신산업통상전략'과 연계성이 있음
- 항만을 중심으로 해운·물류 안정화, 해상교통물류를 선도하고 물류 주권 확보를 위한 과제이므로, '40. 세계를 선도하는 해상교통물류 구축', '41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리' 국정과제와 관련 있음

3) 연구의 목적

- 글로벌 공급망 리스크에 대응하기 위한 정책 효과를 정량적으로 분석할 수 있는 혼합정수계획법(MIP, Mixed Integer Programming), 메타휴리스틱(Meta-Heuristics), 시뮬레이션 모형 개발
- 공급망 리스크 대응을 위한 정부와 기업들의 5가지 정책 효과를 실험으로 분석

2. 연구의 방법과 특징

1) 학술적 방법

- (기존 연구와의 차별성) 기존 연구들은 대부분 정성적 분석에 의존, 명확한 정책 효과 도출에 한계가 있으나 본 연구에서는 정량적 데이터를 바탕으로 정책 효과를 분석하여 보다 구체적이고 실질적인 대안을

제시

- (문헌 조사 및 전문가 인터뷰) 국내외 기존 연구와 전문가 의견을 종합하여 모형의 기초를 확립
- (SWOT 분석) 연구의 강점과 약점, 기회와 위협 요소를 종합적으로 분석하여 최적의 모형 및 개발 방안 도출
- (메타휴리스틱과 시뮬레이션 모형 개발) 두 가지 모형을 개발하여 복잡한 공급망 내 변수들을 효과적으로 분석

2) 정책화 방법

- 데이터 수집, 방법론 선정 및 검토 등을 위해 산업계 및 학계 전문가 대상 업무협의 개최
- 정부 부처 담당자 면담 및 세미나 발표 등을 통해 정책화 추진

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- 공급망 리스크를 정의하고 이에 대응하기 위한 혼합정수계획법, 메타휴리스틱 모형, 시뮬레이션 모형 등의 정책효과 분석 모형 개발
 - 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형은 글로벌 공급망 리스크 발생 시 즉각적인 대안을 도출할 수 있도록 개발되었으며, 실험을 통해 일반적인 상황과 공급망 리스크 발생 시 어떤 대안이 선택되는지를 분석
 - 시뮬레이션 모형은 앞의 두 모형과 달리, 리스크 발생 시에도 안정적인

대안을 제시할 수 있도록 개발

- 개발된 세 가지 모형을 활용하여 정부 및 기업에서 추진 가능한 다섯 가지 공급망 리스크 대응 정책 효과 분석
 - 먼저 정부 차원의 세 가지 대응 정책이 어떤 효과를 가져올 수 있는지를 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형을 통해 실험
 - 이를 위해 공급망 리스크 발생 전후의 결과를 비교·분석하였고, 리스크 발생 후에는 정책 시행·미시행된 경우를 비교하여 그 효과를 평가
 - 안정적인 물류 공급망 설계를 위한 시뮬레이션 모형을 실험하였으며, 멀티 소싱, 리스크 완화 재고 등 기업 차원에서 추진 가능한 두 가지 정책 시나리오를 설정하여 실험

2) 정책화 방안

- 글로벌 공급망 지원 물류전략 수립
 - 국가의 전략적 방향에 따라 물류의 역할과 비중을 명확히 파악하고, 이를 기반으로 국가 차원의 국제 물류 전략을 수립
 - 물류 수요가 필요한 기업들의 요구를 파악하여 필요한 국제 물류 서비스의 분류를 도출해야 하며, 이를 통해 실질적으로 필요한 해외 물류 인프라와 지원 정책 마련
 - 국내외 여건 변화를 조사하여 국내 실정에 맞는 전략을 수립하여 이러한 전략을 추진함으로써 우리나라 공급망 안정화를 위한 기반 마련
- 해외 주요 거점 항만 확보
 - 우선적으로 물동량을 창출할 수 있는 선사와 글로벌 물류기업, 자금력을 갖춘 해양진흥공사 및 항만공사 등이 참여하는 컨소시엄 구성
 - 한국형 글로벌 터미널 운영사를 육성하여 해외 항만 확보 추진

▪ 해상 운송 다각화 검토

- 해상 운송 경로의 다각화는 글로벌 리스크를 분산시키는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대
- 현재 특정 국가와 경로에 집중된 구조는 해당 경로에서 문제가 발생할 경우 전체 공급망에 치명적인 타격이 있을 수 있음
- 정부와 민간이 협력하여 현재 우리나라 해운 서비스가 상대적으로 열악한 중동, 아프리카, 남미 등 신규 경로를 개척하거나 서비스를 확대함으로써 기존 경로에 대한 의존도를 낮추고, 글로벌 공급망의 안정성을 확보할 필요가 있음

▪ 공급망 리스크 대응 협의체 및 시스템 구축

- 산업통상자원부, 해양수산부, 국토교통부 등 무역 및 물류 분야 주무 부처 중심으로, 물류 관련 연구기관, 기업이 참여하는 ‘공급망 리스크 대응 협의체’ 구성 필요
- 협의체 운영을 통해 1) 사전에 공급망 리스크 조사 및 대응 방안 모색, 2) 리스크 발생 가능성이 있는 분야 모니터링 추진 3) 리스크 발생 시, 준비된 매뉴얼에 따라 신속 대응함으로써 효과적인 대처 가능
- 선제적으로 대응할 수 있는 조기 경보 및 대응 시스템 구축 필요, 관세청 ‘무역 마이데이터 서비스’ 연계를 통해 신속한 의사결정 지원

4. 기대효과

1) 학술적 기대효과

- 본 연구는 기존의 정성적 접근에서 벗어나 정량적 분석을 통해 글로벌 공급망 리스크를 체계적으로 평가하였으며, 이를 통해 글로벌 공급망

연구에 새로운 분석 모형과 방법론을 제시

- 본 연구는 경제학, 경영학, 물류학 등 다양한 학문 분야의 이론과 방법론을 통합적으로 적용하여, 다학제적 연구 활성화에 기여

2) 사회·경제적 기대효과

- 본 연구는 다양한 시나리오를 통해 공급망 리스크에 대한 사전적 대응 방안을 제시하였으며, 이를 바탕으로 정부와 기업이 보다 신속하고 효과적인 대응 정책을 수립할 수 있도록 지원
- 개발된 분석 모형을 활용해 다양한 정책 효과를 사전에 평가하고, 최적의 정책 대안을 도출할 수 있는 도구를 제공하여 정책 입안자의 의사결정을 지원
- 글로벌 공급망의 불확실성이 커지고 있는 상황에서 국가 경쟁력을 강화할 수 있는 정책적 대응 방안을 마련하는 데 기여
- 특히, 핵심 산업의 공급망 리스크를 체계적으로 관리함으로써 국가 경제의 지속가능성을 높일 수 있는 기반 마련

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on the Development of an Analysis Model for the Effectiveness of Global Supply Chain Risk Hedge Policies

Moo-Hong Kang · Joo-Ho Lee · Byung-Joo Kim · Seung-Hwan Won · Sung-Woo Cho

1. Background and Objectives of the Study

1) Background of the Study

- (Changes in the Global Economic Environment) The stability of global supply chains is being severely threatened due to factors such as the COVID-19 pandemic, U.S.-China trade disputes, and the Russia-Ukraine war
- (Peculiarity of South Korea's Economy) South Korea heavily relies on specific industries like semiconductors and secondary batteries, making the entire economy highly susceptible to global supply chain risks
- (Need for Supply Chain Risk Management) There is a critical need for proactive measures to manage supply chain risks,

and developing policy alternatives to address these risks is essential

2) Relevance to National Policy

- This study provides strategies for responding to global supply chain risks and stabilizing them, which aligns with national tasks such as ‘19. Strengthening Macroeconomic Stability and Internal and External Risk Management’ and ‘20. New Industrial Trade Strategy to Enhance Industrial Competitiveness and Supply Chain’
- The study is also related to the national tasks ‘40. Establishing World-Leading Maritime Traffic Logistics’ and ‘41. Protecting Maritime Territories and Sustainable Ocean Management’ by focusing on the stabilization of maritime and logistics through ports, thus ensuring logistics sovereignty

3) Objectives of the Study

- To develop methodologies such as Mixed Integer Programming (MIP), metaheuristics, and simulation models that can quantitatively analyze the effectiveness of policies aimed at responding to global supply chain risks
- To experimentally analyze the effects of five different policies that governments and businesses can adopt to address supply chain risks

2. Research Methods and Characteristics

1) Academic Methods

- (Distinction from Existing Research) While existing studies often rely on qualitative analysis, which limits the ability to draw clear policy effects, this study employs quantitative data to analyze policy effects and proposes more concrete and practical solutions
- (Literature Review and Expert Interviews) The foundation of the models was established by synthesizing existing research and expert opinions from both domestic and international sources
- (SWOT Analysis) A comprehensive analysis of the strengths, weaknesses, opportunities, and threats (SWOT) of the study was conducted to derive the optimal model and development plan
- (Development of Metaheuristic and Simulation Models) Two models were developed to effectively analyze the complex variables within supply chains

2) Policy Implementation Methods

- Held consultations with industry and academic experts to collect data, select, and review methodologies

-
- Push for policy implementation through interviews with government officials and presentations at seminars

3. Research Findings

1) Summary of Findings

- Developed policy effect analysis models such as Mixed Integer Programming, metaheuristics, and simulation models to define supply chain risks and provide countermeasures
 - Mixed Integer Programming and metaheuristic models were designed to immediately propose alternatives when global supply chain risks occur. These models were tested to analyze which alternatives were chosen in both general and risk scenarios
 - Unlike the other two models, the simulation model was developed to suggest stable alternatives even in the event of risks
- The three developed models were used to analyze the effects of five supply chain risk response policies that can be implemented by governments and businesses
 - Initially, the effectiveness of three government-level response policies was tested using Mixed Integer Programming and metaheuristics models
 - The results before and after the occurrence of supply chain risks were compared and analyzed, and the effectiveness of the policies was evaluated by comparing scenarios with and without

policy implementation

- Additionally, a simulation model for stable logistics supply chain design was tested. Unlike the first part, this section tested two policy scenarios that can be implemented at the corporate level, such as multi-sourcing and risk mitigation inventory

2) Policy Implementation Strategies

- Formulate a logistics strategy to support the global supply chain
- Clearly define the role and proportion of logistics according to the country's strategic direction, and establish an international logistics strategy based on this
- Identify the needs of companies requiring logistics services and classify the necessary international logistics services to prepare appropriate overseas logistics infrastructure and support policies
- Examine changes in domestic and international conditions and develop strategies tailored to the domestic situation, establishing a foundation for supply chain stabilization
- Secure key overseas ports
- Form a consortium with shipping companies capable of generating cargo volume, global logistics companies, the Korea Maritime Promotion Corporation, and port authorities to secure shares in overseas ports
- Nurture a Korean-style global terminal operator to secure overseas ports

-
- Consider diversifying maritime transport routes
 - Diversifying maritime transport routes is expected to play a crucial role in dispersing global risks
 - The current structure, which is concentrated on certain countries and routes, can deal a critical blow to the entire supply chain if issues arise in those routes
 - There is a need to reduce reliance on existing routes and secure stability in the global supply chain by developing new routes or expanding services in regions where South Korea's shipping services are relatively underdeveloped, such as the Middle East, Africa, and South America
 - Establish a supply chain risk response consultative body and system
 - A 'Supply Chain Risk Response Consultative Body' led by the Ministry of Trade, Industry, and Energy, the Ministry of Oceans and Fisheries, and the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, with participation from logistics-related research institutes and companies, is necessary
 - Through regular meetings, 1) preemptively organize supply chain risks and explore countermeasures, 2) monitor areas with potential supply chain risks
 - Additionally, 3) when supply chain risks actually occur, respond quickly according to pre-established manuals to effectively address them
 - It is essential to establish an early warning and response system

capable of preemptively responding to supply chain risks, and by linking with the Korea Customs Service's 'Trade My Data Service' platform, support rapid decision-making

4. Expected Outcomes

1) Academic Impact

- This study systematically evaluated global supply chain risks using quantitative analysis, moving beyond traditional qualitative approaches, and presented new analytical models and methodologies for global supply chain research.
- By integrating theories and methodologies from various disciplines such as economics, business management, and logistics, this study contributed to the promotion of multidisciplinary research.

2) Socio-economic Impact

- Through various scenarios, this study proposed proactive measures to address supply chain risks and supported the development of more rapid and effective response policies by the government and companies.
- The developed analytical models serve as tools to evaluate the effects of various policies in advance and derive optimal

policy alternatives, aiding policy makers in decision-making.

- In an increasingly uncertain global supply chain environment, this study contributes to the formulation of policy responses that can enhance national competitiveness.
- By systematically managing supply chain risks in key industries, the study lays the foundation for enhancing the sustainability of the national economy.

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

우리는 지금 러시아·우크라이나 전쟁, 이스라엘·하마스 전쟁, 이스라엘·이란 분쟁 등 전쟁의 시대에 살고 있다. 이러한 전쟁은 해당 국가의 영토와 경제, 그리고 국민의 삶이 피해를 볼 뿐만 아니라 전 세계 경제에도 막대한 영향을 끼치고 있다. 특히 러시아-우크라이나 전쟁은 전 세계 곡물 가격 상승을 초래했고, 이스라엘-하마스 전쟁과 이란과의 분쟁은 홍해를 통과하는 선박들이 공격당해 수에즈 운하가 아닌 희망봉으로 돌아가도록 만들었다.

특히 세계 2위 선사 머스크(Maersk)는 이란이 지원하는 후티 반군에 의해 여러 차례 공격을 받았다. 2023년 12월 31일, ‘머스크 항저우호’가 공격을 받아 48시간 동안 운항을 중단했으며, 이후에도 공격이 심해지자 2024년 1월 24일에 홍해와 아덴만 운항을 중단하였다.¹⁾ 이러한 전쟁과 내전으로 인해 물류 불확실성은 크게 증가하고 있어 이에 대한 대비책 마

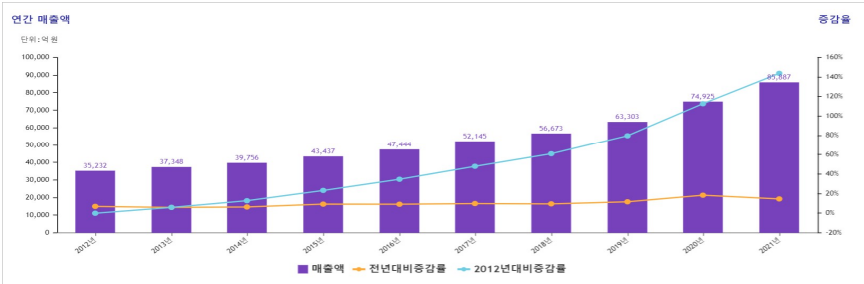
1) 파이낸셜뉴스(2024.1.25.) (검색일: 2024.4.22.)

런이 필요한 시점이다.

수에즈 운하의 마비는 물류에 막대한 영향을 준다. 2021년 3월 23일, 우리는 예상치 못했던 물류 붕괴 사건을 경험하였다. 길이가 400m나 되는 컨테이너선 에버 기븐(Ever Given)호가 시속 74km의 모래폭풍을 맞고 넘어져 좌초되었으며, 수에즈 운하를 6일간 마비시켜 최소 369척의 선박의 통행이 지연되었다.²⁾ 전 세계 물류의 10% 정도가 수에즈 운하를 통과하기 때문에 이러한 운하의 마비는 글로벌 공급망에 더 큰 영향을 주었다.

코로나19 팬데믹은 공급망의 중요성을 일깨워 주는 중요한 계기가 되었다. 이동 제한으로 인해 사람들의 외출이 제한됨에 따라 택배, 배달과 같은 물류 서비스 수요가 급증하였고 물류의 중요성을 체감할 수 있었다. 무엇보다도 국내 택배 시장은 2019년 6조 3,303억 원에서 2020년 7조 4,925억 원(전년 대비 18.4% 증가), 2021년 8조 5,887억 원(전년 대비 14.63% 증가)으로 크게 증가하였다.³⁾ 또한 배달서비스 역시 2019년 9조 7,000억 원에서 2020년 17조 3,000억 원으로 수직 상승했으며, 2022년에는 26조 6,000억 원까지 증가하였다.⁴⁾

〈그림 1-1〉 국내 택배시장 매출액 추이(단위: 억 원, %)



자료: 국가물류통합정보센터(검색일: 2024.4.23.)

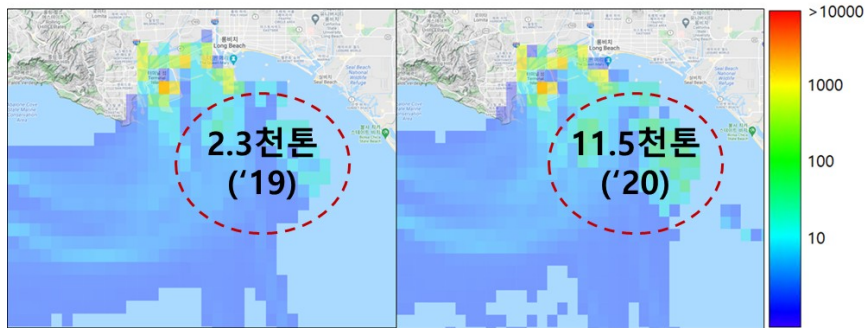
2) 위키백과 (검색일: 2024.10.10.)

3) 국가물류통합정보센터(검색일: 2024.4.23.)

4) 뉴스웍스(2024.2.15.)(검색일: 2024.4.23.)

코로나19 팬데믹은 전 세계적으로 사람들의 외출을 제한시켰고 이로 인해 사업장의 인력 부족 사태 또한 초래했다. 특히 미국 서부 항만에는 항만 노동자가 출근하지 않아 항만 기능이 마비되어 전 세계 물류가 멈추는 상황까지 이르게 되었다. 실제로 미국 LA/LB항 인근 주변 해역은 수십 척의 선박이 많게는 수십일씩 접안을 대기하였고, <그림 1-2>와 같이 코로나19 발생 직후인 묘박지에서의 선박 연료사용량이 2019년 2.3천 톤에서 2020년 11.5천 톤으로 약 5배 증가한 것으로 추정된다.⁵⁾

<그림 1-2> LA/LB항 코로나19 팬데믹전후 연료소모량 추정 비교 (좌: 2019년, 우: 2020년)



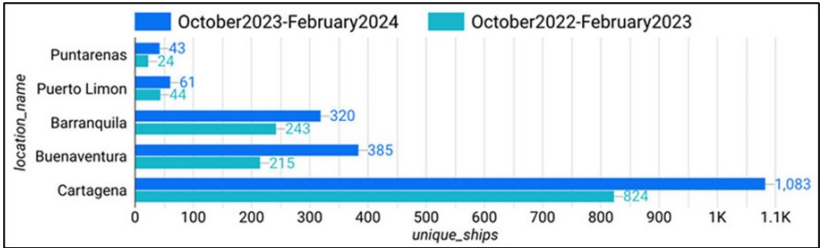
자료: 강무홍(2021.11.5.), p. 11.

최근 지구온난화로 인해 기후가 심각하게 변하고 있으며, 극심한 가뭄, 폭우, 폭설 등 세계는 지금 재앙을 겪고 있다. 특히 극심한 가뭄은 물류에도 영향을 미치고 있다. 최근 파나마 운하의 가뭄이 증가하고 있으며, 파나마 운하에 물을 공급하는 가톤호수의 적수량이 줄어들어 선박 통행량이 제한되고 있다. 2023년 시작된 가뭄으로 인해 하루 38척에서 24척으로 통행량이 감소했으며, AIS(Automated Identification System) 데이터 전문기관인 Spire Maritime에 따르면 2023년 10월부터 2024년 2월까지 운항한 선박이 전년 대비 21% 감소(3,526척 → 2,781척, 745척 감소)한 것

5) 강무홍(2021.11.5.), p. 11.

으로 분석되었다.⁶⁾

〈그림 1-3〉 파나마 운하 인근 항만 방문 선박수 변화



자료: Eco Marine(2024.4.2.) (검색일: 2024.4.23.)

공급망은 정치적으로도 많은 영향을 받고 있다. 미국의 IRA(Inflation Reduction Act, 인플레이션 감축법), CHIPs(Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors and Science Act, 반도체 산업 육성법), 일본의 수출 규제 등 전 세계 주요 국가가 글로벌 공급망에 영향을 줄 수 있는 자국 중심 정책을 발표하고 있다. 미국의 IRA, CHIPs 등으로 인해 우리나라 자동차 산업, 반도체 산업은 미국 내에서 주요 부품들을 생산해야 하므로 공급망 수정이 불가피하다. 또한 2019년 일본의 수출 규제는 반도체 등 우리나라 산업 전반에 걸쳐 큰 영향을 미쳤고, 2023년 수출 규제가 해제되면서 공급망의 재편이 예상된다.

앞서 살펴본 환경 변화들은 공급망이 가지고 있는 리스크로 정의될 수 있으며 항만 및 물류 운영에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 공급망 리스크는 인프라 투자, 관련 제도 운영 등을 통해 대응하기 위해 관련 다양한 방향으로 관련 연구를 진행하고 있다. 이나영 외(2023)의 연구에서는 항만 혼잡, 자연재해/감염병 발생, 노동자 파업 및 태업, 경제 불확실성 등이 물동량, 선적 생산성, 대기시간, 장치율 등 항만 운영에 어떻게 영향을 미치

6) Eco Marine(2024.4.2.) (검색일: 2024.4.23.)

는지와 관련해 스트레스 테스트와 항만 인프라 투자(외부 공간 마련, 내부 ITT 개발, 해외 거점 항만 개발 등), 법제도 지원(추가 비용 지원, 협의체 운영 등) 등 7가지 방안이 어떤 영향을 주는지도 분석하였다. 최석우 외(2019)의 연구에서도 해양수산분야 극단적 위험(x-event)을 도출하고 파급 효과와 정책적 대응 방안에 대해 살펴보았다.

하지만, 관련 정책과 연구 대부분은 공급망 리스크 발생 후 대응 방안에 초점이 맞춰져 있어 대책 마련 시 신속성이 저하된다는 한계점이 있었다. 코로나19 팬데믹, 일본의 수출 규제 등 공급망 리스크 발생 시 우리나라 수출입 물류는 거의 마비되다시피 하였으나 이에 대한 대책을 마련하는 데 많은 시간이 소요된 사례도 있다.

또한 공급망 리스크에 민감한 물류기업에서는 공급망 리스크를 미리 평가하고 준비할 수 있는 프로그램과 시스템이 구축되어 있지 않다. S사의 Cello와 같이 일부 공급망 리스크에 대응할 수 있는 시스템이 구축되어 있으나 대부분 중소 규모인 물류기업이 활용하기에는 여러 가지 제약이 따르고 있다.

이에 공급망 리스크와 관련해 사전 시뮬레이션을 수행하여 여러 대안을 도출함으로써 리스크 발생 시 즉각적인 대책을 마련할 수 있는 범용적인 기초 연구가 필요했으며, 범국가적으로 논의되고 있는 공급망 리스크 대응 정책들의 효과를 분석할 수 있는 모형 개발이 필요했다.

동 연구는 국정과제와 연계성을 가지고 있다. 먼저 글로벌 공급망 리스크 대응 방안을 제시하고 이를 안정화하는 연구로 ‘19. 거시경제 안정과 대내외 리스크 관리 강화’와 ‘20. 산업경쟁력과 공급망 강화하는 신산업통상전략’과 연계성이 있다.⁷⁾ 또한 항만을 중심으로 해운, 물류안정화를 통해 해상교통물류를 선도하고 물류 주권을 확보하기 위한 과제로써, ‘40. 세

7) 국무조정실 국무총리비서실(검색일: 2024.11.20.)

계를 선도하는 해상교통물류 구축', '41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리'의 국정과제와 관련 있다.⁸⁾

2. 연구 목적

본 연구는 공급망에서 발생할 수 있는 다양한 상황⁹⁾에 대비한 메타휴리스틱, 시뮬레이션 방법론으로 대안 공급망¹⁰⁾을 파악하여 제시할 수 있는 모형 개발을 목적으로 하고 있다.

이를 위해 기존 연구를 바탕으로 공급망 리스크를 정의하고 지원 정책을 파악한다.

다음으로 이러한 정책 효과를 보일 수 있는지 분석하기 위한 메타휴리스틱 모형과 시뮬레이션 모형을 개발하여 성능을 실험한다.

마지막으로 공급망 리스트 대응 시나리오 및 정책별로 실험을 수행하여 각 정책의 효과를 분석한다.

이를 통해 산업계와 정부가 공급망 대안 및 정책 효과를 분석할 수 있도록 지원함으로써 공급망 리스크 발생 전 사전 대비를, 발생 후에는 신속한 대응이 가능하도록 하고자 한다. 또한, 공급망 회복과 관련하여 사전에 대응할 수 있는 모형을 제시함으로써 관련 연구 확산에 기여하고자 한다.

8) 국무조정실 국무총리비서실(검색일: 2024.11.20.)

9) 코로나19 등과 같은 팬데믹, 국가파산/위기, 지진/태풍 등의 자연재해 등

10) 대체 공급자/운송사/선사/유통사 등의 공급망 참여자 및 대체 운송 경로 제시

제2절 연구 내용과 방법

1. 연구 내용

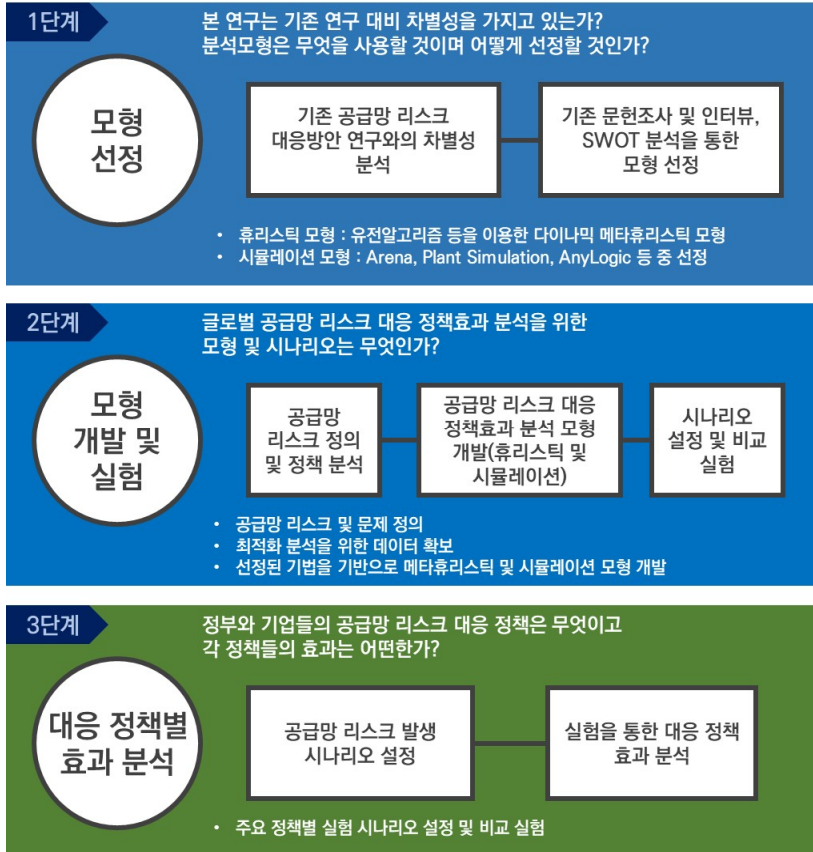
본 연구는 총 다섯 개의 장으로 구성되어 있으며, 1장 서론과 5장 연구 결과, 정책제언을 제외한 주요 연구 내용과 방법은 다음과 같다.

먼저 2장에서는 글로벌 공급망 리스크 관련 학술적 선행연구 분석을 통해 기존 연구와 본 연구의 차별성을 도출하였다. 또한 기존 문헌조사와 인터뷰 조사, SWOT 분석으로 메타휴리스틱과 시뮬레이션 모형의 세부 기법을 선정하였으며, 해당 모형으로 정책효과를 분석 및 활용할 수 있는 방향을 설정하였다.

3장에서는 공급망 리스크 대응 효과 분석 모형을 개발하였다. 이를 위해 먼저 공급망 리스크에 영향을 많이 받는 산업을 전망하였다. 다음으로 공급망 리스크를 정의하고, 이를 해결하기 위한 주요 정책을 조사하였다. 마지막으로 메타휴리스틱과 시뮬레이션 모형을 개발하여 시나리오를 설정, 실험을 수행한 후 두 모형의 결과를 비교하였다.

4장에서는 3장에서 조사한 해외 거점 항만 개발, 해상 무역로 다양화, 대형 터미널 운영 및 대체 부두 구축 등 3가지 공급망 리스크 대응 정책별로 효과를 분석하였다. 이를 위해 공급망 리스크가 발생할 경우, 관련 정책 추진 여부에 따른 결과를 비교하였으며 추후 정책입안자들이 참고하여 정책을 추진할 수 있도록 기초자료를 만들었다.

〈그림 1-4〉 본 연구의 흐름도



자료: 저자 작성

2. 선행연구와 본 연구의 차별성

1) 주요 선행연구

공급망 리스크 대응 정책효과와 관련한 주요 선행연구를 정책효과 분석, 리스크 완화 전략, 시뮬레이션 기반 모델링으로 나누어 검토하였다.

공급망 리스크 대응 정책효과 분석과 관련한 연구는 정책효과 측정과 분석에 중점을 두고 있으며, 정부와 기업의 협력 필요성을 강조한 연구가 주를 이룬다. 대표적으로 Lucio Picci(2006)¹¹⁾는 중앙정부와 지방정부의 경제적 영향을 분석하여 정책의 경제적 효율성을 높일 수 있는 방법을 제시하였다. 또한, 하명신 외(2011)는 부산항의 인센티브 제도가 환적 화물 증대에 기여했는지를 평가하고, 인센티브 정책이 항만 경쟁력에 미치는 영향을 분석하였다.¹²⁾

리스크 완화 전략에 대한 연구는 공급망 안정화를 위해 다양한 접근 방안을 제시하고 있다. 특히, 이나영 외(2023)는 항만에서의 리스크 요인을 분석하여 스트레스 테스트 기법을 활용한 항만의 대응 방안을 제안했다¹³⁾. 이 연구는 설문조사와 전문가 인터뷰를 통해 공급망 리스크 요인을 평가하고, 항만의 운영 안정성을 높이기 위한 방안을 검토하였다.

시뮬레이션 기반의 공급망 리스크 평가 및 분석에 관한 연구는 시나리오 분석과 모델링을 통해 리스크 요인을 계량화하려는 노력을 반영하고 있다. 대표적으로 Chan and Chan(2005)은 공급망 전략 비교 평가를 위해 시뮬레이션을 활용한 다섯 가지 공급망 모델을 구축하여 성능을 평가하였다.¹⁴⁾ 이러한 시뮬레이션 접근 방식은 다양한 공급망 환경에서 리스크 요인의 영향을 예측하고 효율적인 대응 방안을 제시하는 데 유용하다.

2) 선행연구와 차별성

기존 공급망 리스크 관련 연구 대부분은 설문조사, 자문, 문헌조사와 같은 정성적 방법에 치중했으며, 데이터 기반의 정량적 분석 또한 사후 영향

11) Picci, L. (2006). pp. 107-123.

12) 하명신·김철민·장병기 (2011)

13) 이나영 외(2023)

14) Chan F T, Chan H K.(2005)

평가에 초점을 맞추고 있어 실시간 대응에 한계가 있다. 또한, 단일 시물레이션이나 휴리스틱 모형을 통해 특정 리스크 요인을 예측하는 접근이 주를 이루어 비교 가능한 여러 모형을 활용하여 신뢰도를 검증한 연구는 드물다.

본 연구는 다양한 미래 공급망 리스크 상황을 설정하여 데이터를 기반으로 실험하고, 리스크 발생 시 즉각적으로 대응할 수 있는 시물레이션과 메타휴리스틱 모형의 성능을 함께 비교한다는 차별성을 갖는다. 기존 연구가 비용과 시간 기반의 통계 분석이나 시스템 다이내믹스를 활용한 예방적 리스크 평가에 초점을 맞춘 반면, 본 연구는 예방적 대응뿐만 아니라 회복적 대응 효과까지 분석할 수 있도록 비용과 정성적 요소를 모두 고려하여 대응 방안을 제시하는 방법론을 개발하였다.

이를 통해 공급망 리스크의 사전·사후 관리를 위한 체계적인 대응 모델을 제시하여, 실질적인 공급망 안정화 방안을 제안하는 것이 기존 연구와 주요 차별점이다.

3. 연구 방법

1) 국내외 문헌조사

본 연구에서는 글로벌 공급망 리스크의 정의와 대응 정책효과 분석을 수행한 여러 국내외 문헌을 조사하였다. 주로 국내외 기존 연구보고서, 논문, 정책자료들을 찾아보았으며, 국내외 언론 기사 및 관련 홈페이지를 분석하였다.

결과적으로 공급망 리스크 회피 방안을 제시한 다양한 연구들을 조사하였고, 이들의 한계점을 보완할 수 있는 모형을 개발하기 위해 노력하였다. 기존 연구 중에는 정량적으로 평가한 소수의 연구가 있었으나 대부분 정성

적으로 분석하여 모호한 결과가 도출되었다는 한계가 있었다. 따라서 본 연구는 이를 개선하여 정량적으로 대응 방안을 제시하고 효과를 분석할 수 있는 모형을 만들었다.

2) 전문가 인터뷰 및 설문

본 연구에서는 주요 산업별로 공급망이 어떻게 구성되어 있는지를 파악해야 하며, 특히 정량적인 분석을 위한 데이터 확보가 핵심이다. 이를 위해 글로벌 공급망 관련 현지 전문가들과의 인터뷰와 자료 조사가 필요하였다. 따라서 글로벌 공급망의 핵심인 미국을 방문하여 현지 물류기업(CJ대한통운, FNS USA, HMM 등)과 인터뷰, 설문 및 자료 조사를 시행하였다.

〈그림 1-5〉 전문가 인터뷰 및 설문(좌: CJ대한통운, 우: HMM, 하: FNS USA)



자료: 저자 작성(2024.4.10.-11 촬영)

3) 자료 조사

앞서 언급하였다시피 본 연구 결과의 핵심인 정책 효과 분석을 위해 현실성 있는 실제 데이터 확보가 중요하다. 이에 본 연구는 전문가 인터뷰뿐만 아니라 신뢰성 있는 여러 정보원의 자료를 확보하였다.

해상운임 및 시간과 관련해서는 Tradlinx, Drewry, HMM 등의 자료를 활용했으며, 전문가 인터뷰를 통해 자료의 정확성 확인하였다. 트럭운송과 관련해 미국의 경우는 구글맵을 이용하여 운송거리를 측정하고 Uber Freight에서 발표한 트럭운송운임 원단위를 적용하여 비용을 산출했다. 마지막으로 국내외 물류센터 보관비와 관련해 FNS USA, 디엔비로지스틱스 등을 통해 국내외 주요 지역별 평균 보관비를 조사하여 활용했다.

4) 모형 개발

본 연구의 모형 개발은 2가지로 구분된다. 첫 번째, 최적의 물류공급망을 탐색하고 공급망 리스크 발생 후 신속히 최적 물류공급망을 재탐색하기 위한 회복적 휴리스틱 모형을 개발하는 것이고, 두 번째, 공급망 리스크 발생 전 안정적인(Robust) 물류공급망을 제시하기 위한 예방적 시뮬레이션 모형을 개발하는 것이다.

본 연구에서는 실제 조사한 현실 데이터를 기반으로 다양한 상황을 반영할 수 있고 이벤트 발생 또는 데이터 변경 시 즉시 재탐색을 수행하여 새로운 해를 제시할 수 있도록 첫 번째 모형인 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 특히 기존 연구에서 반영되지 않았던 배송시간 제약(Time Window)과 배송가용량 제약(Heterogeneous Vehicle)을 추가함으로써 더욱 현실적인 대안을 제시할 수 있는 모형으로 개선하였다.

또한 시뮬레이션 모형은 태풍, 전쟁 등 다양한 공급망 리스크 발생 시에

도 안정적으로 운영 가능한 물류공급망 대안을 제시할 수 있도록 개발하였다. 특히 대안 복수 경로 운영, 멀티 소싱, 리스크 완화 재고 운영 등 공급망 안정화 정책의 효과를 분석함으로써 그 활용성을 확인하였다.

두 가지 모형 개발을 통해 먼저 물류공급망 리스크 발생 전에 최적의 대안을 찾고 안정적인 네트워크를 확보할 수 있도록 하였다. 만약 물류공급망 리스크가 발생한다면 변화된 환경과 데이터를 기반으로 최적의 대안을 재탐색할 수 있도록 회복적, 예방적 모형을 모두 개발하였다.

02

관련 연구 분석 및 모형 선정

본 장에서는 기존 연구와 본 연구가 대상 및 범위 차원, 방법론 측면에서 어떤 차이가 있는지 문헌조사를 통해 이를 분석하였다. 또한 인터뷰 조사 및 SWOT 분석으로 시물레이션 모형과 휴리스틱 모형의 장단점을 분석함으로써 본 연구에서 적용한 모형이 객관성을 확보할 수 있도록 노력하였다.

제1절 기존 연구와의 차별성 분석

1. 대상 및 범위 측면

글로벌 공급망 리스크 대응과 관련한 선행연구는 공급망 관리, 리스크 관리, 국제사회 분야의 다양한 측면을 다루었다. 특히, 특정 산업과 지역, 리스크 유형에 초점을 맞춰 글로벌 공급망에서 발생하는 문제를 분석하고 대응 전략을 모색하는 데 중점을 두고 있다.

먼저, 항만 및 글로벌 물류 네트워크 관련 연구는 글로벌 공급망에서

항만이 차지하는 중요한 역할과 관련한 리스크 요인을 분석하는 데 주력하고 있다. 중국 칭다오항을 사례로 한 연구에서는 항만 기업의 공급망 위험을 평가하고 관리하기 위해 Fuzzy AHP 방법을 제안하였다. 동 연구는 항만 서비스 과정, 운영, 항만 관계 및 외부 환경과 관련된 위험이 공급망에서 중요한 역할을 한다고 강조하며, 공급망 위험 제어를 강화하기 위한 방안을 모색하였다. 또한, 국가 해운 물류 네트워크의 성과를 측정하고 물류 네트워크의 위험이 네트워크 성과에 미치는 영향을 평가한 연구도 있다. 이 연구에서는 자료포락분석(DEA)과 회귀분석을 사용하여 네트워크 위험이 해운 물류 효율성과 물동량에 부정적 영향을 미친다는 결론을 도출하였다. 추가로 자동차 산업의 공급망 위험 요인이 자동차 운반선 시장과 자동차 생산에 미치는 영향을 분석한 연구는 주성분 분석(PCA)과 벡터자기회귀모형(VAR)을 통해 공급망 위험 요인이 자동차 생산 및 운반선 운영에 유의미한 영향을 미친다는 것을 확인했다.¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

전염병 발생 시 공급망 리스크 관리와 관련한 연구는 주로 개발도상국의 대응 모델을 개발하는 데 초점을 맞추고 있다. 서아프리카 에볼라 바이러스 질병 통제를 위한 연구에서는 전염병-물류 혼합 프로그래밍 모델을 개발하여 감염병의 동적 확산 움직임을 고려하면서 자원의 최적량, 시기 및 위치를 결정하였다. 또한, 개발도상국에 전염병 발생 시 공급망 대응 모델에 대한 의사결정 지원 부족 문제를 해결하기 위해 데이터 중심의 할당 모델을 개발한 연구도 있다. 이 연구에서는 다기간 공급망 모델을 통해 응급 보건 대응을 지원하고, 의료 자원과 인력을 효율적으로 할당할 수 있는 방법론을 제시하였다.¹⁸⁾¹⁹⁾

15) Jiang, B. 외(2018), pp.198-208.

16) 김영준 & 김창희(2023), pp.81-95.

17) 최병일 외(2023), pp.111-128.

18) Buyukhtakin 외(2018), pp.1046-1063.

19) Anparasan & Lejeune(2018), pp.53-64.

코로나19 팬데믹은 글로벌 공급망에 큰 충격을 주었으며, 이후 연구에서는 팬데믹이 공급망에 미친 영향을 분석하고, 공급망 재편 및 회복 전략을 제안하는 데 중점을 두고 있다. 동아시아 지역의 공급사슬에 미친 영향을 분석한 연구에서는 COVID-19가 공급사슬 중단 및 위기를 초래하였으며, 이로 인해 공급사슬 회복력과 유연성을 강화할 필요가 있다는 결론을 도출하였다. 또한, COVID-19 상황에서 주요국의 글로벌 공급망 관리 지원 정책을 비교·분석한 연구는 우리나라의 공급망을 재편하고 회복력을 구축하기 위한 시사점을 제공하였다. 또한 자연재해 및 팬데믹 상황에서 탄력적인 공급망 구축을 위한 국가별 정책방안을 제시하였다.²⁰⁾²¹⁾

마지막으로, 글로벌 공급망에서 항만의 역할과 리스크 관리 체계 관련 연구에서는 항만이 직면하는 다양한 리스크 요인을 분석하고, 이를 기반으로 항만의 리스크 관리 체계를 강화하기 위한 전략을 제시하고 있다. 글로벌 공급망의 불확실성이 증가하는 상황에서 항만의 역할과 중요성을 강조한 연구에서는 스트레스 테스트를 통해 항만 운영에 실질적인 영향을 미치는 주요 리스크 요인을 도출하였다. 이 연구는 이를 기반으로 항만 리스크를 완화할 수 있는 인프라 투자 및 제도적 대응 방안을 제안하였다.²²⁾

이처럼, 글로벌 공급망 리스크 대응에 관한 기존 연구들은 다양한 산업과 지역, 리스크 유형을 포괄하며 공급망의 복잡성과 리스크를 관리하기 위한 다양한 전략 방안을 제시하였다.

20) 한능호 & 박진우(2020), pp.243-258.

21) 이수진(2022), pp.61-75.

22) 이나영 외(2023)

2. 방법론 측면

1) 시뮬레이션 모형

글로벌 공급망 리스크 대응 연구에서는 공급망 관리의 복잡성과 불확실성을 해결하기 위해 다양한 시뮬레이션 방법론이 적용되어 왔다. 해당 연구들은 공급망의 성능을 최적화하고, 리스크를 효과적으로 관리하기 위해 시뮬레이션 기법을 활용하여 복잡한 문제를 해결하고 있다.²³⁾

먼저, 공급망의 성능, 설계, 분석에 중점을 둔 연구에서는 일반적인 공급망 모델을 구축하고 시뮬레이션하여 운송 비용, 자원 활용도, 재고 수준, 주문 주기 시간 등의 성능 지표를 평가하였다. 이러한 연구들은 공급망 관리 전략의 효율성을 비교하고, 실질적인 공급망 운영의 복잡성과 동적 특성을 효과적으로 대응할 수 있는 기반을 마련하는 데 기여했다.²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾

특히, 글로벌 다제품 화학 공급망은 수요와 운임의 불확실성을 해결하기 위해 확률적 프로그래밍 모델을 적용하여 생산, 재고 수준, 운송 모드, 배송 시간, 고객 서비스 수준을 고려한 시뮬레이션으로 비용 절감 효과를 도출하였다. 이와 함께 글로벌 화학 제품 제조사를 대상으로 수요, 공급, 리드타임의 불확실성이 비용과 고객 서비스에 미치는 영향을 분석하기 위해 최적화와 시뮬레이션 방법을 결합하여 다양한 불확실성 상황에서 실행 결과를 검토하고 관리 전략을 제시하였다.

다음으로 시장 변화와 기술 발전에 따라 유연하게 변화하는 동적 구조를 효과적으로 모델링하기 위해 MTS(Make-to-Stock) 및 MTO(Make-to-Order) 공급망을 포함한 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 이는 동적 구조의

23) Desheng & Olson(2008), pp.646-655.

24) Chan & Chan(2005), pp.998-1006.

25) You, F. 외(2009), pp.931-946.

26) Yavuz Aarc 외(2010), pp.3245-3268.

공급망을 시뮬레이션하여 실질적인 운영의 동적 요소를 반영하고 공급망의 효율성을 제고할 수 있는 방안을 마련하였다. 또한, 공급망의 위험 전파를 모델링하기 위해 베이지안 네트워크 분석을 사용하였으며, 실제 공급망 데이터와 시뮬레이션을 활용하여 다양한 위험 시나리오를 구체적으로 분석하여 리스크 관리 전략을 수립하였다.²⁷⁾²⁸⁾

해운 물류 분야에서는 화물의 위치 추적 문제를 해결하기 위해 GPS 좌표 흐름을 분석하여 시뮬레이션 모형으로 물류 거점 단위의 위치 이동을 추적하는 방법을 적용하였다. 이 연구는 위치 추적 시스템의 기능성과 정확성을 입증하였으며, 물류 효율성을 높이는 데 기여하였다. 또한 공급망 중단이 파급 효과를 분석하는 데 있어서는 공급, 생산, 유통 등 다양한 공급망 요인의 중단이 전체 공급망에 미치는 영향을 평가하기 위해 시뮬레이션 모형을 사용하였다. 이러한 접근법은 공급망의 복잡한 문제를 해결하는 데 중요한 도구로 활용되고 있다.²⁹⁾³⁰⁾

디지털 제조에서 데이터 기반 의사결정을 지원하기 위해 시뮬레이션과 기계학습을 결합한 하이브리드 모형을 개발하였다. 이 연구는 공급업체 성능의 중단이 전체 공급망 회복력에 미치는 영향을 평가하고, 기계학습 모형을 통해 공급업체의 위험 요소를 식별 및 예측하여 공급망 회복력 향상에 기여하였다. 또한, 코로나19 팬데믹으로 인한 정기선 네트워크의 중단 문제를 해결하기 위해 시뮬레이션 모형을 활용하였다. 이 연구는 팬데믹으로 인한 운송 서비스의 중단을 정량화하고, 공급망 중단의 채찍 효과(Bullwhip effect)를 완화하기 위한 생산-재고 제어 방법을 제안하여 대규모 위기 상황에서 공급망 안정성을 확보하는 데 중요한 전략을 제공하였다.³¹⁾³²⁾

27) Li & Chan(2013), pp.5403-5413.

28) Garvey 외(2015), pp.618-627.

29) 박병권 외(2015), pp.1235-1242.

30) Ivanov(2017), pp.2083-2101.

이와 같이, 글로벌 공급망 리스크 대응 연구에서는 시뮬레이션을 중심으로 한 다양한 방법론을 적용하여 공급망의 복잡성과 불확실성을 해결하고 있다. 이러한 연구들은 공급망 관리에서 발생하는 다양한 문제를 해결하고, 실질적인 운영 효율성을 향상시키는 데 필수적인 역할을 하고 있다.³³⁾

2) 기타 모형

글로벌 공급망 리스크 대응 연구에서는 시뮬레이션 외에도 다양한 최적화 및 모델링 기법을 활용하여 공급망의 복잡성과 불확실성이 높은 문제를 해결하고 있다. 동 연구들은 유전알고리즘(GA, Genetic Algorithm), 확률적 모델링, 최적화, 진화 알고리즘, 해석적 구조모형 그리고 디지털 트윈 기술 등을 통해 공급망의 리스크를 효과적으로 관리하고 회복력을 증진시키기 위한 전략을 제시하고 있다.

우선, 공급망 관리에서 생산 계획과 유통 계획의 통합 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘(GA)을 적용한 연구가 있다. 이 연구는 생산 및 유통 계획을 효과적으로 통합하기 위한 방법을 개발하여, 공급망 내 의사결정 및 운영 효율성을 향상시키는 데 기여하였다. 유전 알고리즘을 통해 생산 및 유통 계획 과정을 통합함으로써 공급망 관리의 복잡성을 줄이고 효율적인 자원 활용을 달성할 수 있었다.

또한, 공급망 네트워크 설계에서 회복력을 고려한 연구는 자연재해, 파업 등 예상치 못한 사건으로부터 공급망을 보호하기 위해 SAA(Sample Average Approximation method)와 몬테카를로 방법론을 결합하여 활용하였다. 이 연구는 다양한 시나리오에서 공급망 중단에 영향을 최소화하

31) Cavalcante 외(2019), pp.86-97.

32) Dirzka, C., & Acciario, M.(2022)

33) Ivanov, D.(2021)

고 효율적인 운영을 유지할 수 있는 최적의 네트워크 구성을 식별하였다. 이와 함께 공급망 중단 위험을 고려하여 회복력이 높은 소매 네트워크를 설계하는 연구도 진행하였다. 이를 바탕으로 다중 척도로 소매점을 여러 번 확인하는 작업을 거쳐 네트워크의 회복력이 크게 향상된다는 결과를 도출하였다.³⁴⁾³⁵⁾

비선형 모델과 혼합형 유전알고리즘 형태인 병렬 미미틱 알고리즘(memetic algorithm)을 활용한 연구에서는 글로벌 공급망 중단과 같은 불확실성을 고려하여 네트워크 설계를 하였다. 이 연구는 유연성과 회복력을 고려한 공급망 네트워크 설계로 공급망 중단의 영향을 최소화하고 효율적인 운영을 유지하는 데 성공적인 결과를 보여주었다.³⁶⁾

글로벌 공급망의 위험을 체계적으로 관리하면서 운영 계획을 도출하기 위해 진화 알고리즘을 적용한 연구는 공급, 생산, 유통, 운송 과정에서 발생할 수 있는 위험 사건에 사전 대응이 가능하였다. 이를 통해 체계적인 위험 관리가 글로벌 공급망의 이익을 증가시키고, 유통 센터의 재고 관리에 혼합 전략을 제안함으로써 글로벌 공급망의 운영 효율성을 높이는 데 기여하였다.³⁷⁾

해석적 구조모형을 활용한 연구에서는 공급사슬 회복탄력성의 핵심 역량을 종합적으로 파악하고 구조모형을 개발하여 글로벌 공급망 내에서 기업이 회복탄력성을 증진할 수 있는 방안을 제시하였다. 연구 결과, 해석적 구조모형을 통한 공급사슬 회복탄력성은 여러 층위의 핵심 역량으로 구성되어 있으며, 역량 간의 상호 연결 관계를 통해 유연성과 상황 파악 능력을 극대화할 수 있음을 시사하였다.³⁸⁾

34) Klibi & Martel(2012), pp.882-898.

35) Sadghiani, N. S.외(2015), pp.95-114.

36) Hasani & Khosrojerdi(2016), pp.20-52.

37) Park, Y. B., & Kim, H. S.(2016), pp.68-77.

38) Macdonald, J. R. 외(2018), pp.4337-4355.

마지막으로, 공급망 및 운영 관리에 디지털 트윈 기술을 적용하기 위한 연구에서는 7요소 프레임워크를 개념화하여 공급망의 가시성, 효율성 및 회복력을 향상시키고자 하였다. 이 연구는 문헌 조사, 전문가 인터뷰, 사례 연구를 통해 기존 디지털 트윈 모델들을 분석하고, 새로운 프레임워크를 설계하였다. 이를 통해 공급망의 다양한 구성 요소들을 디지털화하여 실시간 데이터와 연계되는 운영 모델을 구축하였으며, 디지털 트윈 기술이 공급망 관리에서 효과 적으로 적용 가능한 이론적 토대를 마련하였다.³⁹⁾

이처럼, 글로벌 공급망 리스크 대응 연구에서는 시뮬레이션 외에도 최적화 및 모델링 기법을 적용하여 공급망의 복잡성과 불확실성을 해결하고, 회복력을 강화하기 위한 다양한 전략적 방안들을 제시하고 있다. 이러한 연구들은 공급망 관리의 실질적인 운영 효율성을 높이고, 예기치 못한 리스크에 대비하기 위해 중요한 이론과 실무적 토대를 제공하고 있다.

제2절 분석 모형 선정

1. 기존 문헌조사 결과

글로벌 공급망 위협에는 생산 중단, 물류 지연, 자연재해, 경제적 변동 등을 포함하며, 불확실성 요인들을 효과적으로 관리하고 대응하기 위해 휴리스틱과 시뮬레이션 방법론을 활용하고 있다.

먼저 글로벌 공급망은 매우 복잡하며, 각 요인은 상호 연결되어 있어 하나의 변화가 전체 시스템에 미치는 영향을 예측하기 어렵다. 시뮬레이션은

39) Ivanov, D. (2023), pp. 2220-2232.

복잡한 요인들이 결합한 시스템을 모델링하여 다양한 변수와 시나리오를 조정, 결과를 분석할 수 있으며 휴리스틱 방법론은 복잡한 문제를 빠르고 효과적으로 해결할 수 있는 접근법을 제공한다. 예를 들어, Ivanov(2017)의 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 공급망 중단 시 발생할 수 있는 파급 효과와 중단의 원인 및 결과를 분석하였다. Park 외(2007)는 휴리스틱 모델을 활용해 생산 및 유통 계획을 통합적으로 수행하여 공급망 내 의사결정 및 운영 효율성을 크게 향상시켰다.

다음으로 공급망 관리에서 위험 평가와 전략 개발은 중요한 요소로 휴리스틱과 시뮬레이션 방법론을 활용하면 여러 가지 위험 요소를 테스트하고 영향을 평가할 수 있다. Hasani & Khosrojerdi(2016)는 복잡한 공급망 네트워크 설계 문제에 휴리스틱 접근법을 사용하여 불확실성 하에서도 유연성과 회복력을 고려한 모델을 개발하였다. Wu, D., & Olson, D. L.(2008)는 세 가지 위험 평가 모델을 사용하여 시뮬레이션으로 공급망 위험을 평가한 후 최적의 공급 선택을 지원하는 모델을 개발하였다. 이러한 연구들처럼 휴리스틱과 시뮬레이션 방법론은 실제와 유사한 조건에서 전략적 결정을 내릴 수 있는 기반을 마련해 준다.

마지막으로 공급망은 변화하는 시장 조건에 따라 신속하게 대응해야 리스크를 감소시킬 수 있다. 휴리스틱과 시뮬레이션 방법론은 실시간 데이터를 활용하여 신속하게 의사결정이 가능하다. 특히 최근에는 특정 이벤트 발생과 같이 외부 요인으로 인한 글로벌 공급망 변화가 빈번히 발생하고 있어 휴리스틱 및 시뮬레이션 방법론을 활용한다면 공급망의 유연성과 반응성을 크게 향상시킬 수 있다.

이처럼 휴리스틱과 시뮬레이션 방법론은 글로벌 공급망 관리에서 복잡한 문제 해결, 불확실성 관리, 신속한 의사결정 지원 등을 위한 중요한 역할을 한다. 이러한 방법론은 리스크 시나리오를 효과적으로 관리하고 최적의 해

법을 제공함으로써 공급망의 전반적인 성능과 경쟁력을 향상하는 데 기여하고 있다. 따라서 글로벌 공급망 리스크 대응을 위한 연구에는 휴리스틱과 시뮬레이션 방법론이 매우 효과적이라고 판단한다.

2. 인터뷰 조사 결과

본 연구의 방향과 관련해서 산업계, 학계 전문가로부터 다양한 의견을 수렴하였다.

먼저 산업계에서는 미국 현지에 본사를 두고 있는 FNS USA로부터 의견을 청취하였다. FNS USA는 약 30년 동안 한국과 북미 간 물류사업을 해 오고 있으며, 2021년 기준 매출 10억 달러를 돌파한 한국 화주 대상 북미 1위의 3PL 기업이다.⁴⁰⁾ 주요 수익 모델은 항만에서 물류센터까지, 물류센터에서 물류센터까지 OTR(On The Road) 기반의 Full Load 화물을 주로 수행하고 있고, 트럭에 위치 추적기를 부착하여 실시간으로 위치를 추적하고 있다고 한다. 특히 FTZ(Free Trade Zone)를 활용한 일종의 면세 물류 서비스와 최근 정세 변화로 인한 역물류 발생에 대응하기 위한 서비스 개발이 필요하다고 하였다. 또한 동 서비스 개발을 위해 우리나라 정부 차원에서의 정책지원의 필요성을 강조하며, 이를 평가하기 위해 본 연구에서 모형 개발이 매우 중요하다고 강조하였다.

다음으로 CJ대한통운 서부지사 역시 할랄 식품 생산 기준에 따라 미국으로부터 국내 또는 아시아 국가로의 역물류가 발생할 가능성이 높다고 하며, 이에 대한 정책 시행이 필요하다고 하였다.

HMM LA지점과의 인터뷰에서는 글로벌 물류 거점 확보의 중요성이 논의

40) FNS USA 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.10.)

되었으며, 이를 위해서 LA/LB항에 우리나라가 운영하는 터미널이 있어야 한다고 했다. 우리나라는 2014년 CUT(California United Terminals) 터미널을 확보하려 했으나 무산되었고, 현재 가격이 큰 폭으로 상승하여 사실상 터미널 확보가 어려운 상황이 되었다. 이에 코로나19와 같은 공급망 리스크가 발생하면 국적 선박의 하역 순서가 밀려 물류에 심각한 타격을 받을 수 있어, 이에 대한 대책 마련이 필요하다고 했다.

다음으로 군산대학교 물류학과 교수들로부터 모형 개발과 관련해서 의견을 청취하였다. 먼저 메타휴리스틱 모형과 관련해 기존 생산비, 운송비, 보관비 등의 일반적인 비용에 위험비용을 함께 고려하여 물류공급망을 탐색하는 방법보다 시간(Lead Time), 용량(Capacity) 등의 제약을 추가하여 현실을 최대한 반영한 물류공급망을 선정하는 것이 필요하다고 하였다. 이후 안정적인(Robust) 물류공급망은 시뮬레이션을 통해 다양한 상황 변수들을 입력해 실험해 봄으로써 탐색하는 것이 좋다고 논의하였다.

한국교통연구원과 부경대학교는 물류공급망 관점에서 다양한 정책효과 분석 시나리오 설정이 중요하다고 하였으며, 특히 무역안보는 산업부 문제이므로 전체 공급망 관점이 아닌 물류에 초점을 맞추어 연구를 진행하는 것이 필요하다고 하였다. 또한 한국철도기술연구원에서는 FNS USA와 같은 물류기업에서 데이터를 확보하는 것도 중요하지만 해운 운임, 항만 하역비 등은 신뢰성 있는 정보원을 통해 데이터를 확보해야 한다고 하였다.

〈표 2-1〉 수요조사 대상 및 내용

구분	기업/기관명	주요 수요조사 내용
산업계	FNS USA ⁴¹⁾	• FTZ 활용 및 역물류 대응을 위한 정부 정책지원과 이를 평가하기 위한 모형 개발 필요
	CJ대한통운 미국 서부지사 ⁴²⁾	• 미국으로부터의 역물류 발생 대응을 위한 정부 정책 마련 필요
	HMM LA 지점 ⁴³⁾	• 글로벌 물류 거점 확보의 중요성 및 LA/LB항 내 우리나라 운영 터미널 확보를 위한 정책 마련 필요
학계	군산대학교 ⁴⁴⁾	• 위험비용을 추가하는 것보다 시간, 용량 등의 제약 추가를 통해 모형의 현실화 및 정책효과 분석 기반 마련 • 휴리스틱을 통해 최적 물류공급망을 탐색하고 시뮬레이션을 통해 안정적인(Robust) 물류공급망 탐색
	부경대학교 ⁴⁵⁾	• 물류공급망 관점에서 다양한 정책효과 분석 시나리오 설정 필요
연구계	한국교통연구원 ⁴⁶⁾	• 무역안보는 산업부 문제이므로 시나리오 설정 시 물류공급망에 집중 필요
	한국철도기술연구원 ⁴⁷⁾	• 해운 운임, 항만 하역비 등의 데이터는 신뢰성 있는 정보원을 통해 확보 필요

자료: 각 기업/기관별 인터뷰 자료를 기반으로 저자 작성

3. SWOT 분석을 통한 모형 개발 방향 설정

앞서 연구 배경 분석, 기존 연구와 차별성 분석, 인터뷰 등을 바탕으로 다음 표와 같이 SWOT 분석을 수행하였다.

먼저 기회 요소로는 글로벌경제 중심의 이동에 따른 물류환경 변화, 글로벌 공급망 안전화와 관련한 국내외 인식 변화 등이 있는 것으로 조사되

41) FNS USA 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.10.)

42) CJ대한통운 미국 서부지사 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.11.)

43) HMM LA 지점 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.11.)

44) 군산대학교 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.2.27.)

45) 한국해양수산개발원(2024.6.), p. 5.

46) 상계서, p. 5.

47) 상계서, p. 5.

었다.

다음으로 위협 요소는 미국의 IRA, CHIPs 발표, 러-우 전쟁, 이스라엘-하마스 전쟁 등 공급망 불확실성의 증대가 해당하였다.

이에 반해 우리나라와 KMI 연구진이 가지고 있는 강점은 글로벌 공급망 안정화를 위한 대책 마련을 신속히 준비 중이고, 국내 물류기업들의 글로벌 네트워크가 많다는 것이 포함되었다. 또한 KMI는 수년간 공급망 리스크 대응 연구를 통해 이를 해결할 수 있는 최적화 모형에 많은 경험을 보유하고 있다.

반면 약점으로는 무역 중심인 우리나라는 지정학적으로 물류환경 변화에 민감하여 강대국들의 제도 변화에 즉각 반응한다는 한계점이다.

이러한 기회, 위협, 강점, 약점들을 취합하여 몇 가지 전략을 세우면 <표 2-2>와 같으며, 그 중 SO 전략(강점으로 기회를 차지)으로 글로벌 공급망 안정화 요구에 맞춰 AI 및 전 세계 데이터 확보한 후, 최적화 방법론 개선을 핵심 전략으로 수립하였다. 그리고 WO 전략(약점을 보완하여 기회로 활용)으로 물류환경 변화에 즉각 대응하여 정책 대안들을 평가할 수 있는 모형을 개발하였다. ST 전략(강점으로 위협요소를 감소)은 공급망 불확실성을 규명하고 관련 데이터 확보 및 시나리오 작성을 통해 최적화 방법론을 개발, 실험을 추진하였다. 마지막 WT(약점과 위협을 해결할 수 있는 전략 수립) 전략으로 우리나라가 부족한 글로벌 공급망 정보화, 통합화 추진을 위해 필요한 정책을 제안하였다.

본 연구는 이와 같은 전략 분석으로 시나리오 설정, 데이터 확보, 모형 개발, 실험 등을 수행하였으며, 이를 다음 장에서 하나씩 설명하도록 하겠다.

〈표 2-2〉 모형 개발 SWOT 분석

SWOT 분석을 통한 모형 개발 방향	O(기회)	T(위협)
	• 글로벌 경제중심의 이동에 따른 물류환경 변화 • 글로벌 공급망 안정화에 대한 국내외 인식 변화 • AI 기술의 발전	• 미국의 IRA, CHIPS 등 자국 보호주의 법률 발효 • 러·우 전쟁 장기화 • 이스라엘-하마스 전쟁 • 이스라엘-이란 분쟁 가시화 • 기타 공급망 불확실성 증대
S(강점)	SO전략	ST전략
• 글로벌 공급망 안정화를 위한 제도 및 조직 운영 준비 중 • 전 세계로 뻗어나가 있는 국내 물류기업 네트워크 • 세계적인 정보화 및 통신네트워크 확보 • 물류공급망 최적화 관련 휴리스틱 방법론 확보	• 글로벌 공급망 안정화 요구 증대에 맞춰 AI 및 전 세계 데이터 확보 후 물류공급망 최적화 방법론 개선 추진 • 실제 물류환경과 유사하도록 시간 제약, 용량 제약 등 추가 반영	• 공급망 불확실성을 규명하고 관련 데이터 확보 및 시나리오 작성을 통한 최적화 방법론 개발 및 실험 추진 • 위험 요소들이 어떻게 공급망에 영향을 미쳤는지 분석하여 함의 도출
W(약점)	WO전략	WT전략
• 무역이 중심인 국가이지만 지정학적으로 물류환경 변화에 영향을 많이 받는 국가 • 강대국들의 제도 변화에 민감하게 대응해야 하는 국가 • 물류정보화 및 통합화 미비	• 물류환경 변화에 즉각 대응하여 정책 대안을 평가할 수 있는 모형 개발 • 전문가와 협업하여 공동 연구 추진	• 부족한 글로벌 공급망 정보화 및 통합화 추진을 위한 정책 제언 작성에 활용 • 본 과제를 통해 확보한 시물레이션 모델링 경험으로 추후 공급망 불확실성 대응 연구 시 활용 추진

자료: 저자 작성

4. 모형 기반 정책효과 분석 개념

본 연구에서 언급하고 있는 모형 기반 정책효과 분석에 대해 간단히 정의하면, 비용, 운송시간 등의 현실 데이터를 이용해 최적의 물류공급망을 찾아 정책별 환경변수를 이용하여 다양한 시나리오를 구성한 후 시물레이션으로 정책 시행 효과를 확인하는 것을 의미한다.

이를 위해서는 우선 최적해의 탐색이 필요하다. 먼저 구간별 운송시간 및 비용, 운송가용량, 재고유지비 등 현실 데이터를 확보해야 하며, 이를 기반으로 최적의 물류공급망을 탐색할 수 있는 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형을 개발한다. 본 연구는 수리모형을 기반으로 혼합정수계획법을 개발했으며, ILOG CPLEX를 통해 최적해를 탐색하였다. 또한 Java 프로그래밍으로 유전알고리즘 기반 메타휴리스틱 모형을 개발하여 최선의 해를 단시간에 탐색할 수 있도록 하였다.

다음으로 다양한 공급망 리스크 발생을 고려하여 안정적인 물류공급망을 탐색할 수 있는 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 본 연구는 Arena를 기반으로 시뮬레이션 모형을 개발하였으며 전쟁, 태풍, 가뭄 등 다양한 극단적 위험 발생 시에도 유지할 수 있는 물류공급망을 탐색할 수 있도록 하였다.

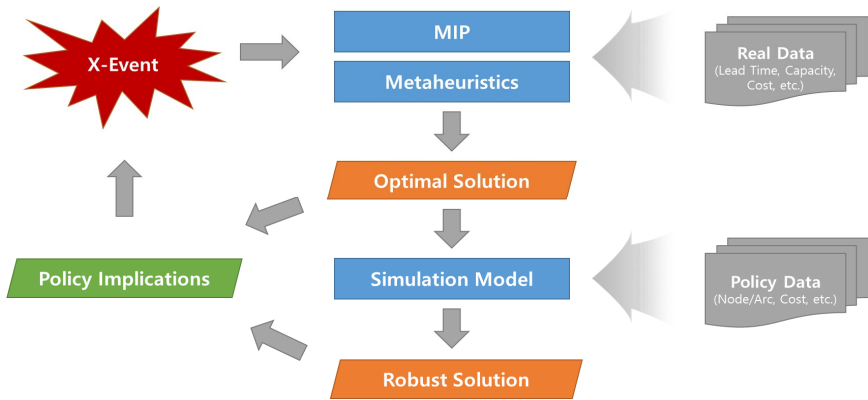
특히 본 연구에서 개발한 두 가지 모형을 기반으로 전 세계가 추진하고 있는 물류공급망 안정화 정책의 효과를 분석하였다. 각각의 정책 시행 시 비용·시간 변화뿐만 아니라 지점·경로 변화 등과 같은 정세에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 수치화하여 실험함으로써 정책효과와 안정적인 물류공급망 탐색이 가능하였다.

실험은 총 두 가지 형태로 진행하였다. 첫 번째, 본 연구에서 개발한 휴리스틱과 시뮬레이션 모형 검증을 위해 실험을 진행하였다. 휴리스틱 모형은 일반적인 상황과 공급망 리스크 발생 상황(미국 IRA 적용)을 가정하여 실험하였다. 또, 시뮬레이션 모형에서 공급망 리스크가 발생하지 않았을 때와 발생했을 때(태풍, 가뭄, 전쟁 리스크 등)를 비교하여 실험하였으며, 특히 공급망 리스크가 발생했을 때 대안 경로가 있을 경우와도 비교하여 시뮬레이션 모형의 유용성을 검토하였다.

두 번째, 공급망 리스크 대응 정책별로 실험을 진행하였다. 이는 해외 거점 항만 개발, 해상 무역로 다양화, 대형 터미널 운영 및 대체부두 구축 등

정부 차원에서 추진할 수 있는 세 가지 정책과 멀티 소싱, 리스크 완화 재고 등 기업 차원에서 추진할 수 있는 두 가지 정책 등 총 다섯 가지 시나리오와 관련하여 실험을 진행하였다.

〈그림 2-1〉 모형 기반 정책효과 분석 개념도

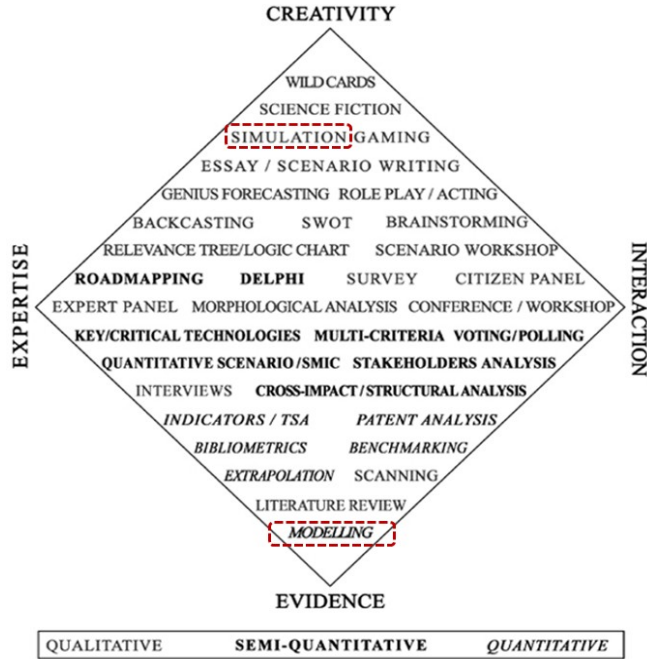


자료: 저자 작성

Popper(2008)의 연구에서 정책효과 분석과 관련한 두 가지 모형의 차별성과 관점을 확인할 수 있었다. Popper는 다양한 미래예측 방법론을 4개의 꼭지점을 가진 다이아몬드 형태에 재배치하여 정리하였으며, 세로축은 ‘창의성(creativity)’과 ‘근거(evidence)’를 대척점으로 활용하였다.⁴⁸⁾ Popper에 따르면, 본 연구에서 사용하고 있는 시뮬레이션 모형은 불확실한 미래를 예측하는 데 있어서 매우 창의적인 결과를 도출할 수 있으며, 메타휴리스틱 모델링은 근거와 데이터를 중시하여 합리적인 결과를 도출하는 것으로 비교될 수 있다. 본 연구는 모형별 관점에 맞게 합리적인 근거에 의거하여 최적대안을 도출할 수 있는 메타휴리스틱 모형과 창의적으로 다양한 공급망 리스크를 발생시켜 안정적인 물류공급망을 제시할 수 있는 시뮬레이션 모형을 개발하였다.

48) Popper(2008), p. 66, 재인용: 최석우 외(2019), p. 25.

〈그림 2-2〉 Popper(2008)의 미래예측방법 다이아몬드 중
본 연구의 모형별 위치



자료: Popper(2008), p. 66, 재인용: 최석우 외(2019.), p. 26.

03

공급망 리스크 대응 효과 분석 모형 개발

본 장에서는 공급망 리스크 대응 효과 분석 모형을 개발하였다. 이를 위해 공급망 리스크에 큰 영향을 받는 산업에 관해 전망하였다. 다음으로는 공급망 리스크에 대해서 정의하고, 주요 정책들이 어떤 것들이 있는지 기존 연구를 바탕으로 주요 정책을 살펴보았다. 마지막으로 본 연구의 핵심 내용인 메타휴리스틱과 시뮬레이션 모형을 개발하고 여러 정보원을 통해 조사한 데이터를 기반으로 시나리오를 설정, 실험을 수행한 후 결과를 비교하였다.

제1절 공급망 리스크 정의 및 주요 정책

1. 주요 산업별 교역국 및 공급망 리스크 영향 전망

2023년 8월, 한국은행 조사국 지역경제부는 ‘우리나라 주요 제조업 생산 및 공급망 지도’를 발간하였다. 동 보고서는 우리나라 주요 제조업의 지역별 생산 현황과 교역 흐름을 한눈에 파악할 수 있도록 권역별 생산 점유율, 업체별 공장 소재지와 생산 제품, 국가·제품별 수출입 현황 등을 정리

하였다.⁴⁹⁾ 주요 품목으로는 생산 또는 수출 비중이 높은 반도체, 디스플레이, 무선통신기기, 자동차(전기차 포함), 자동차부품, 철강, 조선, 석유정제, 석유화학, 기계장비, 전기장비(이차전지 포함) 등 총 11개의 품목이 선정되었으며, 각각 국내 생산 및 수출 규모, 주요 소재·부품·제조장비 수입 규모를 설명하고 있다.

〈표 3-1〉 주요 품목별 생산, 수출 및 소재·부품·제조장비 수입 규모(2022년 기준)

품목	생산액(조 원)*	수출액(억 달러)	수입액(억 달러)
반도체	179	1,427	467
디스플레이	74	211	127
무선통신기기	63	194	182
자동차(전기차 포함)	105	541	90
자동차부품	109	233	36.1
철강	183	545	637
조선	33	182	66
석유정제	123	631	1,774
석유화학	115	543	362
기계장비	136	621	114
전기장비(이차전지)	115	414(91.43)	352(224)

주: * 생산액은 2021년 기준

자료: 한국은행(2023.8.), pp. 1-45를 기반으로 저자 작성

수출·입 규모와 관련해서 국가별로 점유율을 나타내고 있으며, 특히 수입은 특정 국가에 의존도(비중)가 높은 품목별(HS코드 기준)로 비중과 금액을 표시하고 있다.

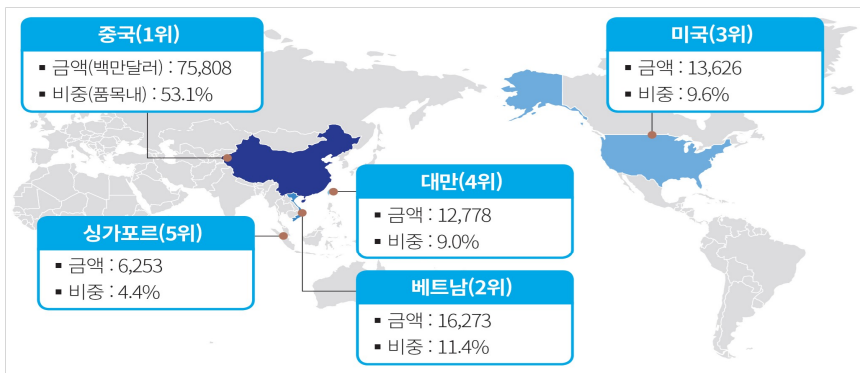
본 연구는 생산·수출·수입 규모와 특정 국가에 의존도가 높은 품목을 검토하여 공급망 리스크의 영향을 분석하였다. 수출액이 높은 석유정제 산업의 경우 원료 및 제품이 전용선으로 운송하여 물류의 변화가 많지 않아 제외하였다.

49) 한국은행(2023.8.), p. 4.

1) 반도체

우리나라 반도체 생산액은 2017년 120조 원에서 계속 증가하여 2021년 179조 원 규모까지 증가하였다.⁵⁰⁾ 수출액은 1,427억 달러까지 증가하여 우리나라 총수출 대비 20.9% 규모로 가장 높은 비중을 차지하는 산업이다. 주요 수출국은 중국(53.1%)이었고 다음으로 베트남(11.4%), 미국(9.6%), 대만(9.0%), 싱가포르(4.4%) 순이었다.

〈그림 3-1〉 반도체 수출국 비중



자료: 한국은행(2023.8.), p. 3.

수입의 경우, 소재 및 부품은 중국(23.1%), 일본(21.4%), 미국(17.0%), 반도체 제조장비는 미국(23.3%), 일본(23.3%), 네덜란드(22.8%) 등 특정 국가 의존도(비중)가 매우 높았다. 특히 ‘슈퍼캐پ(중국)’, ‘플루오린 폴리이미드(일본)’ 등은 90% 이상 해당 국가에 의존하고 있는 것으로 분석되었고, ‘반도체 웨이퍼 레이저 다이싱기(일본)’ 및 ‘E-beam 노광장치(네덜란드)’는 거의 해당 국가에 100% 의존하고 있는 것으로 조사되었다.⁵¹⁾ 이들 국가와 정치·외교·경제 등에 문제 발생할 경우 반도체 산업에 큰 영향을 미

50) 한국은행(2023.8.), p. 1.

51) 한국은행(2023.8.), pp. 3-4.

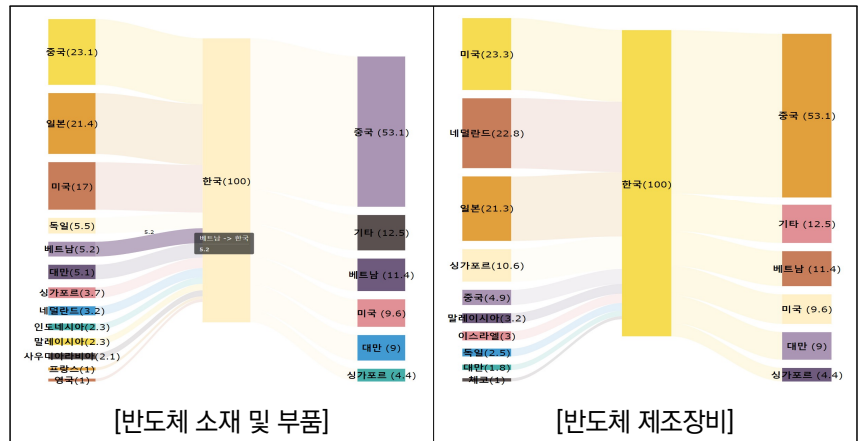
칠 수 있기 때문에 협력 관계 유지와 리스크 발생 대응을 위한 정책 마련이 필요하다.

〈그림 3-2〉 반도체 소재·부품 수입국 비중 〈그림 3-3〉 반도체 제조장비 수입국 비중



자료: 한국은행(2023.8.), p. 4.

〈그림 3-4〉 반도체 수입 및 제품 수출 흐름도(단위: %)



자료: 한국은행(2023.8.), pp. 3-4.를 기반으로 저자 작성

2) 이차전지

우리나라 전기장비 생산액은 2017년 79조 원에서 2021년에는 115조 원까지 증가하였다.⁵²⁾ 수출액 또한 414억 달러까지 증가하였고, 이 중 이차전지 수출은 리튬이온전지가 73.41억 달러(17.7%), 납축전지가 18.02억 달러(4.3%) 달성하였다. 특히 미국 수출이 리튬이온전지, 납축전지가 각각 47.3%, 26.0%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다.

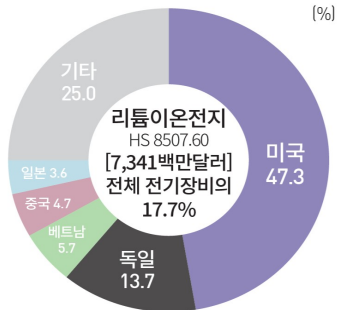
수입의 경우, 특정 국가에 대한 의존도가 심각한 것으로 분석되었다. 특히 이차전지 소재의 경우 중국 수입 비중이 63.7%로 매우 심각하게 편중된 것으로 분석되었다. 이는 미-중, 한-중 갈등 심화 시 이차전지 소재 수입이 어려워질 수도 있다는 것을 의미하기 때문에 사전에 대책과 정책 마련이 시급하다. 특히 ‘활물질(LCO)’, ‘분리막(PP/PE 필름)’은 중국 수입이 100%이고, ‘전구체(NCM 산화물)’, ‘전구체(NC/NCA 수산화물)’, ‘활물질(NCM 리튬염)’, ‘음극재(실리콘가루)’, ‘ 전해질(탄산에스테르 첨가제)’ 등도 100%에 육박⁵³⁾해 수입 차질 시 이차전지 생산이 불가능할 수도 있다.

반대로 중국 생산 소재나 부품을 이차전지에 포함했을 경우 IRA로 인해 미국에서 세제 혜택을 받지 못할 수도 있어 이차전지 소재 수입국의 다변화가 필요하다. 특히 리튬이온전지의 경우 미국의 비중이 50%에 육박하기 때문에 미국 시장을 유지, 확대하기 위해서는 주요 소재의 중국 수입 문제를 해결하기 위한 방안 마련이 시급하다.

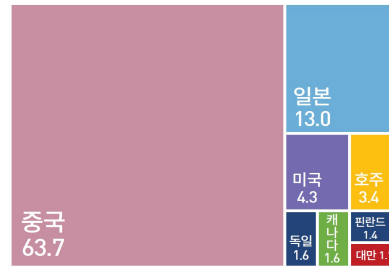
52) 한국은행(2023.8.), p. 41.

53) 상계서, p. 45.

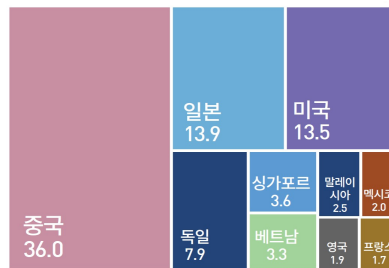
〈그림 3-5〉 이차전지 수출국 비중



〈그림 3-6〉 이차전지 소재 수입국 비중

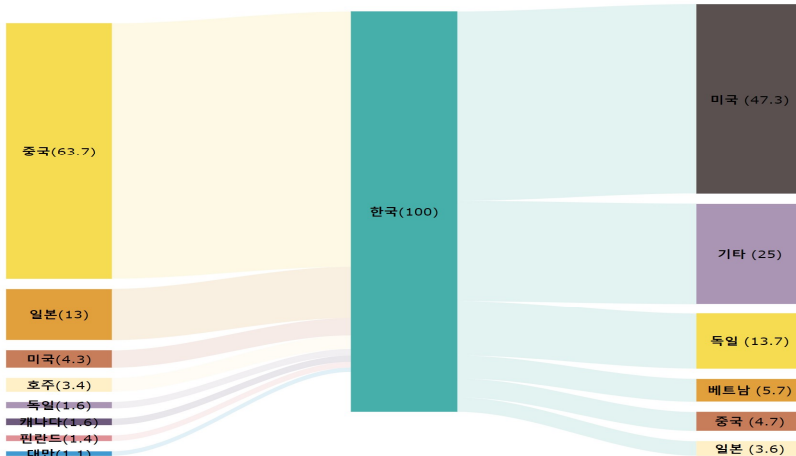


〈그림 3-7〉 이차전지 장비 수입국 비중



자료: 한국은행(2023.8.), pp. 43-45.

〈그림 3-8〉 리튬이온전지 소재 수입 및 제품 수출 흐름도(단위: %)



자료: 한국은행(2023.8.), pp. 43-45를 기반으로 저자 작성

2. 공급망 리스크 정의 및 영향

본 연구에서는 전체 공급망 중 물류에 중점을 둔 물류공급망 탐색 모형 개발에 초점을 맞췄다. 이에 따라 공급망 리스크 또한 물류 관점에서 발생 가능한 것들만을 대상으로 하였고, 대응 정책 역시 물류에 영향을 줄 수 있는 정책 중심으로 선정하였다.

1) 물류공급망의 정의

먼저 공급망과 물류공급망을 비교해 보고자 한다. Bechtel & Jayaram (1997)에 따르면, 공급망 개념은 초기에 자재 이동을 원활히 하고 공급자와 수요자 간 원활한 공급과 수요를 충족시키는 데 중점을 두고 있었다.⁵⁴⁾ 다시 말해 원자재 공급자, 제품 생산자, 제품 분배자, 판매자, 고객 등으로 이루어지는 공급망 내 모든 이해관계를 상호 연결하는 사슬 구성을 공급망이라 할 수 있다. 이는 교통, 통신 등 기술 발달로 인해 글로벌화가 이루어졌고, 전 세계에 흩어져 있는 이해관계자가 연결되며 글로벌 공급망을 구축하였다.

이러한 공급망은 비용과 시간 관점에서 ‘절감(lean) 전략’과 ‘유연성(agility) 전략’ 등 두 가지 전략으로 나눌 수 있다. 먼저 절감 전략은 환경은 안정적이지만 경쟁이 있는 경우 공급 기업들과의 원가 절감으로 우위를 확보하는 것이 목적이고, 유연성 전략은 불확실한 환경 속에서 공급 기업들과 함께 변화하는 환경에 능동적으로 대처하여 기업의 활로를 모색하는 것이 목적이다.⁵⁵⁾

54) Bechtel & Jayaram(1997), p. 16, 재인용: 권보배 외(2022), p. 27.

55) 최종민(2021), p. 2, 재인용: 이성우 외(2024.1), p. 19.

일반적으로 공급망은 재화의 가치에 초점을 맞추는 절감 전략을 더 중시하는 경향이 있으나 본 연구의 대상인 물류공급망은 이동, 즉 유연성 전략에 중점을 두고 있다. 따라서 공급망에 비해 물류공급망은 절감 전략 중 물류비 절감에 집중하는 좁은 범위의 개념이며, 유연성 전략에서는 신속성과 안정성을 동시에 고려해야 한다는 점에서 차이가 있다.⁵⁶⁾ 이에 본 연구는 일반적인 공급망에서 고려하고 있는 생산비, 생산준비비 등 생산 관련 비용을 제외하고 물류 관련 운송비, 보관비 등을 중심으로 최적해 탐색을 위한 모형을 개발하였다.

2) 공급망 리스크

최석우 외(2019.12.)는 현대사회가 과거 데이터로는 예측이 불가능한 ‘극단적 위험’에 노출되어 있으며, 이러한 극단적 위험은 발생 가능성이 매우 낮지만 일단 발생할 경우 사회에 엄청난 영향을 줄 수 있는 미래 리스크로 정의될 수 있다.⁵⁷⁾ 이러한 극단적 위험은 언제, 어디서, 어떻게 일어날지 예측할 수 없으나 결국 일어나고 있다는 것에 주목해야 하며, 사건이 발생했을 때는 막대한 영향을 끼칠 수 있기 때문에 사회적 회복력(resilience)을 높여야 한다.⁵⁸⁾

극단적 위험은 공급망과도 깊은 관련이 있다. 다음 <표 3-2>에서 볼 수 있듯이 최석우 외(2019.12.)의 연구에서 도출한 해양수산분야 극단적 위험 중 해상 무역로 봉쇄, 대형 재난에 의한 항만 폐쇄, 해양 사이버보안 사고 등은 발생가능성이 매우 낮지만, 발생 시 물류에 직접적으로 큰 영향을 줄 수 있는 리스크로 대비책 마련이 필요하다.

56) 이성우 외(2024.1.), p. 19.

57) 최석우 외(2019.12.), p. 5.

58) 상계서, p. 6.

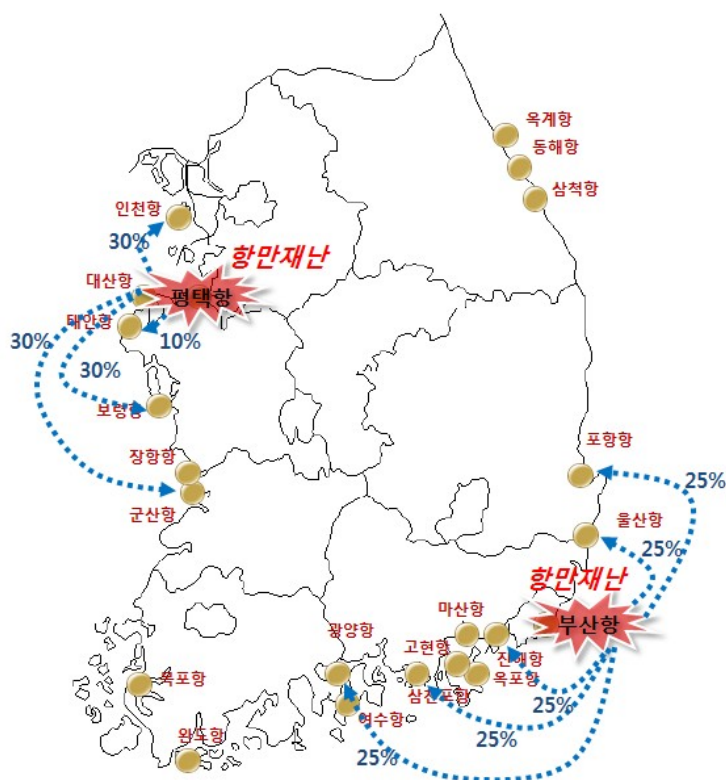
〈표 3-2〉 해양수산분야 극단적 위험 도출 과정

단계	미래 리스크	해양수산분야 극단적 위험	분류
1 단계	2 단계	중국의 원전사고 위험 증가 초대형 해일 및 해저지진 발생 지구상 화석에너지 고갈 세계 무역 감소로 인한 우리나라의 수출입 타격 세계 무역갈등에 따른 해상전쟁 위험 고조 대규모 물류 혼란 발생	- 제거
	3 단계	일본 자위대의 독도 무단 점거 국제 해양 관할권 확대 경쟁 심화 해양관할권 분쟁	국제 해양관할권 분쟁 통합
		해양플라스틱 쓰레기로 인한 해양생태계 파괴 미세플라스틱을 함유한 수산물 섭취에 따른 건강 위협 해양쓰레기로 인한 먹이사슬 붕괴, 생태계 교란 해양생태계 오염으로 신종 질병 발생 플라스틱 쓰레기로 인한 어류 대량폐사	해양쓰레기로 인한 해양생태계 파괴 통합
		수산자원 고갈 수산물의 대규모 전염병 확산 해양으로부터 유래된 대규모 질병 유행	수산자원 고갈 통합
		대규모 해양 기름유출사고 해양사고로 인한 해양환경오염 증가	해양 유류유출로 인한 해양환경오염 통합
		해상 무역로 봉쇄 해상무역로 봉쇄에 따른 군사적 긴장 고조와 국방비 부담 가중	해상 무역로 봉쇄 통합
		대형 재난에 의한 주요 항만 폐쇄 해양도시에 대규모 재난 발생	대형 재난에 의한 항만 폐쇄 유지
		자동화 선박의 해킹 보안 관련 사고 증가 국가 간 해양정보전쟁 발발	해양 사이버보안 사고 통합
	4단계	- 해상 선박사고 해양자원 소유권 분쟁	추가

자료: 최석우 외(2019.12.), p. 90.

김형근 외(2012.12.)는 항만에서 발생할 수 있는 재난과 대응 방안을 연구하였다. 동 연구에서는 재난, 즉 공급망 리스크를 태풍, 지진, 컨테이너 크레인 파손, 선석 파손, 노동자 파업 등으로 보고 있으며, 이에 대응하기 위해 항만 비즈니스 연속성 관리(PBCM: Port Business Continuity Management) 도입이 필요하다고 하였다. 특히 국내 항만의 PBCM 수준을 분석하여 각 항만별 리스크 발생 시 대체 부두와 대체 항만을 미리 설정하는 것이 필요하다고 하였다.

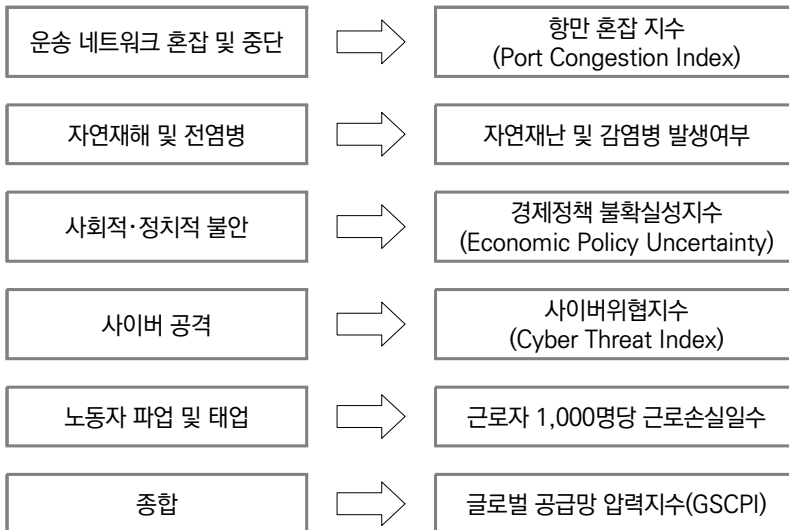
〈그림 3-9〉 항만 재난 시 대체부두 개념도(물량이전)



자료: 김형근 외(2012.12.), p. 134.

이나영 외(2023)의 연구에서는 항만 혼잡, 자연재해/감염병 발생, 노동자 파업 및 태업, 경제불확실성 등이 물동량, 선석생산성, 대기시간, 장치율 등 항만의 운영에 어떻게 영향을 미치는지에 대해 스트레스 테스트를 통해 분석하였다. 스트레스 테스트란 극단적이지만 실현 가능성이 존재하는 사건이나 충격에 대해 시스템의 취약성을 평가하고 충격의 영향을 분석하는 리스크 관리 기법⁵⁹⁾의 하나로, 공급망 리스크 발생을 가정한 시뮬레이션 모형과 유사한 방법론으로 볼 수 있다. 동 연구에서는 <그림 3-10>과 같이 총 6가지 항만의 공급망 리스크를 측정할 수 있도록 항만 혼잡 지수, 경제정책 불확실성지수 등의 데이터를 활용하였으며, 각 지수들이 물동량, 선석생산성, 대기시간, 장치율 등 항만 운영 판단지표에 어떻게 영향을 미치는지 <그림 3-11>과 같이 분석하였다.

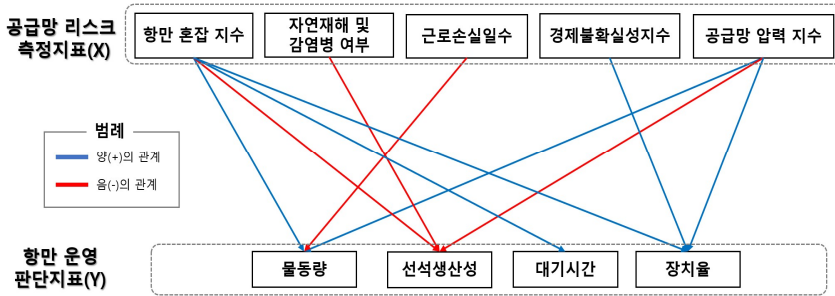
〈그림 3-10〉 항만의 공급망 리스크



주: 사이버 위협지수는 최종 영향분석에서는 제외
자료: 이나영 외(2023), p. 80.

59) 이나영 외(2023), p. 85.

〈그림 3-11〉 측정지표와 판단지표간 영향 관계도



자료: 이나영 외(2023), p. 118.

아울러 동 연구에서는 이해관계자 간의 인터뷰 및 문헌조사를 바탕으로 항만 인프라 투자(외부 공간 마련, 내부 ITT 개발, 해외 거점 항만 개발, 항만 사이버 보안 체계 강화), 법제도 지원(추가비용 지원, 대형 터미널 운영, 협의체 운영) 등 7가지 방안을 도출하였으며, 각 방안의 영향을 분석하였다. 항만 운영 판단지표는 선행연구 분석을 통해 1차로 11개의 지표를 도출했으며, 설문을 통해 5개의 공급망 리스크 측정지표로 종합하고, 마지막으로 델파이 조사에서 4개의 항만 운영 판단지표를 도출하였다.

이 중 내부 ITT 개발은 부두별 유연성을 높임으로써 공급망 리스크 발생 시 유연히 대응할 수 있게 한다. 실제 화물연대 파업 당시(22.06.07~06.15) 해당 ITT 도로를 이용해 처리한 컨테이너는 총 6만 8천 개로 신항 컨테이너 전체 수용 능력의 약 20%를 항만 내에서 처리하였고,⁶⁰⁾ 이를 통해 컨테이너 야드 공간의 포화를 피하는 등 비상사태에도 불구하고 안정적인 항만 운영을 진행하여 부산항의 경쟁력을 유지한 바 있다.⁶¹⁾

또한 세계의 공장이라 불리던 중국은 제로 코로나 정책 등으로 글로벌 공급망 혼란을 초래하였고, 2018년부터 지속되고 있는 미-중 무역전쟁까

60) 국제신문(검색일 : 2023.9.25.), 재인용: 이나영 외(2023), p. 112.

61) 이나영 외(2023), p. 112.

지 겹치면서 글로벌 기업들의 생산기지 탈중국화 움직임이 일어나고 있다.⁶²⁾ 이에 항만 물동량도 베트남, 인도네시아 등 ASEAN 국가로 이동할 수 있으므로 해외 핵심 거점 항만 개발 및 투자 확대가 공급망 리스크 대응에 효과적일 것이다.

〈표 3-3〉 글로벌 기업들의 글로벌 공급망 재편 현황

기업명	이전 경로	세부 내용
애플	중국→ 인도·베트남	• 애플 협력사 폭스콘 인도에 약 5억 달러 투자 공장 2곳 신설 • 애플 협력사 폭스콘 베트남 공장 확충을 위해 3억 달러 투자
구글	중국→인도	• 픽셀 스마트폰 생산 인도로 이전 검토
소니	중국→태국	• 카메라 공장의 90% 태국 이전
LG전자	중국→ 베트남	• 차량용 인포테인먼트 부품을 생산하는 중국 쿤산공장 정리 후 베트남 법인으로 일원화
LG에너지솔루션	(신규) 인도네시아	• 니켈의 안정적인 원자재 확보를 위해 인도네시아에 니켈 제련소 구축

자료: Bloomberg(검색일 : 2023.08.07.), Petapixel(검색일 : 2023.08.07.), 한국경제(검색일 : 2023.08.07.), 헤럴드경제(검색일 : 2023.08.07.), 대한무역투자진흥공사(2022), 재인용: 이나영 외(2023), p. 116.

대형 터미널 운영은 공급망 리스크 대응에 효과적일 것이다. 소형 터미널은 대형 터미널에 비해 장치공간과 여유 공간이 협소하므로 비상 상황에서 버틸 수 있는 기간이 짧을 수밖에 없다.⁶³⁾ 현재 3개 정도의 선석을 가지고 있는 부산항 신항 대부분의 터미널은 화물연대 파업과 같은 비상 상황에서 최대 20일 정도를 버틸 수 있으나 대형화를 통해 10~20% 정도의 여유 공간을 추가로 확보하면 50일까지는 충분히 버틸 수 있다고 한다.⁶⁴⁾ 따라서, 신규 터미널의 대형화 또는 기존 터미널을 통합하여 대형 터미널을 운영함으로써 파업, 태풍, 지진 등 공급망 리스크에 대응할 수 있도록 해야 할 것이다.

62) 이나영 외(2023), p. 112.

63) 상계서, p. 125.

64) 상계서, p. 125.

앞서 살펴본 공급망 리스크 관련 연구는 다음과 같이 공급망 리스크를 정의하고 있으며, 특히 대응 방안과 효과를 함께 제시하였다.

〈표 3-4〉 기존 연구에서의 공급망 리스크 및 대응 방안/효과 종합

연구	공급망 리스크	대응 방안 및 효과	
최석우 외 (2019.12.)	• 해상 무역로 봉쇄 • 대형 재난에 의한 항만 폐쇄 • 해양 사이버보안 사고	예방적 차원	• 해양안전 관련 법제도 보완 • 해상사고 대응 장비 및 인력 확충 • 국가 방재능력 및 대응능력 강화
		완화적 차원	• 대응 매뉴얼 개선 및 표준 시나리오 구비 • 구조/구급 장비 및 인력의 신속한 동원 체계 구축 • 대형 선박사고 대응 통합훈련 강화
		회복적 차원	• 과학적 해상사고 조사체계 도입 • 사회적 갈등 해소 시스템 마련 • 사회적 재난 보험정책 강화
김형근 (2012.12.)	• 자연재해(태풍/지진) • 항만 사고(CC 파손, 선석 파손) • 노동자 파업	• 재난 및 재해대응 매뉴얼 개선 • 재난발생 항만의 대체부두 설계 및 구축 • 재난 및 재해방지용 항만시설의 효율성 제고 • 배후 연계시설(배후도로 및 인근 항만)과의 연계 효율화 → 항만 하역 안정성 확보	
이나영 (2023)	• 운송 네트워크 혼잡 및 중단 (항만 혼잡 지수) • 자연재해 및 전염병(자연재난 및 감염병 발생여부) • 사회적·정치적 불안(경제 정책 불확실성지수) • 사이버 공격(사이버위협지수)	인프라 및 투자 관련	• 컨테이너 본선 작업 외 공간의 외부 배치 → 항만 하역료 감소 및 생산성 확보 • 내부 ITT 통로를 고려한 항만 개발 → 항만 하역 안정성 확보 • 해외 핵심 거점 항만 개발 및 투자 확대 → 리스크 발생 시 대기 감소 • 항만 사이버 보안 체계 강화
		제도 및 운영 관련	• 공급망 리스크에 따른 추가비용 지원 • 대형 터미널 운영 → 항만 하역료 감소 및 생산성 확보 • 관계기관 협의체 구성

자료: 최석우 외(2019.12.), 김형근 외(2012.12.), 이나영 외(2023)를 기반으로 저자 작성

3. 공급망 리스크 대응 주요 정책

앞의 내용을 종합하여 물류공급망에 영향을 미칠 수 있는 리스크와 대응 정책을 정리하면 다음 <표 3-5>와 같으며, 3가지 대응 정책을 소개하고자 한다.

<표 3-5> 공급망 리스크 및 대응 정책

구분	공급망 리스크	영향	대응 정책
자연재해	- 태풍, 지진, 폭우, 분화 등 - 기후변화	항만 또는 운하 폐쇄/지연	- 해외 핵심 거점 항만 개발 및 투자(LA/LB항, 리예카항 등) - 해상 무역로 다양화(희망봉 우회, 북극항로 등)
전염병 및 재난	- 전염병 - 대형 재난		
사회적·정치적 불안	- 전쟁, 내란, 정치 불안 등 - 항만 사고 - 노동자 파업 - 사이버 공격	해상 무역로 봉쇄	해상 무역로 다양화(희망봉 우회, 북극항로 등)
		운임 및 하역료 등 물류비 상승	대형 터미널 운영 및 대체부두 구축

자료: 저자 작성

1) 해외 거점 항만 개발

태풍, 지진, 폭우, 분화 등 자연재해와 온난화로 인한 기후변화, 코로나 19와 같은 전염병, 대형 재난은 항만, 운하와 같은 물류 자원에 타격을 입혀 폐쇄나 지연 상황을 초래할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 자연재해 및 재난 발생 시 안정적으로 화물을 하역할 수 있는 거점 항만개발이 필요하다.

우리는 코로나19로 인해 대형 물류공급망 재난을 겪은 경험이 있다. 코로나19는 항만 인력 부족을 초래했고 미국 서부 항만이 마비되어 LA/LB항 주변 해역은 수십 척의 선박들이 길게는 수십일씩 대기하였다. 당시 우리나라 선박은 미국의 자국 중심 항만 운영 방식에 밀려 대기시간이 더욱 길

어졌고, 이는 우리나라 무역에 막대한 손해를 입혔다.

2011년부터 2017년까지 현대상선은 미국 LA에 전용 터미널인 CUT (California United Terminal)를 운영했다. 하지만 수익성 개선과 고객서비스 수준을 업그레이드하기 위해 고비용 구조로 운영되고 있던 CUT 터미널의 운영권을 로스앤젤레스 항만당국에 반납하면서 현대상선의 전용 터미널은 없어지게 되었다.⁶⁵⁾ 만약 현대상선이 CUT의 운영권을 포기하지 않았다면, 코로나19 팬데믹 발생 시 현대상선 선박을 우선 접안시킴으로써 물류대란을 완화할 수 있었을 것이다. 또한 치솟았던 해상운임, 하역료도 방어가 가능했을 것이다.

최근 세계 최대 선사 중 하나인 머스크는 크로아티아 서부의 항구도시인 리예카항에 컨테이너 터미널 확장 공사를 추진하고 있다. 이는 동유럽 쪽의 물동량이 계속해서 증가하고 있는 추세이며, 이에 다른 유럽 항만보다 평균 6~7일까지 운송 시간이 줄어드는 리예카항에 투자하고 있다. 이에 따라 아시아발 유럽 동부의 주요 수입 항만이 리예카항으로 변경될 가능성이 높아지고 있으며, 미국 LA/LB항에서 실패한 경험을 바탕으로 우리나라 전용 터미널 확보를 위해 노력해야 한다. 만약 리예카항에 전용 터미널이 없다면 유럽 내 재해 및 재난 발생 시 우리나라 화물선은 기약 없이 대기해야 하는 상황이 발생할 수 있으므로 거점 항만 개발 정책 마련이 절실하다.

2) 해상 무역로 다양화

앞의 서론에서 살펴보았듯이 우리는 지금 러시아-우크라이나 전쟁, 이스라엘-하마스 전쟁, 이스라엘-이란 분쟁 등 전쟁의 시대에 살고 있으며 이로 인해 전 세계 해운의 중심이었던 수에즈 운하가 마비되는 상황이다.

65) Cargo News(검색일: 2024.7.18.)

또한 지구온난화는 극심한 가뭄, 폭우, 폭설 등 재앙을 야기하고 있으며, 특히 극심한 가뭄은 물류에 직접적으로 영향을 미치고 있다. 최근 이상기후로 인해 파나마의 가뭄이 증가하고 있으며, 운하에 물을 공급하는 가톤호수의 적수량이 줄어들어 따라 선박 운항량이 전년 대비 21% 감소한 것으로 분석되었다.⁶⁶⁾

이러한 수에즈 운하 마비 및 파나마 운하 통항량 감소는 물류공급망에 큰 영향을 미치고 있어 전 세계 각국은 공급망의 안정화를 위해 다양한 해상 무역로 확보에 전념하고 있다.

그 중 대표적인 항로로 희망봉 우회가 있다. 최건우(2024.)에 따르면, 수에즈 운하 통항 시 선박의 한 항차 왕복 거리는 22,694해리, 98일이 소요되고, 선박 사용료, 운하 사용료, EU ETS(Emission Trading System) 비용 등을 포함한 총비용은 약 11백만 달러인 것으로 분석하였다. 이에 비해 희망봉 우회 시 수에즈 운하 통과 시와 같은 속도로 운항할 경우 왕복 거리는 30,056해리, 115일로 증가하지만 약 2백만 달러의 수에즈 운하 사용료가 발생하지 않기 때문에 수에즈 운하 통항 시와 비교하였을 때 30만 달러 정도의 차이가 있을 뿐이다. 희망봉 우회 시 선박의 속도를 올려 수에즈 운하 통항 시와 시간을 비슷하게 맞출 수 있다. 하지만 선박 평균 운항 속도를 12.5노트에서 16.7노트로 높여야 해서 연료 사용량이 2배 정도 증가하고 EU ETS 비용 역시 14백만 달러로 증가하게 된다.

하지만 머스크를 비롯한 선사들은 홍해의 불안정성을 해소하기 위해 시간과 비용을 더 지출해야 함에도 희망봉을 우회하고 있으며, 당분간 이러한 흐름이 지속될 것으로 예상된다.

66) Eco Marine(2024.4.2.) (검색일: 2024.4.23.)

〈표 3-6〉 수에즈 운하 통항 및 희망봉 우회 시 비교

구분	수에즈 운하 통항	희망봉 경유(일반)	희망봉 경유(고속)
운항 거리(해리)	22,694	30,056	30,056
운항 시간(일)	98	115	97
평균 속도(노트)	12.5	13.4	16.7
운하 사용료(달러)	1,972,130	-	-
연료비(달러)	4,191,840	5,576,442	8,337,077
EU ETS 비용(달러)	237,031	305,720	498,717
총비용(달러)*	11,282,271	11,591,413	13,687,472

주: * 선박비용, Anti-piracy 비용 등을 포함한 총비용
 자료: 최건우(2024.7.), pp. 2-3.

파나마 운하도 기후변화로 인해 통항량이 급격하게 감소하고 있다. 이에 주요 선사는 미국 동부로 가는 화물을 서쪽으로 보내 희망봉을 우회하는 무역로를 모색하고 있다. SEA-DISTANCES.ORG에 따르면, 부산에서 모빌항까지 파나마 운하를 통과할 경우 9,476해리, 희망봉을 우회할 경우 약 60% 증가하는 15,172해리를 돌아가야 하는 것으로 조사되었다.⁶⁷⁾ 이 경우 해상운임과 운송시간 역시 증가하겠지만, 파나마 운하 사용료와 대기시간, 공급망 리스크 발생에 따른 위험비용 등을 고려한다면 선사에는 좋은 대안이 될 수 있다.

3) 대형 터미널 운영 및 대체 부두 구축

우리나라 항만은 대부분 3개 선석 규모의 소형 터미널을 1개의 회사가 운영하고 있다. 이는 터미널 간 환적(ITT)이 어려워 추가적인 시간과 비용이 발생한다는 문제점이 있고, 특히 화물연대 파업, 태풍으로 인한 선석 붕괴처럼 공급망 리스크 발생 시 공간 활용성 및 유동성이 저하되어 항만생산성에 큰 영향을 주게 된다.

67) SEA-DISTANCES.ORG(검색일: 2024.7.22.)

이에 기존 터미널의 통합 또는 신규 터미널 대형화를 통해 대형 터미널 운영에 큰 효과를 줄 수 있을 것이다. 터미널의 대형화는 컨테이너 세척장, 수리장, 공컨테이너 보관시설 등 공용 시설을 함께 사용함으로써 기존 대비 10~20% 정도의 여유 공간을 추가로 확보할 수 있다. 이는 항만의 하역 능력뿐만 아니라 효율성, 하역비 등에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

또한 대체 부두 역시 공급망 리스크 대응에 효과적이며, 대표 사례로 고베항을 들 수 있다. 고베항은 1980년대까지 세계 4위의 항만이었으며, 동북아 물류 중심지였다. 하지만 1995년 발생한 한신·아와지 대지진으로 인해 고베항의 대부분 항만시설이 무너졌고, 고베항의 환적 화물들은 부산항으로 이전되었다. 당시 부산항으로 물동량 이전은 일시적일 것이라고 예상했으나 물동량은 부산항에 계속 남았고 고베항은 아직까지도 침체기를 지나고 있다.

우리나라 포항, 경주도 지진으로부터 자유롭지 못하며 발생지역 모두 우리나라 제1의 항만인 부산항과 가깝다. 또, 태풍도 항만을 마비시킬 수 있다. 2003년 9월 발생한 태풍 매미는 부산항 안벽 크레인 11기를 전복 및 이탈시켜 사실상 해당 부두 기능이 완전히 마비되었다. 부산 인근에 대형 지진이 발생하거나 허리케인급 태풍이 발생할 경우 부산항이 마비될 것이고 국내 대체 부두가 없다면 우리나라 역시 고베항과 같은 전철을 밟을 가능성이 있다.

최근 미-중 갈등으로 인해 중국은 물류 확보에 심혈을 기울이고 있다. 자국의 화물 수출을 위해 선대를 선점하고 국가적으로 항만을 개발하고 있으며, 부산항 경유 환적 물동량까지도 확보하고 싶어 한다. 만약 부산항에 대형 재난이 발생하고 대체 항만이 없어 중국 물동량이 환적 없이 중국으로 직기향한다면 우리나라는 환적 거점항이라는 지위를 상실할 수도 있다.

본 절에서는 공급망 리스크 종류와 세 가지 정책을 간략히 알아보았다.

다음 절에서는 해당 정책의 효과를 분석하기 위한 모형을 개발하고 4장에서는 세 가지 국가 정책의 효과를 정량적으로 실험하였으며, 기업 차원에서 추진할 수 있는 두 가지 정책의 효과를 함께 분석하였다.

제2절 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 —

1. 개요

1절에서는 물류공급망 리스크를 정의하고 이에 대응하기 위한 세 가지 정책을 조사하였다. 기존 연구는 공급망 리스크가 미치는 영향을 분석하였으며 정책 효과는 분석하지 않았다.

이에 본 연구는 세 가지 정책이 적용되었을 때 물류공급망에 미치는 영향을 분석하기 위한 두 가지 모형을 개발하였다.

먼저, 다양한 공급망 리스크 발생 시 실시간으로 최적의 대안을 제시함으로써 민첩하게 대처할 수 있는 메타휴리스틱 모형을 개발하였다. 동 모형은 안정적인 상황의 물류공급망 대안을 제시하고, 추후 물류공급망 리스크가 발생할 경우 변경된 데이터를 반영하여 최적의 대안을 제시할 수 있는 사후적인 관점의 모형이다.

두 번째, 다양한 공급망 리스크 발생 시 유연한 물류공급망을 유지할 수 있도록 안정적이고 튼튼한 대안을 제시할 수 있는 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 시뮬레이션 모형은 지진, 태풍, 전쟁, 사고 등 공급망 리스크를 동시에 고려하여 안정적인 대안을 제시할 수 있는 사전적 관점의 모형이다.

2. 휴리스틱 모형 설계 및 개발

1) 혼합정수계획법 개발

본 연구에서는 혼합정수계획법 개발을 위해 이성우 외(2023)의 연구⁶⁸⁾를 기반으로 수리모형을 설계하였다. 본 연구는 보다 현실적인 물류공급망 설계를 위해 시간 제약, 용량 제약 등을 포함하였다.

먼저 시간 제약은 [식 3-12]이며, 부품 생산자 j 에서 판매처 p 까지의 운송시간 PTT_{jp} 와 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 까지의 운송시간 MTT_{ij} 의 합이 각 발주량별 납품기한 TW_{pqt} 를 넘지 못하게 한다. 이는 수에즈 운하 마비, 파나마 운하 지연 등의 공급망 리스크가 발생했을 경우 납품기한이 한없이 지연되는 것을 방지하며, 이에 따라 다른 대안을 찾을 수 있도록 하는 제약식이다.

다음으로 용량 제약은 [식 3-13]과 [식 3-14]이다. [식 3-13]은 t 기간 부품 생산자 j 에서 판매처 p 로 부품 q 의 공급량 M_{jpqt} 가 부품 생산자 j 에서 판매처 p 까지 1기간 당 운송가능 부품량 PTL_{jp} 를 넘지 못하게 하는 식으로, 다시 말해 부품 생산자로부터 판매처까지 운송 가능 용량을 제한한다. [식 3-14]는 t 기간 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 로 부품 q 의 원료 공급량 S_{ijqt} 가 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 까지 1기간 당 운송가능 원료량 MTL_{ij} 를 넘지 못하게 하는 식으로, 원료공급자로부터 부품 생산자까지 운송 가능 용량을 제한한다. 두 가지 용량 제약식은 수에즈 운하 마비, 항만 파업 등으로 인해 원료공급자, 부품 생산자, 판매처 간 운송 가용량이 변화했을 때 이를 넘지 못하게 하고 다른 대안을 찾을 수 있도록 하는 제약식이다.

68) 이성우 외 (2023), pp. 109-111.

본 연구는 물류 중심 공급망에만 초점을 맞추고 있다. 따라서 목적함수도 기존 연구와는 달리 생산비, 생산준비비 등 생산 관점의 비용은 제외하고, 재고유지비용(MIC_{jq}, PIC_{pq}), 운송비용(PT_{jp}, MT_{ij}), 발주비용(OR_{pq}), 납품비용(SC_{iq}) 등 물류 부문 비용만을 고려하였다.

[기호(첨자)]

i : 원료 공급자의 수 ($i = 1, 2, \dots, I$)
 j : 생산자의 수 ($j = 1, 2, \dots, J$)
 p : 판매처의 수 ($p = 1, 2, \dots, P$)
 q : 제품의 수 ($q = 1, 2, \dots, Q$)
 t : 기간의 수 ($t = 1, 2, \dots, T$)

[파라미터]

PD_{pqt} : 판매처 p 에서 부품 q 에 대한 기간 t 에서의 발주량
 OR_{pq} : 판매처 p 에서 부품 q 에 대한 발주비용
 PIC_{pq} : 판매처 p 에서 부품 q 의 단위당 재고유지비용
 MIC_{jq} : 부품 생산자 j 에서 부품 q 의 단위당 재고유지비용
 SC_{iq} : 원료공급자 i 에서 부품 q 의 원료 납품비용
 PT_{jp} : 부품 생산자 j 에서 판매처 p 까지 운송비용
 MT_{ij} : 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 까지 운송비용
 TW_{pqt} : 판매처 p 에서 부품 q 에 대한 기간 t 에서의 발주량의 납품기한
 DC_{pq} : 판매처 p 에서 부품 q 의 기간당, 단위당 지연비용
 PTT_{jp} : 부품 생산자 j 에서 판매처 p 까지 운송시간
 MTT_{ij} : 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 까지 운송시간
 PTL_{jp} : 부품 생산자 j 에서 판매처 p 까지 1기간당 운송가능 부품량
 MTL_{ij} : 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 까지 1기간당 운송가능 원료량

[변수]

Q_{pqt} : t 기간 판매처 p 에서 부품 q 의 발주량
 N_{jqt} : t 기간 부품 생산자 j 에서 부품 q 의 생산량
 M_{jpqt} : t 기간 부품 생산자 j 에서 판매처 p 로 부품 q 의 공급량
 I_{jqt} : t 기간 부품 생산자 j 에서 부품 q 의 재고량
 R_{pqt} : t 기간 판매처 p 에서 부품 q 의 재고량
 S_{ijqt} : t 기간 원료공급자 i 에서 부품 생산자 j 로 부품 q 의 원료 공급량
 O_{pqt} : t 기간 판매처 p 에서 제품 q 를 발주하면 1, 그렇지 않으면 0
 W_{jqt} : t 기간 부품 생산자 j 에서 부품 q 가 생산되면 1, 그렇지 않으면 0
 Y_{jpqt} : t 기간 판매처 p 의 부품 q 를 부품 생산자 j 가 생산하면 1, 그렇지 않으면 0
 X_{ijqt} : t 기간 부품 생산자 j 의 부품 q 의 원료를 원료공급자 i 가 납품하면 1, 그렇지 않으면 0

[목적함수]

$$\begin{aligned}
 Min \quad TC = & \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T MIC_{jq} \cdot I_{jqt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T PT_{jpq} \cdot M_{jpqt} \quad [\text{식 3-1}] \\
 & + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T PIC_{pq} \cdot R_{pqt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T MT_{ij} \cdot S_{ijqt} \\
 & + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T OR_{pq} \cdot O_{pqt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T SC_{iq} \cdot S_{ijqt}
 \end{aligned}$$

[제약식]

$$Q_{pqt} - R_{pqt} + R_{pq,t-1} = PD_{pqt} \quad \text{for all } p, q, t \quad [\text{식 3-2}]$$

$$\sum_{j=1}^J M_{jpqt} - Q_{pqt} = 0 \quad \text{for all } p, q, t \quad [\text{식 3-3}]$$

$$\sum_{p=1}^P M_{jpqt} + I_{jqt} - I_{jq,t-1} - N_{jqt} = 0 \quad \text{for all } j, q, t \quad [\text{식 3-4}]$$

$$\sum_{i=1}^I S_{ijqt} - N_{jqt} = 0 \quad \text{for all } j, q, t \quad [\text{식 3-5}]$$

$$N_{jqt} - M \cdot N_{jq,t-1} - M \cdot W_{jqt} \leq 0 \quad \text{for all } j, q, t \quad [\text{식 3-6}]$$

$$Q_{pqt} - M \cdot O_{pqt} \leq 0 \quad \text{for all } p, q, t \quad [\text{식 3-7}]$$

$$W_{jqt}, O_{pqt} = \{0,1\} \quad \text{for all } j, p, q, t \quad [\text{식 3-8}]$$

$$M_{jprt} - M \cdot Y_{jprt} \leq 0 \quad \text{for all } j, p, q, t \quad [\text{식 3-9}]$$

$$S_{ijqt} - M \cdot X_{ijqt} \leq 0 \quad \text{for all } i, j, q, t \quad [\text{식 3-10}]$$

$$M_{jprt}, I_{iqt}, N_{jqt}, S_{ijqt}, Q_{pqt}, R_{pqt} \geq 0 \quad \text{for all } i, j, p, q, t \quad [\text{식 3-11}]$$

$$O_{pqt} \cdot PTT_{jp} + W_{jqt} \cdot MTT_{ij} \leq TW_{pqt} \quad \text{for all } i, j, p, q, t \quad [\text{식 3-12}]$$

$$M_{jprt} \leq PTL_{jp} \quad \text{for all } j, p, q, t \quad [\text{식 3-13}]$$

$$S_{ijqt} \leq MTL_{ij} \quad \text{for all } i, j, q, t \quad [\text{식 3-14}]$$

$$M \text{은 아주 큰 수, } R_{pq,0} = 0, I_{jq,0} = 0$$

시간, 용량 제약 등 해당 식이 추가됨에 따라 본 연구의 모형은 보다 현실적인 문제를 풀 수 있도록 개발하였으며, 이에 따라 운하의 통과 가용량, 발주처의 JIT(Just-In-Time)에 맞는 부품 납부 계획수립 등이 가능해졌다. 특히 수에즈 운하, 파나마 운하 등 주요 해상 거점을 통항하는 물류 서비스 지원 정책, 글로벌 주요 거점 구축 시의 효과와 다양한 글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과를 함께 분석할 수 있도록 개발하였다.

2) 유전알고리즘 기반 휴리스틱 모형 개발

본 연구는 혼합정수계획법 개발을 위해 이성우 외(2023)의 연구⁶⁹⁾에서 개발한 유전알고리즘 모형을 개선하였다. 기본적인 염색체 구성은 다음 <표 3-7>과 같이 기존 연구와 동일하다. 판매처, 부품, 기간별로 발주여부를 0과 1 이진수로 표현하고, 어느 부품 생산자가 생산하고 어느 원료공급자로부터 원료를 공급받을 것인지 부품 생산자와 원료공급자 번호로 결정한다.

유전 연산자 역시 동일하다. 교차 연산자는 1-point 교차 연산자를 적용하였으며, 돌연변이 연산자를 적용하였다. 또한 좋은 개체를 생성하기 위한 씨종자 선택 방법과 좋은 개체의 보존을 위한 엘리티즘을 적용하였다.

<표 3-7> 본 연구의 염색체(chromosome) 표현

구분	판매처 1										판매처 2									
	부품 1					부품 2					부품 1					부품 2				
기간	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
발주여부	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
부품 생산자	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1
발주여부	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0
원료 공급자	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1

자료: 박병주·최형림·강무홍(2008), p.5를 기반으로 저자 작성

다만 앞의 혼합정수계획법에서 설계했듯이 수정된 목적함수와 추가한 제약식을 유전알고리즘에 반영하였다. 특히 제약식은 다음 [식 3-15]와 같이 혼합정수계획법과 달리 직접 식을 적용하지 않고, 제약식을 만족하지 못하면 큰 수인 Big M을 목적식에 더함으로써 해당 해가 선택되지 않고 자연

69) 이성우 외 (2023), pp. 109-111.

적으로 도태되도록 하였다.

유전알고리즘을 비롯한 대부분의 메타휴리스틱 모형의 경우 해를 생성할 때마다 해가 정확한지 분석해야 할 경우 수정(Repair)하는 과정을 거쳐야 한다. 하지만 이는 시간이 많이 소요되고 해를 찾지 못할 수 있기 때문에 본 연구처럼 제약에 만족하지 않을 경우 목적함수 값을 크게 함으로써 선택이 되지 않도록 하는 방법을 많이 사용하고 있다. 이는 성능 면에서도 혼합정수계획법과 같은 값을 탐색하였고 속도 면에서도 월등한 성능을 나타냈다.

$$\begin{aligned}
 Min \ TC = & \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T MIC_{jq} \cdot I_{jqt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T PT_{jpq} \cdot M_{jpqt} \quad [식 3-15] \\
 & + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T PIC_{pq} \cdot R_{pqt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T MT_{ij} \cdot S_{ijqt} \\
 & + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T OR_{pq} \cdot O_{pqt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T SC_{iq} \cdot S_{ijqt} \\
 & + M \text{ (if } O_{pqt} \cdot PTT_{jp} + W_{jqt} \cdot MTT_{ij} \leq TW_{pqt} \text{)} \\
 & + M \text{ (if } M_{jpqt} \leq PTL_{jp} \text{)} \\
 & + M \text{ (if } S_{ijqt} \leq MTL_{ij} \text{)}
 \end{aligned}$$

3) 메타휴리스틱 모형 성능 검증

본 연구에서는 휴리스틱 모형의 성능 검증을 위해 다양한 크기 문제에 혼합정수계획법의 결과와 비교 실험을 진행하였다. 혼합정수계획법은 ILOG CPLEX를 통해 최적해를 탐색했으며, 휴리스틱은 Java를 기반으로 프로그래밍해 최적해 또는 최선해를 탐색하였다.

실험 문제 대상의 크기는 판매처, 부품, 부품 생산자, 원료 공급자, 기간이 각각 1, 2, 4, 6, 3인 작은 크기 문제부터 큰 문제까지 비교하였으며,

결과는 <표 3-8>과 같다.

<표 3-8> MIP 최적해 및 휴리스틱 최선해 최적성 비교

문제	문제 크기					MIP		GA		최적성 (%)
	판매처	부품	부품 생산자	원료 공급자	기간	최적해	시간(초)	최선해	시간(초)	
1	1	2	4	6	3	72,488	0.23	72,488	2.69	100.0
2	2	2	4	6	10	469,650	0.39	469,650	11.95	100.0
3	5	5	5	10	10	2,956,781	14,400*	2,970,919	35.01	100.5
4	5	5	5	10	30	8,864,091	14,400*	8,984,762	63.41	101.4

주: 문제 크기가 커짐에 따라 연산 시간이 기하급수적으로 증가하여 4시간만 탐색

자료: 저자 작성

<표 3-8>에서 볼 수 있듯 혼합정수계획법은 최적해를 찾을 수 있었다. 하지만 혼합정수계획법은 문제 크기가 커지면 연산 시간이 기하급수적으로 증가한다는 한계가 있다. 이에 문제 번호 3과 4는 1일 이상 실험하여도 최적해를 찾을 수 없어 4시간만 연산한 후 도출된 값을 최적해로 가정하였다.

이에 비해 휴리스틱 알고리즘은 수 초, 수 분 내에 모든 문제를 풀 수 있었다. 휴리스틱 알고리즘은 혼합정수계획법과는 달리 국지적인 탐색을 통해 최적해를 찾아가기 때문에 상대적으로 좋은 해를 적은 시간 내에 찾을 수 있었다. 그 결과 문제 1, 2와 같이 작은 문제에서는 최적해를 탐색할 수 있었으나 문제 3, 4와 같이 큰 문제에서는 최적성이 조금씩 떨어지는 경향을 보였다. 이는 대부분의 휴리스틱 방법론이 특정 해로 수렴하기 때문이며, 이러한 문제를 해결하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 문제 4와 같이 큰 문제도 적합도 1% 전후의 해를 1분 만에 탐색할 수 있었기 때문에 본 연구에서 개발한 알고리즘이 가치 있다고 판단한다. 따라서 탐색 시간과 최적성, 문제 크기 등 의사결정 환경에 맞게 두 가지 모형을 병행하여 사용할 수 있다.

3. 시뮬레이션 모형 설계 및 개발

다음으로 시뮬레이션 모형에서는 공급망 리스크가 발생해도 크게 영향받지 않는 강건한(Robust) 물류공급망을 사전 탐색할 수 있는 모형을 개발하고 관련 실험을 수행하였다. 휴리스틱은 데이터를 기반으로 정확하고 합리적인 결과를, 시뮬레이션은 불확실한 미래를 예측하여 창의적인 결과를 도출하는 데 목적이 있다.

〈그림 3-12〉 현실과 시뮬레이션 모델의 세계



자료: 박세훈, 이현호 (2019), p. 11.

먼저, 시뮬레이션은 앞의 〈그림 3-12〉와 같이 실제 대상의 거동을 흉내내기 위한 방법과 적용을 광범위하게 가리키는 개념이며, 일반적으로 적절한 소프트웨어를 가진 컴퓨터를 이용하여 수행한다.

시뮬레이션 모형은 범용 프로그래밍 언어로 프로그램되기도 하지만, 시뮬레이션 전용 소프트웨어로 프로그램되는 것이 일반적이다. 시스템의 모

형화를 위해 많이 사용하는 상용 시뮬레이션 소프트웨어로는 Arena, AutoMod, Plant Simulation, AnyLogic 등이 있다. 각 소프트웨어는 고유한 특성을 가지기 때문에 적용할 분야가 무엇인지, 모형의 변경과 확장이 얼마나 자주 발생하는지에 따라서 적절한 소프트웨어를 선택해야 한다.

시뮬레이션의 대표적인 장점은 실제 물리적인 시스템을 구축하지 않고도 비교적 정확한 예측과 평가를 할 수 있다는 것이다. 또한 실험을 위한 환경의 조절이 쉬우므로 다양한 변화 요인을 고려한 반복적인 실험이 가능하다. 시뮬레이션의 실행 시간은 실제 운영 시간과 다르므로 오랜 시간이 걸리는 시스템을 짧은 시간에 실행할 수도 있고, 아주 짧은 순간의 시스템 변화를 천천히 살펴볼 수도 있다.

그러나 시뮬레이션은 <표 3-9>와 같은 체계적인 과정을 거쳐야 하고, 프로그램 작성이 다소 어려워 개발에 많은 시간과 비용을 요구한다. 또한 시뮬레이션 결과와 관련하여 신뢰성이 부족할 경우 부적절한 의사결정을 이끌 수도 있다. 특히, 시뮬레이션 과정에서 모델을 검증하고 타당성을 검토하는 5, 6단계는 시뮬레이션의 품질을 좌우하게 되는 중요한 역할을 담당하지만 간과되기 쉬우므로 주의를 기울여야 한다.

<표 3-9> 시뮬레이션의 과정

단계	내용	단계	내용
1	문제의 정의	6	타당성 검토
2	모델 설계	7	실험계획 수립
3	자료 수집	8	실험
4	모델 변환	9	결과 분석
5	검증	10	구현과 문서화

자료: 저자 작성

시뮬레이션 모델링은 이산 사건(discrete event), 에이전트 기반(agent based), 시스템 다이내믹스(system dynamics)를 사용한다. 각 방법은 특

정 범위의 추상화 수준을 제공하는데, 시스템 다이내믹스는 매우 높은 추상화를 가정하며 일반적으로 전략적 모델링에 사용한다. 이산 사건 모델링은 중간 또는 중간보다 낮은 추상화를 지원한다. 에이전트 기반 모델은 에이전트가 실제 개체를 나타내는 매우 상세한 모델부터 에이전트가 경쟁 회사 또는 정부를 대표하는 매우 추상적인 모델까지 다양하다.

〈그림 3-13〉 시뮬레이션 모델링 방법 비교



자료: 박세훈, 이현호(2019), p. 18.

공급망 관리에서 시뮬레이션을 다양하게 활용할 수 있다. 시뮬레이션은 가장 적절한 공급망 계획으로 최적화를 이룬 후, 위험과 손실을 피하면서 계획을 구현하는 방법을 찾는 데 도움이 된다. 최적의 공급망 구조가 결정된 후에는 이를 가장 안전하게 구현할 수 있는 방법을 찾아야 한다. 이를 위해 새로운 공급망 네트워크가 현실 세계에서 어떻게 작동할지, 즉 시간이 지남에 따라 무작위성과 변동성 조건에서 어떻게 작동할지 확인하는 것이 중요하다. 시뮬레이션 모델링은 상세한 분석을 수행하고 구현 전에 가능성을 예측하는 데 도움이 된다. 시뮬레이션 모형에서 고려할 수 있는 공급망 회복력 강화 요인은 다음의 〈표 3-10〉과 같다.

〈표 3-10〉 공급망의 회복력 강화에 필요한 요인

역량 요소	정의	하위 요소
소싱의 유연성	입력이나 입력 수신 방식을 신속하게 변경할 수 있는 능력	부품 공통성, 모듈형 제품 설계, 다중 용도, 공급업체 계약 유연성, 다중 소스
주문 이행의 유연성	출력이나 출력 제공 방식을 신속하게 변경할 수 있는 능력	대체 유통 채널, 위험 분산/공유, 다중 소싱, 지연된 커밋, 생산 연기, 재고 관리, 요구 사항 재조정
용량	지속 가능한 생산 수준을 가능하게 하는 자산의 가용성	예비 용량, 중복성, 백업 에너지원
효율성	최소한의 자원 낭비로 출력을 생산할 수 있는 능력	폐기물 제거, 노동 생산성, 자산 활용, 제품 재설계, 비용 관리, 프로세스 표준화, 재고 감소
가시성	운영 상태와 외부 환경에 대한 지식과 인식	기술, 제품, 자산 및 사람의 가시성, 정보 교환, 보안 및 경고 시스템
적응력	내부 또는 외부 변화에 대응하여 운영을 수정할 수 있는 능력	제품 다양화, 프로세스 및 제품 재설계, 린 제조, 유연한 전략적 제휴, 수직적 통합, 인력 적응
예측력	요구 사항 또는 기대 변화 예측 능력	장기 계획, 리드 타임 단축, 린 생산 및 소싱, 예측, 시나리오 계획, 경영진의 의지, 비즈니스 연속성 계획, 중복 자산 또는 인프라
회복력	혼란 후 안정된 상태로 돌아갈 수 있는 능력	위기 관리, 사후 재건, 비즈니스 연속성, 보험, 기회 재배치
분산성	위험 노출을 줄이기 위한 자산의 넓은 분포	다지역 생산, 지리적 분산, 분권화된 운영
협력성	외부 파트너와 효과적으로 협력할 수 있는 능력	수요 예측, 공급업체와의 파트너십, 제품 수명 주기 관리, 정보 공유, 물류 관리, 아웃소싱
조직화	시스템이 시장 요구 사항에 맞게 구성될 수 있는 능력	프로세스 표준화, 수요와 공급의 조정, 브랜드 관리, 기능 간 팀, 인력 개발, 고객 중심
시장 위치	프리미엄 또는 틈새 시장 등 특정 시장에서의 지위	고객 관계 관리, 고객 세분화, 브랜드 충성도, 브랜드 인지도, 고객 서비스
보안성	잠재적 위험과 위협으로부터의 보호	사이버 보안, 부정 행위 방지, 물리적 자산 보안, 위기 관리
재무적 강점	현금 흐름 변동에 대한 흡수 능력	보험, 포트폴리오 다각화, 금융 준비금 및 유동성, 가격 마진

자료: Pettit, Fiksel, and Croxton(2010), p. 12.

1) 모형 설계

모형은 시장, 판매처, 부품생산자, 원료공급자로 구성되고, 판매처에는 물류센터 기능이 포함된다. 판매처, 부품생산자, 원료공급자는 다수를 허용한다. 판매처와 부품생산자, 부품생산자와 원료공급자 간에는 운송이 필요하고 시장과 판매처 간의 운송은 고려하지 않는다. 운송경로도 다수를 허용한다.

공급망 내 구성원 간의 의사소통은 순차적으로만 발생한다. 즉, 시장과 판매처, 판매처와 부품생산자, 부품생산자와 원료공급자 간에만 의사소통이 이루어진다.

수요와 리스크 상황은 특정 시점에 개체(entity)로 생성되어 후속 사건들을 유발한다. 시장 수요는 재고 확인을 통해 필요한 경우 주문과 재고 보충을, 리스크 상황은 공급망 내 시설과 운송의 가용성에 변화를 발생시킨다.

판매처와 부품생산자는 유한한 재고를 보유하고 원료공급자는 무한한 재고를 보유한다. 판매처와 부품생산자는 (s, S) 재고 정책을 사용한다. (s, S) 재고 정책은 재고 조사 시점의 재고 수준(I)이 주문점(s) 이하일 때, $(S - I)$ 만큼을 주문하는 방식이다.

시장과 판매처는 리스크 상황을 고려하지 않는다. 리스크 상황은 부품생산자, 원료공급자의 시설 가용성, 그리고 판매처와 부품생산자, 부품생산자와 원료공급자 간의 운송 가용성에 영향을 미친다.

시뮬레이션 모형에는 초기에 입력되어 실행 중에 변화하지 않고 계속해서 적용되는 값, 분포 등이 있다. 시뮬레이션 모형의 입력 항목은 다음과 같다.

〈표 3-11〉 시뮬레이션 모형의 입력 항목

명칭	의미	추가 설명
DEMAND_INTERVAL	수요 발생 평균 간격	• 지수분포로 가정
DEMAND_SIZE	수요 크기별 발생 확률	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정 • 경험 이산분포로 가정
DUE_DATE_PERIOD	요구 납품 기간 발생 확률	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정 • 요구 납품 기간의 하한과 상한을 가지는 균등분포로 가정
TRANSPORT_TIME_MFj_TO_DCi	부품생산자 j에서 판매처 i로의 운송 시간	• 운송 시간의 하한과 상한을 가지는 균등분포로 가정
TRANSPORT_TIME_SPk_TO_MFj	원료공급자 k에서 부품생산자 j로의 운송 시간	• 운송 시간의 하한과 상한을 가지는 균등분포로 가정
RunPeriod	실행 기간	• 일 단위
LittleS_DCi	판매처 i에 대한 (s, S) 재고 정책의 s 값	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
LittleS_MFj	부품생산자 j에 대한 (s, S) 재고 정책의 s 값	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
BigS_DCi	판매처 i에 대한 (s, S) 재고 정책의 S 값	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
BigS_MFj	부품생산자 j에 대한 (s, S) 재고 정책의 S 값	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
UnitHoldingCost_DCi	판매처 i의 단위 재고유지비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
UnitHoldingCost_MFj	부품생산자 j의 단위 재고유지비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
UnitShortageCost_DCi	판매처 i의 단위 품절비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
UnitShortageCost_MFj	부품생산자 j의 단위 품절비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
UnitTransportCost_MFj_To_DCi	부품생산자 j에서 판매처 i로의 단위 운송비	• 경로 개수에 따른 배열 크기 설정
UnitTransportCost_SPk_To_MFj	원료공급자 k에서 부품생산자 j로의 단위 운송비	• 경로 개수에 따른 배열 크기 설정
OrderFixedCost_DCi_T	판매처 i에서 부품생산자 j로의	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기

명칭	의미	추가 설명
o_MFj	주문 고정비	설정
OrderFixedCost_MFj_To_SPk	부품생산자 j에서 원료공급자 k로의 주문 고정비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
OrderVariableCost_DCi_To_MFj	판매처 i에서 부품생산자 j로의 주문 변동비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
OrderVariableCost_MFj_To_SPk	부품생산자 j에서 원료공급자 k로의 주문 변동비	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정

자료: 저자 작성

시뮬레이션이 진행되는 중에는 개별 개체 속성, 시스템 전체 상태가 계속해서 변화한다. 이러한 변화는 개체 속성과 상태 변수를 사용하여 계속해서 저장하고 갱신해야 한다. 시뮬레이션 모형의 개체 속성 및 상태 변수 항목은 다음과 같다.

〈표 3-12〉 시뮬레이션 모형의 개체 속성 항목

명칭	의미	추가 설명
partType	부품 유형	없음
dueDate	수요의 요구 납품 기한	없음
demandQuantity	수요의 크기	없음
orderQuantity_DC2MF	판매처에서 부품생산자로의 주문량	없음
orderQuantity_MF2SP	부품생산자에서 원료공급자로의 주문량	없음
current_DC	고려 중인 판매처	임시 저장
current_MF	고려 중인 부품생산자	임시 저장
current_SP	고려 중인 원료공급자	임시 저장
current_Route	고려 중인 경로	임시 저장
transportTime	운송 시간	임시 저장

자료: 저자 작성

〈표 3-13〉 시뮬레이션 모형의 상태 변수 항목

명칭	의미	추가 설명
InventoryLevel_D Ci	판매처 i의 재고 수준	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
InventoryLevel_ MFj	부품생산자 j의 재고 수준	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
Ongoing_DC2MF	판매처에서 부품생산자로의 주문이 진행 중이면 1, 아니면 0	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
Ongoing_MF2SP	부품생산자에서 원료공급자로의 주 문이 진행 중이면 1, 아니면 0	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
Available_MF	부품생산자가 사용 가능하면 1, 아니 면 0	• 부품생산자 개수에 따른 배열 크기 설정
Available_SP	원료공급자가 사용 가능하면 1, 아니 면 0	• 원료공급자 개수에 따른 배열 크기 설정
Available_MFj_To _DCi	부품생산자 j에서 판매처 i로의 운송 이 가능하면 1, 아니면 0	• 경로 개수에 따른 배열 크기 설정
Available_SPk_To _MFj	원료공급자 k에서 부품생산자 j로의 운송이 가능하면 1, 아니면 0	• 경로 개수에 따른 배열 크기 설정
LeadTimeLog	조달기간 기록	• 부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정 • (입고 시점) - (주문 시점)

자료: 저자 작성

시뮬레이션 실행이 완료되면 통계량이 출력된다. 시뮬레이션 모형의 출력 항목은 아래의 표와 같다.

〈표 3-14〉 시뮬레이션 모형의 출력 항목

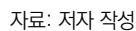
명칭	의미	추가 설명
HoldingCost_DC	판매처 총재고유지비	$\Sigma\{(\text{판매처 단위 재고유지비}) \times (\text{판매처 재고 수준})\}$
HoldingCost_MF	부품생산자 총재고유지비	$\Sigma\{(\text{부품생산자 단위 재고유지비}) \times (\text{부품생산자 재고 수준})\}$
ShortageCost_DC	판매처 총품절비	$\Sigma\{(\text{판매처 단위 품절비}) \times (\text{음의 판매처 재고 수준})\}$
ShortageCost_MF	부품생산자 총품절비	$\Sigma\{(\text{부품생산자 단위 품절비}) \times (\text{음의 부품생산자 재고 수준})\}$
TotTransportCost	총운송비	$\Sigma\{(\text{단위 운송비}) \times (\text{운송량})\}$
TotOrderingCost	총주문비	$\Sigma\{(\text{주문 고정비}) + (\text{주문 변동비}) \times (\text{주문량})\}$
TotCost	총비용	총주문비 + 총운송비 + $\Sigma(\text{재고유지비}) + \Sigma(\text{품절비})$
OrderedQuantity_DC <i>i</i>	판매처 <i>i</i> 에서 부품생산자 <i>로</i> 의 총주문량	부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
OrderedQuantity_MF <i>j</i>	부품생산자 <i>j</i> 에서 원료공급자 <i>로</i> 의 총주문량	부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
ReceivedQuantity_DC <i>i</i>	부품생산자에서 판매처 <i>i</i> <i>로</i> 의 총입고량	부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
ReceivedQuantity_MF <i>j</i>	원료공급자에서 부품생산자 <i>j</i> <i>로</i> 의 총입고량	부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
SuppliedQuantity	부품의 총공급량	부품 유형 개수에 따른 배열 크기 설정
OnTimeQuantity	부품의 정시 납품 비율 (%)	$\frac{\text{주문한 부품 중 정시 납품된 부품의 수량}}{\text{주문한 부품의 수량}} \times 100$

자료: 저자 작성

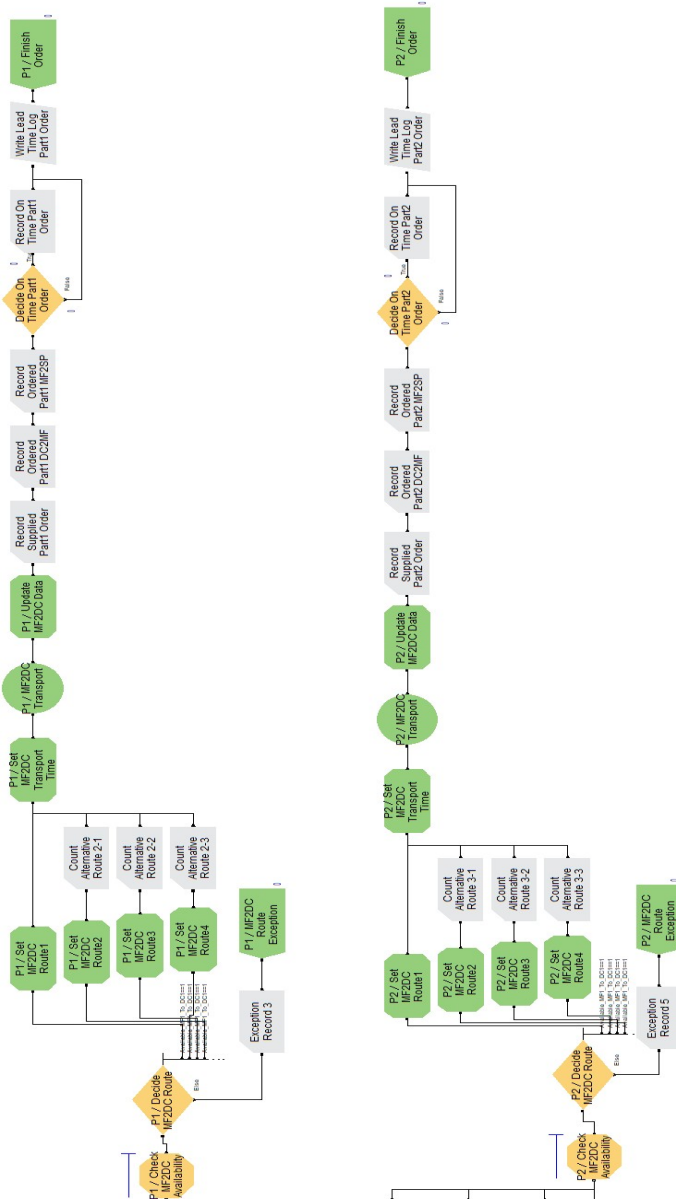
2) 모형 개발

모형 개발에는 이산 사건 시뮬레이션 모델링을 적용하였고, 개발 도구로는 Arena 16.1을 사용하였다. 모형은 공급망 운영 모듈, 리스크 모듈, 시각화 모듈로 구성된다. 공급망 운영 모듈에서는 시장 수요가 특정 시점에 개체로 생성되고 재고 확인을 통해 필요한 경우 주문과 재고 보충을 발생시킨다. 리스크 모듈은 리스크 상황이 특정 시점에 개체로 생성되어 공급

〈그림 3-14〉 공급망 운영 모듈 I

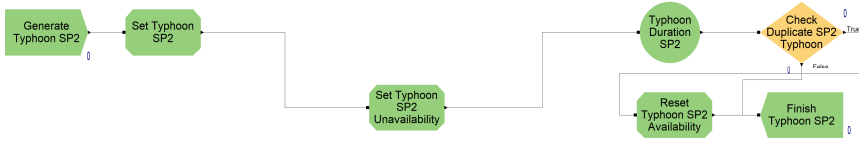


〈그림 3-15〉 공급망 운영 모듈 II



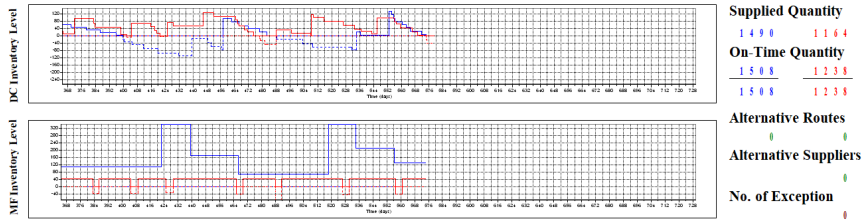
자료: 저자 작성

〈그림 3-16〉 리스크 모듈 (호찌민 원료공급자에 대한 태풍 리스크)



자료: 저자 작성

〈그림 3-17〉 시각화 모듈



자료: 저자 작성

제3절 공급망 리스크 시나리오 설정 및 실험

본 절에서는 2절에서 개발한 두 가지 모형 검증을 위한 실험 시나리오를 설정하고 실험을 수행하였으며 4장에서 국가 정책별, 기업 정책별 효과를 비교·분석할 수 있도록 하였다.

1. 휴리스틱 모형 검증을 위한 시나리오 설정 및 실험

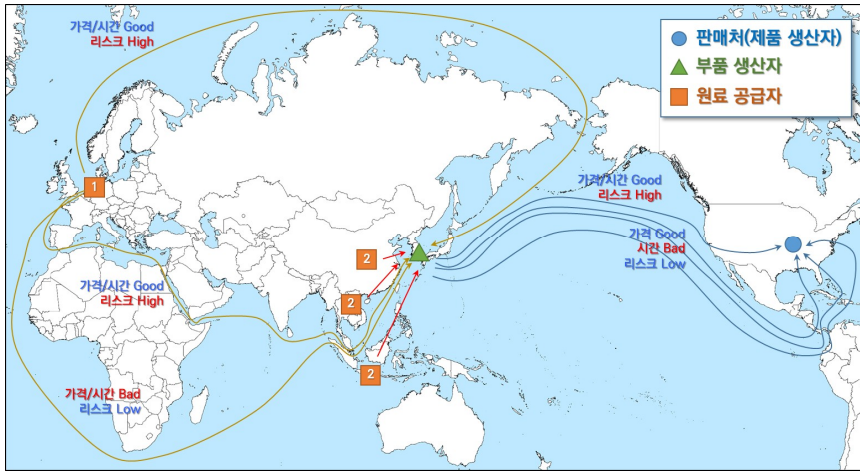
1) 실험 시나리오

본 연구에서 개발한 모형의 검증을 위해 시나리오를 설정하였다. 본 연구에서 설정한 시나리오는 다음 그림과 같이 유럽에서 부품 1의 원료(음극재)를 중국, 베트남, 싱가포르를 통해 부품 2의 원료(양극재)를 수입하여 우리나라에서 생산한 후, 미국 동부 몽고메리(Montgomery)에 있는 이차전지 생산자(판매처)에 부품 1과 2를 운송하는 물류공급망을 문제로 정의하였다. 부품 1의 원료는 하나의 공급처에서 납품하고 있으나 수에즈 운하를 통과하거나 멀리 아프리카 희망봉을 돌아서 운송할 수 있고, 때에 따라서는 북극항로를 통해 운송할 수 있는 세 가지 대안의 경로가 있기 때문에 경로 선택이 필요하다. 부품 2의 원료는 중국 상하이, 베트남 호찌민, 싱가포르 등에서 납품할 수 있기 때문에 원료 공급자를 선정하는 문제이다. 마지막으로 생산한 제품을 동부로 운송하는데 배송지는 한 곳이지만 LA/LB항을 거쳐 트럭으로 운송하는 경로와 파나마 운하를 통과하여 모빌항, 서배너항, NY/NJ항을 거쳐 운송하는 경로 선정 문제가 있다.

본 연구는 경로(아크) 및 부품생산자/원료공급자(노드) 탐색을 통해 가장 효율적인 물류공급망을 구성하는 것이 목적이다. 다만 운송 구간은 가격,

시간, 리스크별로 경로가 변경될 수 있으며, 공급망 리스크 발생 시 이러한 변수값들이 변화하고 물류공급망 또한 변동될 수 있다. 본 연구는 이러한 상황을 시나리오로 설정하였고, 여러 실험을 통해 안정적인 물류공급망을 탐색하였다.

〈그림 3-18〉 문제 정의



자료: 저자 작성

본 연구는 다양한 경로 선정과 거점을 동시에 선정하는 통합 계획수립 문제로 문제가 커질수록 연산시간이 기하급수적으로 증가하는 NP-Hard 문제이다. 따라서, NP-Hard 문제를 해결할 수 있도록 메타휴리스틱 모형을 개발하였으며 이를 바탕으로 실험을 진행하고자 한다.

특히 최근 발생하고 있는 미국 IRA 발동 등의 상황을 반영하여 실험 데이터를 변경하고 물류공급망의 변화를 탐색하였다.

먼저 일반적인 상황의 실험 데이터를 정의하였다. 모든 운송 및 생산, 보관 등의 기준은 1 팔레트로 하였으며, 40피트 컨테이너 1개에는 20개의 T11 규격⁷⁰⁾의 팔레트가 들어갈 수 있고, 1 팔레트에는 1톤의 화물이 적재

될 수 있어 200kWh⁷¹⁾에 해당하는 원료 또는 부품이 적재될 수 있다고 가정하였다.

〈표 3-15〉 팔레트 기준 화물 무게 및 개수 가정

컨테이너	팔레트	화물 무게	화물 개수(개/kWh)
2TEU(40피트)	20PLT	20톤	4,000개

자료: 저자 작성

다음은 기간별로 판매처에서 필요한 부품량과 각 주문별 납품기한을 정의하였다. 〈표 3-16〉을 해석하면 미 동부에서 필요한 부품 1은 1주 차에 20개의 팔레트가 필요하고 2주 차에는 15 팔레트, 3주 차에는 23 팔레트가 필요하며 모두 15주 이내에 도착해야 한다. 부품 2도 부품 1과 마찬가지로 1주 차 22 팔레트, 2주 차 13 팔레트, 3주 차 20 팔레트가 필요하고 납품기한 또한 15주 이내로 같다.

〈표 3-16〉 판매처별/기간별 부품 주문량(PD_{pqt}) 및 납품기한(TW_{pqt})

단위: 팔레트, 기간(주)

판매처	부품	기간(PR)별 주문량			주문별 납품기한		
		1	2	3	1	2	3
미 동부	부품 1	20	15	23	14	15	14
	부품 2	22	13	20	6	7	8

자료: 저자 작성

다음 표는 판매처별로 발주 시 발생하는 비용이며 부품별 발주비용과 기간 당 보관비용을 포함하고 있다. 발주비용은 1회 발주 시 50개 부품량(50kWh)의 가격이 발생한다고 가정하였고, 보관비용은 FNS USA의 애틀랜타 지역 보관비용을 일주일로 했을 경우에 발생하는 비용을 적용하였다.

70) 우리나라 일관수송용 팔레트의 KS표준 규격으로 1,100mm × 1,100mm 크기

71) 리튬이온 배터리의 경우 1kWh당 5~8kg의 무게를 가짐

〈표 3-17〉 판매처별 부품 발주비용(OR_{pq}) 및 보관비용(PIC_{pq})

단위: 달러

판매처	부품	발주비용*	보관비용**
미 동부	부품 1	2,576	112
	부품 2	606	112

자료: * 이성우 외(2023), p. 122.

** FNS USA의 애틀랜타 지역 1일 보관료(16달러/USD)에 1주일(7일) 적용

울산지역 기준으로 보관비는 하루 1평(3.3㎡)당 35,000원⁷²⁾으로 조사되었고 환율 1,400원, 1평에 4개의 팔레트 보관이 가능하다고 가정하여 1주일에 44달러의 보관비가 발생하는 것으로 추정하였다.

〈표 3-18〉 부품 생산자 보관비용(MIC_{iq})

단위: 달러/팔레트

부품 생산자	부품	보관비
한국	부품 1	44
	부품 2	44

자료: 디엔비로지스틱스 인터뷰 자료(2024.7.9.)를 기반으로 저자 작성

다음 〈표 3-19〉는 부품별로 원료를 공급할 수 있는 지역을 표시한 자료이다. 예를 들어 부품 1은 유럽에서 생산할 수 있기 때문에 비용이 발생하지 않지만 상하이나 호찌민, 싱가포르에서는 생산할 수 없기 때문에 1,000,000달러라는 큰 수를 지정하여 선택되지 않도록 설정하였다. 그리고 부품 1의 경우 수에즈 운하와 희망봉, 북극항로 등 세 가지 선택지가 있기 때문에 모두 선택이 될 수 있도록 0달러의 비용이 발생하는 것으로 설정하였다. 부품 2의 경우는 부품 1과 반대로 상하이, 호찌민, 싱가포르에서만 공급할 수 있어 유럽의 원료공급자에 큰 수를 할당하여 선택되지 않도록 하였다.

72) 디엔비로지스틱스 인터뷰 자료(2024.7.9.)

〈표 3-19〉 부품별/원료공급자별 가능여부(SC_{qj})

단위: 달러

부품	원료공급자	공급가능여부
부품 1	유럽 1(수에즈)	0
	유럽 2(희망봉)	0
	유럽 3(북극항로)	0
	상하이	1,000,000*
	호찌민	1,000,000*
	싱가포르	1,000,000*
부품 2	유럽 1(수에즈)	1,000,000*
	유럽 2(희망봉)	1,000,000*
	유럽 3(북극항로)	1,000,000*
	상하이	0
	호찌민	0
	싱가포르	0

주: * 부품 1의 경우 유럽에서만 생산할 수 있기 때문에 나머지 3개 지역에는 큰 수(1,000,000)를 지정하여 선택되지 않도록 설정

자료: 저자 작성

다음 〈표 3-20〉은 판매처와 생산자 간 운송비와 운송시간, 그리고 1기 간 내에 한꺼번에 운송할 수 있는 화물량을 표시하였다. 이 중 운송시간과 가용량은 정책 효과를 분석하기 위한 신규 제약조건으로 판매처에서 요구한 운송시간을 넘거나 운송구간별로 운송할 수 있는 가용량을 넘으면 큰 비용을 발생시키기 때문에 선택되지 않도록 하였다.

〈표 3-20〉 판매처와 부품 생산자 간 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})

판매처	부품 생산자	운송비(달러/팔레트)	운송시간(주)	가용량(팔레트/주)
미 동부	한국(LA/LB항)	753	3	40
	한국(NY/NJ항)	638	5	40
	한국(서배너항)	527	5	40
	한국(모빌항)	509	5	40

자료: 저자 작성

다음 <표 3-21>은 앞의 <표 3-20>의 팔레트당 운송비, 운송기간 도출을 위해 Tradlinx, 구글맵, Uber Freight를 기반으로 40피트 컨테이너 1개당 해상운임/시간, 트럭운송운임/시간 등을 조사한 내용이다.

<표 3-21> 주요 경유항별 운송비(PT_{ij}) 및 운송기간(PTL_{ij}) 세부 사항(40피트 컨테이너 기준)

경유항	해상운임 (달러)	해상운송 시간(일)	트럭운송 거리(miles)	트럭운송 운임(달러)	트럭운송 시간(일)	총 운임 (달러)	총 운송 시간(일)
LA/LB항	8,100	12	2,142	6,704	4	15,058 (753달러/팔레트)	17 (3주)
NY/NJ항	9,200	28	1,056	3,305	2	12,759 (638달러/팔레트)	31 (5주)
서배너항	9,200	28	343	1,074	1	10,528 (527달러/팔레트)	30 (5주)
모빌항	9,400	32	162	507	1	10,161 (509달러/팔레트)	34 (5주)

주/자료: (해상운임/해상운송시간) Tradlinx, FCL 해상 스케줄(검색일: 2024.7.8.)
 (트럭운송거리) 구글맵을 기반으로 거리 계산(검색일: 2024.7.8.)
 (트럭운송운임) 3.13USD/mile(Uber Freight(검색일: 2024.7.8.))
 (트럭운송시간) 미국 트럭 운전자 1일 운전 가능시간은 10시간까지이므로 10시간마다 1일로 계산

다음 <표 3-22>는 앞의 <표 3-20>과 같이 부품 생산자와 원료공급자 간의 운송비, 운송기간, 운송가용량을 정리한 표이며 <표 3-23>은 <표 3-22>를 도출하기 위해 Drewry, HMM 등의 자료를 기반으로 40피트 컨테이너 1개당 해상운임/시간, 트럭운송운임/시간 등을 조사하였다.

<표 3-22> 생산자와 원료공급자 간 운송비(MT_{ij}) 및 운송기간(MTL_{ij}), 운송가용량(MTL_{ij})

부품 생산자	원료공급자	운송비(달러/팔레트)	운송시간(주)	가용량(팔레트/주)
한국	유럽 1(수에즈)	72	9	50
	유럽 2(히망봉)	78	10	50
	유럽 3(북극항로)	102	7	50
	호찌민	40	2	50
	싱가포르	45	2	50
	상하이	39	1	50

자료: 저자 작성

〈표 3-23〉 주요 경유항별 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}) 세부 사항(40피트 컨테이너 기준)

출발항 (경유지)	해상운임 (달러)	해상운송 시간(일)	트럭운송 운임(달러)	트럭운송 시간(일)	총 운임 (달러)	총 운송시간 (일)
로테르담 (수에즈운하)	1,180	56	254 (355,300원)	1	1,434 (72달러/팔레트)	57 (9주)
로테르담 (희망봉)	1,298	66			1,552 (78달러/팔레트)	67 (10주)
로테르담 (북극항로)	1,770	46			2,024 (102달러/팔레트)	47 (7주)
호찌민	527	10			781 (40달러/팔레트)	11 (2주)
싱가포르	642	8			896 (45달러/팔레트)	9 (2주)
상하이	508	3			762 (39달러/팔레트)	4 (1주)

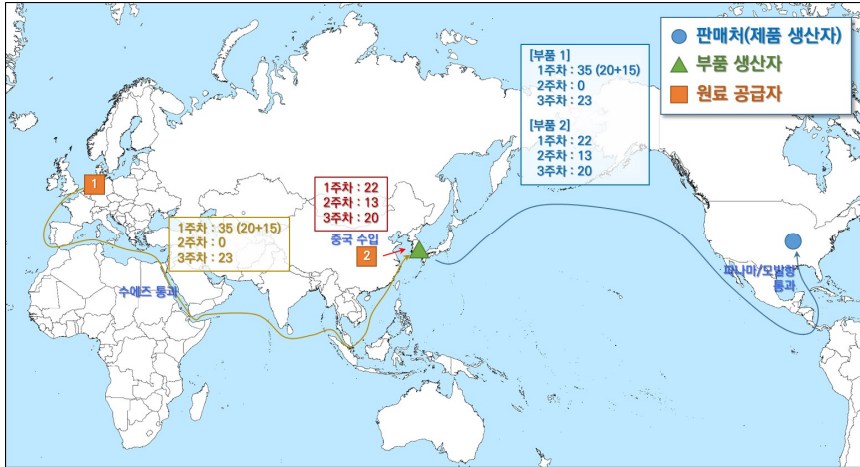
주/자료: (해상운임) Drewry(검색일: 2024.7.9.)
 (해상운임-희망봉/북극항로) 한국해양수산개발원 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.7.8.)
 (해상운송시간) HMM(검색일: 2024.7.8.)
 (해상운송시간-희망봉) 희망봉 우회 시 10일 증가(서울경제(검색일: 2024.7.8.))
 (해상운송시간-북극항로) 북극항로 개척 시 10일 감소(중앙일보(검색일: 2024.7.8.))
 (트럭운송운임) Tradlinx, 컨테이너 내륙 운임 조회(검색일: 2024.7.8.)
 (트럭운송시간) 국내 운송이므로 1일로 가정

2) 실험 및 결과

(1) 일반적인 상황

앞서 개발한 혼합정수계획법 및 메타휴리스틱 모형에 주어진 일반적인 상황을 실험하였다. 그 결과, 〈그림 3-19〉과 같이 72,488달러의 물류비용이 발생하는 결과가 가장 좋은 해로 탐색되었다.

〈그림 3-19〉 실험 결과 I(일반적인 상황)



자료: 저자 작성

〈그림 3-19〉에서 볼 수 있듯이 부품 1은 유럽으로부터 가장 가까운 수에즈 운하를 통해서 수입하는 것으로 계획되었다. 다만 한 기간에 옮길 수 있는 용량이 50개로 제한되어 있어 각 주별 20개, 15개, 23개 주문을 첫 번째 주에 35개(20 + 15), 세 번째 주에 23개 운송하는 것으로 결정하였다. 부품 2는 중국 상하이를 통해서 수입하는 것으로 결정하였으며, 부품 1과 마찬가지로 용량 제한이 50개로 되어 있어 한꺼번에 주문이 되지 않아 첫 번째 주에 22개, 두 번째 주에 13개, 세 번째 주에 20개씩 매주 발주하여 운송하기로 했다.

한국에서 부품을 조립하여 미국 동부로 수출하는 것은 파나마 운하를 거쳐 미국 동부 모빌항을 통하는 것으로 결정하였다. 운송기간이 다른 항을 이용하는 것보다는 상대적으로 길지만 납품기한인 15주 이내로 납품이 가능하고, 특히 내륙 트럭운송 비용이 가장 적게 들어 모빌항을 통하는 것으로 결과를 도출하였다. 이처럼 원료 수입과 부품 수출을 정리한 표는 다음 〈표 3-24〉, 〈표 3-25〉와 같다.

〈표 3-24〉 실험 결과 I(일반적인 상황 - 부품 발주량 및 생산자)

판매처	부품	기간(주)	주문량	발주량	부품 생산자 및 경유지
미 동부	부품 1	1	20	35	한국(모빌함)
		2	15	-	-
		3	23	23	한국(모빌함)
	부품 2	1	22	22	한국(모빌함)
		2	13	13	한국(모빌함)
		3	20	20	한국(모빌함)

자료: 저자 작성

〈표 3-25〉 실험 결과 I(일반적인 상황 - 원료공급자 및 부품별 생산량)

부품 생산자	부품	기간(주)	원료공급자	생산량	판매처 주문량
한국	부품 1	1	유럽 1(수에즈)	35	미 동부(35)
		2	-	-	-
		3	유럽 1(수에즈)	23	미 동부(23)
	부품 2	1	상하이	22	미 동부(22)
		2	상하이	13	미 동부(13)
		3	상하이	20	미 동부(20)

자료: 저자 작성

본 연구는 주문비용, 보관비용, 운송비용 등 비용항목과 운송시간 등의 시간항목이 전체 결과에 어떻게 반응하는지 분석하기 위해 민감도 분석(Sensitive Analysis)을 실시하였다. 각 항목별로 10%, 20%, 30% 증가 시 결과를 비교하였으며, 다음 〈표 3-26〉과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

결과적으로 운송비용이 가장 민감하게 반응하는 변수이며 보관비용은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석하였다. 따라서, 공급망 리스크 대응 전략 수립 시 운송비용 관련 사항을 특별히 관리해야 할 필요가 있다.

〈표 3-26〉 민감도 분석 결과

구분	증가율	총비용(달러)	일반적인 상황 대비 비용증가율
일반적인 상황	-	72,488	-
주문비용	10%	73,182	0.96%
	20%	73,881	1.92%
	30%	74,575	2.88%
	40%	75,274	3.84%
보관비용	10%	72,653	0.23%
	20%	72,818	0.46%
	30%	72,983	0.68%
	40%	73,148	0.91%
운송비용	10%	78,709	8.58%
	20%	85,098	17.40%
	30%	91,487	26.21%
	40%	97,876	35.02%
운송시간	10%	72,488	0.00%
	20%	77,856	7.41%
	30%	77,856	7.41%
	40%	77,856	7.41%

자료: 저자 작성

(2) 공급망 리스크 발생 상황(미국 IRA 적용)

공급망 리스크 발생 시 모형의 활용 가능성을 확인하기 위해 미국이 IRA 법을 발효하여 프렌드쇼어링(Friend-Shoring) 정책을 펼칠 경우를 가정하고 추가 실험을 진행하였다. 프렌드쇼어링은 동맹·우방국끼리 공급망을 구축해 글로벌 공급망 교란 문제를 해결한다는 의미로, 코로나19 사태, 중국의 도시 봉쇄로 인해 글로벌 공급망 이슈가 불거지자 중국에 대한 의존도를 낮춰야 한다는 의미로 사용됐다.⁷³⁾ 신뢰도가 높은 동맹끼리 뭉치면 안정적인 공급망을 확보할 수 있기 때문에 프렌드쇼어링을 추진하는 경향이

73) 네이버 지식백과(매일경제, 매경닷컴)(검색일: 2024.7.16.)

높다. 이렇게 되면 미국으로 수출하는 배터리 또는 부품에는 중국산 원료가 포함될 수 없기 때문에 다음 <표 3-27>과 같이 중국의 공급 가용량이 0으로 변경될 수밖에 없다.

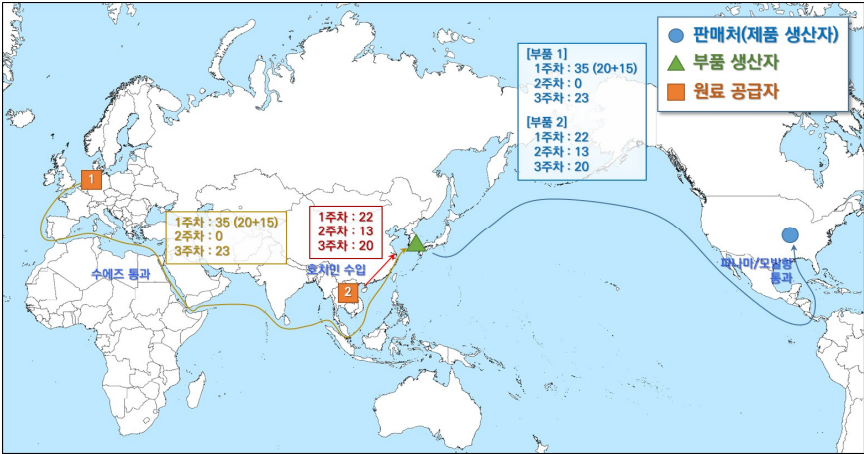
<표 3-27> 변경된 운송비(MT_{ij}) 및 운송기간(MTL_{ij}), 운송가용량(MTL_{ij})

부품 생산자	원료공급자	운송비(달러)	운송시간(기간)	가용량(팔레트/기간)
한국	유럽 1(수에즈)	72	9	50
	유럽 2(희망봉)	78	10	50
	유럽 3(북극항로)	102	7	50
	호찌민	40	2	50
	싱가포르	45	2	50
	상하이	39	1	50 → 0

자료: 저자 작성

그 결과 다음 <그림 3-20>, <표 3-28>과 같이 중국 대신 베트남 호찌민의 기업이 원료를 대신 공급하며, 전체 비용은 72,543달러로 소폭 상승할 것으로 분석하였다.

<그림 3-20> 실험 결과 II(미국 IRA 발효)



자료: 저자 작성

〈표 3-28〉 실험 결과 II(미국 IRA 발효 - 원료공급자 및 부품별 생산량)

부품 생산자	부품	기간(주)	원료공급자	생산량	판매처 주문량
한국	부품 1	1	유럽 1(수에즈)	35	미 동부(35)
		2	-	-	-
		3	유럽 1(수에즈)	23	미 동부(23)
	부품 2	1	상하이 → 호찌민	22	미 동부(22)
		2	상하이 → 호찌민	13	미 동부(13)
		3	상하이 → 호찌민	20	미 동부(20)

자료: 저자 작성

2. 시뮬레이션 모형 검증을 위한 시나리오 설정 및 실험

1) 기준 시나리오

기준 시나리오는 향후 설명할 다섯 개 시나리오에 공동으로 적용한다. 기준 시나리오 내용은 다음 표와 같다.

〈표 3-29〉 기준 시나리오 내용

항목	설명
DEMAND_INTERVAL	• 수요 발생 간격이 평균 7일인 지수분포
DEMAND_SIZE	• 부품 1 : 수요 크기 20팔레트, 15팔레트, 23팔레트의 발생 확률이 각각 1/3인 경험 이산분포 • 부품 2 : 수요 크기 22팔레트, 13팔레트, 20팔레트의 발생 확률이 각각 1/3인 경험 이산분포
DUE_DATE_PERIOD	• 부품 1 : 요구 납품 기간의 하한과 상한이 각각 (14주 × 7일/주 × 0.75), (14주 × 7일/주 × 1.1)인 균등분포 • 부품 2 : 요구 납품 기간의 하한과 상한이 각각 (6주 × 7일/주 × 0.5), (6주 × 7일/주 × 1.1)인 균등분포
TRANSPORT_TIME_MF1_TO_DC1	• 한국 부품생산자로부터 미국 판매처에 가는 운송 시간 • LA/LB항 경유 : 운송 시간의 하한과 상한이 각각 (17일 × 0.9), (17일 × 1.1)인 균등분포 • NY/NJ항 경유 : 운송 시간의 하한과 상한이 각각 (31일 × 0.9), (31일 × 1.1)인 균등분포 • 서배너항 경유 : 운송 시간의 하한과 상한이 각각 (30일 × 0.9), (30일 × 1.1)인 균등분포 • 모빌항 경유 : 운송 시간의 하한과 상한이 각각 (34일 × 0.9), (34일 × 1.1)인 균등분포

항목	설명
TRANSPORT_TIME_SP1_TO_MF1	- 유럽 원료공급자로부터 한국 부품생산자에게 가는 운송 시간 - 수에즈 경우 : 운송 시간의 하한과 상한이 각각 $(57\text{일} \times 0.9)$, $(57\text{일} \times 1.1)$인 균등분포 - 홍콩 경우 : 운송 시간의 하한과 상한이 각각 $(67\text{일} \times 0.9)$, $(67\text{일} \times 1.1)$인 균등분포
TRANSPORT_TIME_SP2_TO_MF1	- 호찌민 원료공급자로부터 한국 부품생산자에게 가는 운송 시간 - 운송 시간의 하한과 상한이 각각 $(11\text{일} \times 0.9)$, $(11\text{일} \times 1.1)$인 균등분포
TRANSPORT_TIME_SP3_TO_MF1	- 싱가포르 원료공급자로부터 한국 부품생산자에게 가는 운송 시간 - 운송 시간의 하한과 상한이 각각 $(9\text{일} \times 0.9)$, $(9\text{일} \times 1.1)$인 균등분포
TRANSPORT_TIME_SP4_TO_MF1	- 상하이 원료공급자로부터 한국 부품생산자에게 가는 운송 시간 - 운송 시간의 하한과 상한이 각각 $(4\text{일} \times 0.9)$, $(4\text{일} \times 1.1)$인 균등분포
RunPeriod	5년 $\times$ 365일/년 - 리스크 발생 빈도와 지속 기간을 고려하여 설정
LittleS_DC1	- 미국 판매처에 관한 (s, S) 재고 정책 s 값 {(주당 평균 수요) $\times$ (평균 조달기간주 단위)}으로 설정 - 부품 1: 77팔레트($\frac{(20+15+23)\text{팔레트}}{3} \times \frac{(17+31+30+34)\text{일}}{4} \times \frac{1\text{주}}{7\text{일}} = 77\text{팔레트}$) - 부품 2: 73팔레트($\frac{(22+13+20)\text{팔레트}}{3} \times \frac{(17+31+30+34)\text{일}}{4} \times \frac{1\text{주}}{7\text{일}} = 73\text{팔레트}$)
LittleS_MF1	- 한국 부품생산자에 관한 (s, S) 재고 정책 s 값 {(주당 평균 수요) $\times$ (평균 조달기간주 단위)}으로 설정 - 부품 1: 171팔레트($\frac{(20+15+23)\text{팔레트}}{3} \times \frac{(57+67)\text{일}}{4} \times \frac{1\text{주}}{7\text{일}} = 171\text{팔레트}$) - 부품 2: 21팔레트($\frac{(22+13+20)\text{팔레트}}{3} \times \frac{(11+9+4)\text{일}}{4} \times \frac{1\text{주}}{7\text{일}} = 21\text{팔레트}$)
BigS_DC1	- 미국 판매처에 관한 (s, S) 재고 정책 S 값 - s 값의 2배로 설정 - 부품 1: 155팔레트 - 부품 2: 147팔레트
BigS_MF1	- 한국 부품생산자에 관한 (s, S) 재고 정책 S 값 - s 값의 2배로 설정 - 부품 1: 342팔레트 - 부품 2: 42팔레트
UnitHoldingCost_DC1	- 미국 판매처에 관한 단위 재고유지비 - 부품 1 : 16달러 - 부품 2 : 16달러

항목	설명
UnitHoldingCost_MF1	• 한국 부품생산자에 관한 단위 재고유지비 • 부품 1 : 6.25달러 • 부품 2 : 6.25달러
UnitShortageCost_DC1	• 미국 판매처에 관한 단위 품절비 • 고려하지 않음
UnitShortageCost_MF1	• 한국 부품생산자에 관한 단위 품절비 • 고려하지 않음
UnitTransportCost_MF1_To_DC1	• 한국 부품생산자로부터 미국 판매처까지 단위 운송비 • LA/LB항 경유: 753달러 • NY/NJ항 경유: 638달러 • 서배너항 경유: 527달러 • 모빌항 경유: 509달러
UnitTransportCost_S_P1_To_MF1	• 유럽 원료공급자로부터 한국 부품생산자까지 단위 운송비 • 수에즈 경유: 72달러 • 희망봉 경유: 78달러
UnitTransportCost_S_P2_To_MF1	• 호찌민 원료공급자로부터 한국 부품생산자까지 단위 운송비 • 40달러
UnitTransportCost_S_P3_To_MF1	• 싱가포르 원료공급자로부터 한국의 부품생산자까지 단위 운송비 • 45달러
UnitTransportCost_S_P4_To_MF1	• 상하이 원료공급자로부터 한국 부품생산자까지 단위 운송비 • 39달러
OrderFixedCost_DC1_To_MF1	• 미국 판매처로부터 한국의 부품생산자까지 주문 고정비 • 부품 1: 2,576달러 • 부품 2: 606달러
OrderFixedCost_MF1_To_SP1	• 한국 부품생산자로부터 유럽 원료공급자까지 주문 고정비 • 고려하지 않음
OrderFixedCost_MF1_To_SP2	• 한국 부품생산자로부터 호찌민의 원료공급자까지 주문 고정비 • 고려하지 않음
OrderFixedCost_MF1_To_SP3	• 한국 부품생산자로부터 싱가포르 원료공급자까지 주문 고정비 • 고려하지 않음
OrderFixedCost_MF1_To_SP4	• 한국 부품생산자로부터 상하이 원료공급자까지 주문 고정비 • 고려하지 않음

항목	설명
OrderVariableCost_DC1_To_MF1	- 미국 판매처로부터 한국 부품생산자까지 주문 변동비 - 고려하지 않음
OrderVariableCost_MF1_To_SP1	- 한국 부품생산자로부터 호찌민의 원료공급자까지 주문 변동비 - 고려하지 않음
OrderVariableCost_MF1_To_SP2	- 한국 부품생산자로부터 호찌민 원료공급자까지 주문 변동비 - 고려하지 않음
OrderVariableCost_MF1_To_SP3	- 한국 부품생산자로부터 싱가포르의 원료공급자까지 주문 변동비 - 고려하지 않음
OrderVariableCost_MF1_To_SP4	- 한국 부품생산자로부터 상하이 원료공급자까지 주문 변동비 - 고려하지 않음
InventoryLevel_DCi	- 미국 판매처의 초기 재고 수준 - 미국의 판매처에 관한 (s, S) 재고 정책 s 값과 같게 설정 - 부품 1: 77팔레트 - 부품 2: 73팔레트
InventoryLevel_MFj	- 한국 부품생산자의 초기 재고 수준 - 한국 부품생산자에 관한 (s, S) 재고 정책 s 값과 같게 설정 - 부품 1: 171팔레트 - 부품 2: 21팔레트

자료: 저자 작성

2) 리스크 반영 시나리오

본 연구에서 고려할 리스크를 선정하기 위해 국내·외 주요 연구를 우선 검토하였다. 이를 바탕으로 연구 목적에 맞게 리스크 요인, 세부 요인, 각 리스크의 개념을 정리하였다. 다음으로 연구진 회의를 거쳐 본 연구에서 적용해야 하는 리스크를 최종 선정하였다.

국내의 대표적인 연구로는 이나영 외(2023) 연구를 들 수 있다. 해당 연구는 관련 선행연구를 검토하고 한국해양수산개발원 내부 연구진 브레인스토밍을 통해 일차 공급망 리스크 요인을 도출하였다. 다음으로 리스크 요인에 대한 정의를 제시하고 정의 등을 고려하여 공급망 리스크 요인을 재

분류하였다. 가장 높은 빈도를 나타내는 공급망 리스크 요인을 일차 공급망 리스크 요인으로 선정하였다. 해당 연구에서 ‘공급자 리스크’, ‘조직 리스크’, ‘환경 리스크’, ‘운송 리스크’, ‘정보 시스템 리스크’ 등이 가장 많은 빈도수를 보였으며 세부 요인을 총 11개로 정리하였다.

〈표 3-30〉 일차 공급망 리스크 요인 및 개념

리스크 요인	세부 요인	개념
공급자(supplier) 리스크	생산 부족	공급업체의 용량 제약 및 낮은 공장 가동률 등으로 인한 생산 부족에 따른 위험
	싱글 소싱	한정된 공급업체로 인한 높은 의존성
환경(environmental) 리스크	자연재해 및 전염병	지진, 태풍, 해일, 화산 등 자연재해 및 전염병에 따른 위험
	사회적·정치적 불안	전쟁, 테러, 국가 간 사회적·정치적 불안정에 따른 위험
	경제적 불안	GDP, 금리, 환율 변화 등에 따른 수요 변동 위험
운송(transportation) 리스크	운송 네트워크(경로) 혼잡 및 중단	운송 네트워크 혼잡 및 중단에 따른 제품의 지연, 파손 등과 관련한 위험
	국경 통관 절차 변경	국경 통관 절차 변경에 따른 업무 증가 등과 관련된 위험
조직(organizational) 리스크	노동자 파업	조직(항만) 내 근로자들의 파업에 따른 위험
	기계 결함	조직(항만) 내 물리적 자원의 결함 등에 따른 위험
정보 시스템(information system) 리스크	사이버 공격	항만 내 디지털 자산에 대한 사이버 공격에 따른 위험
	데이터 및 통신 결함	정보 시스템의 고장 등으로 인한 데이터 통신 결함이 관련된 위험

자료: 이나영 외 (2023), p. 62.

해외 자료로는 Ivanov et al.(2019)이 제시한 공급망 위험 분류를 참고하였다. 해당 문헌에는 연구자들이 제시한 분류뿐만 아니라 Chopra & Sodhi(2004), Quang & Hara(2018)가 제시한 분류를 함께 제시함으로써 리스크 요인을 다양한 관점에서 검토할 수 있는 기회를 제공하였다.

〈표 3-31〉 공급망에서 리스크 요인 (교란 및 중단 사례)

리스크 요인	사례	영향
테러, 해적	• 2008년 9월 11일 소말리아	• 포드 공장 다섯 곳 장기간 폐쇄 • 많은 공급망 붕괴
자연재해	• 1999년 태국 지진 • 2002년 작센주 홍수 • 2007년 일본 지진	• 애플 컴퓨터 아시아 생산 마비 • 드레스덴 폭스바겐 공장 생산성 급감 • 55,000대에 해당하는 토요타 공급망 붕괴
	• 2006년 카트리나 허리케인	• 미국 전체 휘발유 생산의 10~15% 중단 • 국내·외 기름값 상승
	• 2001년 일본 지진 및 쓰나미	• 글로벌 자동차, 전자 관련 상품 공급망 붕괴 • 토요타 시장 지위 상실
	• 2015년 인도 첸나이 홍수	• 학술 문헌 생산에 중대한 영향
인재	• 2016년 루트비히스하펜의 BASF 공장 폭발	• 전체 공급망에서 15%에 해당하는 원자재가 사라지고, 공장 생산이 몇 주간 중단
	• 2005년 ASOS 물류센터의 화재	• 한 달간 배송 중단
	• 2000년 미국 앨버커키 필립스 반도체 공장 화재	• 주요 고객사인 에릭슨의 4억 달러 추정 손실
정치적 리스크	• 2009년 “가스” 리스크	• 러시아-유럽 가스 공급 중단 • 가스프롬과 고객의 막대한 손실
금융 위기	• 2008년 가을	• 생산 감소 및 중단 • 공급망 전체 붕괴
파업	• 2016년 현대자동차 파업	• 차량 130,000대 생산에 막대한 영향
계약 분쟁	• 2016년 여름 폭스바겐과 프리벤트그룹 계약 분쟁	• 독일 내 6개 공장 중단으로 부품 공급 차질 • 27,700명의 노동자에게 직접적인 영향(고용 중단 등)

자료: Ivanov et al. (2019), p. 62.

본 연구에서는 시뮬레이션 모형에 적용할 리스크를 도출하기 위해 국내 주요 연구 한 가지와 세 가지 해외 문헌을 참고하여 연구에 적용할 수 있는 공급망 리스크 요인과 개념을 정리하였다. 공급망 리스크 요인이 앞의 〈표 3-5〉와 상이한 이유는 시뮬레이션이 불확실한 미래를 예측하여 창의적인 결과를 도출해야 하기 때문에 정확하고 합리적인 결과를 도출하는 휴리스틱과는 다른 요인이 필요해야 했기 때문이다.

〈표 3-32〉 공급망 리스크 요인 및 개념

리스크 요인	세부 요인	개념
공급자 리스크	생산 부족	공급업체의 생산력 한계 및 낮은 공장 가동률 등으로 생산 부족에 따른 위험
	단일 공급	단일 공급업체로부터 조달로 인해 공급 차질이 발생할 수 있는 위험
환경·사회 리스크	자연재해	태풍, 지진, 폭우, 폭설, 분화, 가뭄, 온난화 등 자연재해로 인해 발생하는 위험
	전염병	코로나19와 같은 사회 전반에 치명적인 영향을 미치는 전염병으로 발생할 수 있는 위험
	사회적·정치적 불안	전쟁, 내란, 폭동, 테러, 국가 또는 지역 간 사회적·정치적 불안정에 따른 위험
	경제적 불안	금리, 인플레이션, 금융 위기, 환율 변화 등에 따른 수요 변동 위험
	무역 분쟁	수출입 제한 또는 금지, 관세 부과, 비관세장벽, 외환 제한 등에 따른 위험
운송 리스크	운송 네트워크 혼잡 및 중단	운송 네트워크 혼잡 및 중단에 따른 운송의 지연, 제품의 멸실, 파손 등과 관련한 위험
	운송수단 과잉 및 부족	시장 변동(수요의 급격한 변화)에 따른 운송수단의 과잉 및 부족으로 인한 위험
조직 리스크	시설, 설비 혹은 장비 문제	조직 내 물리적 자원의 결함, 고장 등으로 인한 위험
	노동자 태업 혹은 파업	조직 내 근로자들의 업무 효율성 및 중단에 관련된 위험
정보 시스템 리스크	보안 이슈	기업에서 사용하는 정보 시스템을 포함한 디지털 자산의 기계, 인터페이스, 구성원으로 인해 발생하는 위험
	데이터 및 통신 문제	통신, 데이터 문제로 인해 정보 시스템의 오류, 고장에 따른 위험

자료: 저자 작성

제시한 공급망 리스크 요인 및 개념을 바탕으로 연구진 회의를 진행하였고, 일차적으로 태풍, 지진, 가뭄, 홍수, 전염병, 전쟁, 내란, 테러 등을 리스크로 고려하기로 하였다. 이 중 연구의 목적 및 특성을 고려하여 태풍, 가뭄, 전쟁 리스크를 우선 고려하였으며, 현실적인 적용 가능성, 데이터 가용성 등을 고려하여 적용할 수 있는 리스크를 검토하였다. 최종적으로 태풍, 가뭄, 전쟁, 지진을 리스크에 반영하였다.

리스크를 반영하기 위해서는 원료공급자, 부품생산자, 판매처, 시장의 위치(국가) 정보와 원료공급자-부품제조자, 부품제조자-판매처 또는 시장 사이의 운송경로와 관련한 리스크 정보가 필요하다. 원료공급자의 위치(국가)는 부품1은 유럽(네덜란드), 부품2는 중국, 베트남, 싱가포르가 해당되며 부품생산자 위치(국가)는 한국, 판매처와 시장의 위치(국가)는 미국이다. 원료공급자-부품생산자 사이의 운송경로는 수에즈 운하를 통과하는 경로와 아프리카 희망봉을 지나는 경로, 북극항로를 통한 경로가 있다. 부품생산자-판매처 또는 시장 사이의 운송경로는 LA/LB항을 거쳐 트럭으로 운송하는 경로와 파나마 운하를 통과해 미국의 모빌항, 서배너항, NY/NJ항을 지나는 네 가지 경로가 있다. 본 연구는 공급망 교란 및 중단 특성을 고려하여 판매처와 시장 즉 미국의 위치(국가) 정보는 반영하지 않았다.

태풍의 경우 위치(국가) 정보는 네덜란드, 중국, 베트남, 싱가포르, 한국의 2000년부터 2023년까지 위키피디아 영문 사이트(en.wikipedia.org) ‘Tropical cyclones by year’ 데이터를 활용하였다. 한국 자료는 위키피디아 영문 사이트 ‘Typhoons in the Korean Peninsula’ 데이터를 바탕으로 ‘Tropical cyclones by year’ 데이터에서 ‘Western Pacific’ 데이터를 교차 검토하여 한국에 직접적인 영향을 미친 태풍만 선별하였다. 원료공급자-부품생산자 사이의 운송경로 및 부품생산자-판매처, 시장 사이의 운송경로 리스크는 해상운송 경로를 제공하는 사이트(Searoutes, app.searoutes.com)에서 로테르담항-수에즈 경유-부산항, 로테르담항-희망봉 경유-부산항, 상하이항-부산항, 호찌민항-부산항, 싱가포르항-부산항, 부산항-LA/LB항, 부산항-모빌항, 부산항-서배너항, 부산항-NY/NJ항의 경로를 검색하였다. 다음으로 검색한 경로를 바탕으로 위키피디아 영문 사이트 ‘Tropical cyclones by year’ 데이터에서 경로에 해당하는 지역의 태풍 정보를 바탕으로 데이터를 정리하였다. 각 위치(국가) 및 운송경로 데이터를 다음의 표에 제시하였다.

〈표 3-33〉 태풍의 연평균 빈도 및 평균 발생 간격

구분				연평균 빈도	평균 발생 간격 (일)
위치 (국가)	네덜란드			-	-
	중국			3.21	113.77
	베트남			0.83	438
	싱가포르			0.04	8,760
	한국			1.67	219
운송 경로	원료공급자- 부품생산자	부품 1	경로 1*	14.5	25.17
			경로 2**	16.46	22.18
		부품 2	상하이항-부산항	2.17	168.46
			호찌민항-부산항	12.29	29.69
			싱가포르항-부산항	13.08	27.90
	부품생산자- 판매처	부산항-LA/LB항-트럭운송		1.38	265.45
		부산항-파나마 운하-모빌항		9.54	38.25
		부산항-파나마 운하-서배너항		10.46	34.90
		부산항-파나마 운하-NY/NJ항		10.50	34.76

주: * 경로 1 (로테르담항-수에즈 운하-부산항)

** : 경로 2 (로테르담항-아프리카 희망봉-부산항)

자료: 저자 작성

태풍의 평균 지속 기간은 한국의 경우 과거 주요 태풍 중 데이터 확보가 가능한 태풍(루사, 매미, 카눈, 힌남노, 마이삭, 곤파스)의 상륙 시간 평균 값인 9.3시간(0.39일)을 사용하였다. 별도의 데이터가 존재하지 않는 베트남, 싱가포르도 한국과 동일한 값을 적용하였다. 중국의 경우 Kuhla et al. (2023)에서 제시한 중국 주요 항만 네 개의 조사 데이터인 연평균 0.9~2.6일을 활용하였다. 운송경로 데이터의 경우 Savi에서 제공한 데이터를 활용(카리브해, 멕시코만, 미국 동부 해안의 항구는 평균 9일 중단, 태평양과 인도양의 항구는 각각 평균 1~3일과 1~2일 중단)하여 미국 동부 해안의 경우 9일을 그대로 적용하였다. 그리고 태평양 노선에 해당하면 태평양 평균 데이터 1~3일을 적용하였고, 인도양과 태평양 노선 모두 해당하면 (수에즈 운하 경유 노선과 희망봉 경유 노선) 태평양 평균 데이터 1~3일과

인도양 평균 데이터 1~2일의 합을 적용하였다. 가용도는 태풍이 발생하였을 때 생산 및 운송 가능 정도를 나타내는 지표로 태풍이 발생하면 지속 기간에는 생산 및 운송이 불가능하다고 판단하여 0을 일괄 적용하였다.

〈표 3-34〉 태풍의 평균 지속 기간 및 가용도

구분				평균 지속 기간 (일)	가용도
위치 (국가)	네덜란드			-	-
	중국			0.9~2.6	0
	베트남			0.39	0
	싱가포르			0.39	0
	한국			0.39	0
운송 경로	원료공급자- 부품생산자	부품 1	경로 1*	(1~3) + (1~2)	0
			경로 2**	(1~3) + (1~2)	0
		부품 2	상하이항-부산항	1~3	0
			호찌민항-부산항	1~3	0
			싱가포르항-부산항	1~3	0
	부품생산자- 판매처	부산항-LA/LB항-트럭운송		2.00	0
		부산항-파나마 운하-모빌항		9.00	0
		부산항-파나마 운하-서배너항		9.00	0
		부산항-파나마 운하-NY/NJ항		9.00	0

주: * 경로 1 (로테르담항-수에즈 운하-부산항)

** : 경로 2 (로테르담항-아프리카 희망봉-부산항)

자료: 저자 작성

가뭄의 경우 위치(국가) 정보는 위키피디아 영문 사이트 ‘List of droughts’와 ‘Drought-Drought by country’를 바탕으로 적용 가능성을 검토하였다. 가뭄이 발생하는 대표 지역은 아프리카, 호주, 카리브 제도, 중국, 유럽, 인도, 미국, 남아메리카, 영국이다. 그리고 가뭄이 주로 발생하는 국가를 살펴보면 아프가니스탄, 아르헨티나, 호주, 캐나다, 칠레, 중국, 에티오피아, 지부티, 에리트레아, 온두라스, 인도, 케냐, 레소토, 멕시코, 모로코, 미얀마, 니제르, 나이지리아, 파키스탄, 러시아, 소말리아, 남아프리카

카, 스페인, 터키, 영국, 미국, 짐바브웨 등이다. 해당 정보를 동시에 고려하면 위치(국가)는 중국과 미국이 해당한다. 중국의 대표적인 가뭄은 1875년 ‘Drought and subsequent famine’, 2010년 ‘China drought and dust storm’, 2010~2011년 ‘China drought’ 그리고 국내 언론(KBS, MBC 등)에 소개된 2014년 ‘동북 지역 가뭄’, 2022년 ‘양쯔강 지역 가뭄’이 있는데, 지역적인 영향이 강하고 가뭄으로 인해 실제 생산 및 공급망에 영향을 미쳤는지 알 수 없어 리스크로 반영하지 않았다. 한국의 경우 통상적으로 가뭄의 정도가 심각한 국가로 분류되지는 않지만, 국가가뭄정보포털에서 제공하는 ‘가뭄지수’가 있으므로 해당 지수를 활용하여 심각성 정도를 정리하였다. 해당 포털에서는 SGI, SPI3, SPI6, PDSI, MSWSI, SMI 등의 다양한 지수를 제공한다. 본 연구에서는 여러 전문가에 의해 우리나라 가뭄 상황을 비교적 정확하게 판단할 수 있는 지수로 검증된 SGI를 활용하였다(위터저널). SGI는 2013년 Bloomfield and Marchant에 의해 제시되었고 표준 지하수 지수(Standardized Groundwater level Index)의 약자이다. 월별 평년 대비 지하수위의 높고 낮은 정도를 나타내는 표준화 지수로서 주로 지하수를 수원으로 사용하는 미급수 지역에 관한 가뭄 판단의 참고 자료로 활용할 수 있다. 가뭄의 정도는 정상, 관심, 주의, 경계, 심각 다섯 단계로 나누어져 있으며 주의~심각에 해당하는 누적 수치를 활용하였다. 누적 수치는 총 167개 시군 중에 주의 이상에 해당하는 시군을 확인할 수 있기 때문에 전국 가뭄의 심각 정도를 파악하기 위해 다음식을 사용하여 백분율(%)을 산출하였다. 자료는 2014년 1월부터 6월까지 월 단위 데이터를 활용하였다.

$$\text{한국 가뭄의 심각성 정도(\%)} = \frac{\text{SGI지수 (주의 + 경계 + 심각)}}{\text{전체 시군 (167시군)}}$$

운송경로의 경우 가뭄으로 인한 리스크는 갑문 방식으로 운영하여 가뭄

에 영향을 받는 파나마 운하만 고려하였다. 파나마 운하는 전 세계 해상운송의 5%(The New York Times)를 차지하기 때문에 이곳에서 운송 지연이나 중단이 발생하게 되면 전 세계 공급망에 영향을 미쳐 연료 사용량이 늘어나며 GDP 손실이 발생할 수 있다. 파나마 운하는 산을 넘어야 하는 독특한 구조 때문에 갑문 방식으로 운영해야 하고 물을 넣었다 뺐다 하는 과정에서 많은 양의 물이 필요하다. 이때 필요한 물은 인근 가톤호수(Gatun Lake)에서 공급된다. 일정한 주기로 반복되는 엘니뇨(El Nino) 현상으로 2023년 가톤호의 수위는 80피트(ft) 이하를 5개월이나 유지하였다(Woodwell Climate Research Center 보고서 '3. Gatun Lake levels continue to drop' 그림에서 2023년 자료 참고). 이러한 현상은 가톤호 수위를 기록하기 시작한 1965년 이후 처음 있는 이례적인 사건이었다(Woodwell Climate Research Center 보고서 '3. Gatun Lake levels continue to drop' 그림에서 1965년~2022년 자료 참고). 또한 2024년 1월은 1월 기준 수위는 가장 낮은 82피트 이하를 기록하였다(Woodwell Climate Research Center 보고서 '3. Gatun Lake levels continue to drop' 그림에서 2024년 자료 참고). 과거 2023년보다 낮은 수위(최저 수위 기준)를 기록한 적은 1998년, 2016년 두 차례 있었다(Woodwell Climate Research Center 보고서 '3. Gatun Lake levels continue to drop' 그림에서 1998년, 2016년, 2023년 자료 참고). 하지만 1998년과 2016년에는 각각 4월과 5월에 약 78피트에 가까운 수위를 기록하고 수위가 급격하게 높아져 정상 수위를 빠르게 회복하였다(Woodwell Climate Research Center). 따라서 2023년부터 발생한 가톤호의 가뭄 현상이 기존의 현상과는 큰 차이를 보이는 점에 주목해야 한다. 파나마 운하는 하루 평균 38척이 통과하였으나(Woodwell Climate Research Center) 2023년 3월 가톤호의 수위가 85피트 이하로 떨어지고 약 34척의 선박이 통과하였고, 2024년 6월 기준 약 29척이 통과하고 있어 정상 범위를 회복하지

못하고 있다(Panama Canal Authority). 85피트의 수위를 회복하고 하루 평균 35척 이상이 통과하는 정상 범위를 회복하는데 1년 이상의 기간이 소요되는 것을 알 수 있다. 앞서 살펴본 것과 같이 가뭄으로 인한 파나마 운하 통행 선박에 대한 규제는 가톤호의 수위와 직접적인 관련이 있으며, 가톤호의 수위는 엘니뇨 현상이 관련된다. 과거에도 엘니뇨 현상으로 주기적인 가뭄이 발생하였고 주기가 약 5년이었지만 이제는 그 주기가 3년 정도로 짧아졌고 가뭄의 정도와 기간이 심해지고 있다(Seatrade Maritime NEWS). 따라서 향후 파나마 운하의 통행 제한은 3년 주기로 발생하고 약 1년간 지속되는 것으로 봐도 무리가 없을 것으로 판단된다. 정상적인 수위 일 경우 하루 평균 약 38척의 선박이 파나마 운하를 통과한다(Woodwell Climate Research Center). 정상적인 운영이 어려운 가톤호 수위 82피트 이하는 2023년 5월부터 2024년 5월까지 지속되었다(Woodwell Climate Research Center 보고서 '3. Gatun Lake levels continue to drop 그림에서 2024년 자료 참고, Panama Canal Authority-Gatun Water Level Indicators 참고). 이 기간 파나마 운하를 통과한 하루 평균 선박의 수는 28.2척이다(Panama Canal Authority Circulars to Shipping Companies-Monthly Canal Operation 월별 자료 참고). 이는 정상 수준에서 25.8% 감소한 수치에 해당한다(상기 자료 정상 38척 대비 28.2척 감소한 수치 적용하여 저자가 계산). 한국의 경우 평균 지속 기간은 기상청에서 제공한 '연도별(1974~2023년) 지역별(167개 시·군) 기상 가뭄 발생 일수'에서 전국 데이터를 평균한 값(50.66)을 적용하였다(기상청, 2024). 또한 가용도는 가뭄으로 생산 및 운송에 차질이 발생한 경우 데이터가 존재하지 않아 1을 적용하였다. 그리고 파나마 운하를 경유하는 노선 세 개는 가뭄이 지속되는 기간에 통과하는 선박이 정상 수준에서 25.8% 감소하기 때문에 0.742(1-0.258)를 적용하였다.

〈표 3-35〉 가뭄의 평균 발생 간격, 평균 지속 기간, 가용도

구분		평균 발생 간격 (일)	평균 지속 기간 (일)	가용도
위치(국가)	한국	59.03	50.66	1
운송경로	파나마 운하	1,095	365	0.742

자료: 저자 작성

전쟁의 경우 위치(국가) 및 운송경로 정보는 Economic Policy Uncertainty의 ‘지정학적 위험 지수(GPR: Geopolitical Risk Index)’를 활용하였다. 해당 지수는 연방준비제도이사회(the Federal Reserve Board)의 Dario Caldara와 Matteo Iacoviello가 개발하였다. 지수를 계산하기 위해 지정학적 위험과 관련한 8개 범주를 구성하였다. 8개의 범주에는 전쟁 위험(범주 1), 평화 위험(범주 2), 군사 증강(범주 3), 핵 위험(범주 4), 테러 위험(범주 5), 전쟁 시작(범주 6), 전쟁 확대(범주 7), 테러 행위(범주 8)가 포함된다. 지정학적 위험 지수는 Chicago Tribune, Daily Telegraph, Financial Times, The Globe and Mail, The Guardian, Los Angeles Times, The New York Times, USA Today, The Wall Street Journal, The Washington Post 10개 신문에서 지정학적 위험이 관련된 상기 8개의 범주에 속하는 기사의 수를 세어 지수를 계산하였으며 44개국의 국가별 지수도 제공한다. 1985년 1월부터 2024년 6월까지 월별 데이터를 활용하였고, 위치(국가) 정보는 싱가포르를 제외하고 모두 제공되었고, 운송경로 정보는 수에즈 운하를 관리하는 이집트 정보를 활용하였다. 계산된 국가별 지수는 모든 신문 기사의 월별 점유율(monthly share)로 표현한다. 예를 들어, 1985년 1월 네덜란드의 지정학적 위험 지수는 0.11인데, 이 값은 1월 전체 기사에서 8가지 범주에 속하는 단어가 0.11%가 있음을 의미한다. 평균 지속 기간은 위치(국가)의 경우 위키피디아 영문 사이트에서 1970년 이후 각 국가에서 발생한 전쟁이나 지원군으로 참여한 전쟁의 시작일과 종료일을 조사하였고 전체 기간의 평균값을 적용하였다. 해당 국가

의 경우 국내에서 발생한 전쟁은 없고 지원군을 파병한 경우만 존재하여 생산 및 운송에 차질이 발생하지 않아 가용도는 1을 일괄 적용하였다. 그리고 운송경로의 경우, 평균 지속 기간은 위치(국가)에 해당하는 이집트 내의 전쟁 발발이나 참전 사례의 평균을 적용하였고, 가용도는 IMF에서 제공한 데이터에서 홍해 지역에서 선박 공격으로 수에즈 운하를 통한 운송이 감소한 2024년 1~2월의 자료를 활용(전년 대비 50% 감소)하였다.

〈표 3-36〉 전쟁의 지정학적 위험 지수, 평균 발생 간격, 평균 지속 기간, 가용도

구분		지정학적 위험 지수	평균 발생 간격 (일)	평균 지속 기간 (일)	가용도
위치(국가)	네덜란드	0.08	381.94	3,038.25	1
	중국	0.44	69.35	1,593.83	1
	베트남	0.04	702.20	1,654.50	1
	한국	0.25	122.31	3,543.33	1
운송경로	수에즈 운하	0.18	170.62	2,070.40	0.5

자료: 저자 작성

지진의 경우 위치(국가) 정보는 네덜란드, 중국, 베트남, 한국, 미국을 대상으로 자료를 조사하였다. 싱가포르를 인도네시아 등 주변 국가에서 발생한 지진으로 인해 간접적인 영향을 받은 적은 있지만 싱가포르 영토에서 발생해 직접적인 영향을 끼친 5.0 이상의 지진이 없어 제외했다. 위치(국가) 정보는 1900년 이후 지진으로 인해 산업에 영향을 미칠 가능성이 있는 지진 규모 5.0 이상을 조사하였다. 해당 정보는 조사 국가의 모든 정보를 제공하는 volcano discovery 자료를 활용하였으며 운송경로 정보는 운송 경로에 지진이 발생하여 해상운송에 차질이 발생하는 경우보다 특정 국가에서 지진이 발생해서 운송에 차질이 발생하는 경우가 대부분이었다. 다만, 운송경로의 지진 발생 정보를 정확하게 제공하는 자료를 수집하기가 어려워 리스크에 반영하지 않았다.

〈표 3-37〉 지진의 연평균 빈도

구분		연평균 빈도		
		규모 5.0 이상	규모 6.0 이상	규모 7.0 이상
위치(국가)	네덜란드	0.04	-	-
	중국	40	3.2	0.41
	베트남	0.64	0.02	-
	한국	0.27	0.03	-

자료: 저자 작성

최종적으로 생산, 공급 등에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 지진 규모 6.0 이상을 반영하였다. 지진의 평균 지속 기간은 일반적으로 10초 이내이며 아주 짧은 시간 지속된다. 그리고 지진 규모 6.0 이상의 지면에서 강한 진동을 느낄 수 있는 지진은 10~30초 정도 지속된다(The University of Utah). 평균 지속 기간은 위의 데이터를 활용해 범위를 적용할 수 있다. 하지만 해당 데이터는 지진이 발생하고 생산공장 등이 가동을 중단한 후 가동을 재개 하는데 소요된 기간 및 가용도가 반영되지 않는 문제가 있다. 따라서 본 연구는 2022년 3월 일본 후쿠시마현 앞바다에서 발생한 규모 7.4 지진으로 인한 도요타자동차 일본 내 생산설비 가동 중단 사례를 적용하였다. 도요타는 지진으로 일본 내 11개 공장, 18개 생산설비의 80%를 평균 3일간 가동 중단하였다(연합뉴스, 2022). 평균 지속 기간은 평균 가동 중단 기간인 3일에 지진 발생 시간(10~30초)을 더하여 적용하였고, 가용도는 일본 내 공장 80% 가동 중단 수치를 적용하여 0.2를 일괄 적용하였다.

〈표 3-38〉 지진의 평균 발생 간격, 평균 지속 기간, 가용도

구분		평균 발생 간격(일)	평균 지속 기간	가용도
위치(국가)	중국	114.06	3일 + (10~30)초	0.2
	베트남	18250	3일 + (10~30)초	0.2
	한국	12166.77	3일 + (10~30)초	0.2

자료: 저자 작성

3) 실험 및 결과

시나리오 1은 리스크가 발생하지 않은 상황이고, 시나리오 2는 리스크가 발생한 상황이다. 두 시나리오 모두 리스크 대응 정책은 고려하지 않는다. 그 결과 멀티 소싱을 고려하지 않기 때문에, 부품 1의 원료공급자는 유럽, 부품 2의 원료공급자는 상하이에 있는 시설만을 선택한다. 또한 대체 운송 경로를 고려하지 않기 때문에, 유럽에서 한국으로의 운송에는 수에즈 운하를 경유하는 경로만이 선택되고 한국에서 미국으로의 운송에는 LA/LB항을 경유하는 경로만이 선택된다. 시나리오 1의 실험 결과는 다른 시나리오의 실험 결과를 분석하는 기준이 된다.

실험은 각 시나리오를 30회 반복하여 수행하였다. 시나리오별 결과 항목은 부품 공급량, 납기 준수율, 조달기간의 평균 및 표준편차, 재고유지비다. 추가로, 시나리오 1을 제외한 모든 시나리오는 리스크가 부품 공급량에 얼마나 큰 영향을 미쳤는가를 나타내는 공급 성능 영향도를 도출한다. 공급 성능 영향도는 1 이상의 값을 갖게 되는데, 1의 값은 리스크가 발생하더라도 공급량이 전혀 감소하지 않는 상황을 나타낸다. 값이 1에 가까울수록 리스크가 공급 성능에 미치는 영향이 적음을 의미하고, 값이 커질수록 리스크가 공급 성능에 미치는 영향이 많음을 뜻한다.

$$\text{공급 성능 영향도} = \frac{\text{리스크가 없는 상황의 공급량}}{\text{리스크가 있는 상황의 공급량}}$$

시나리오 1의 실험 결과를 시나리오 2의 실험 결과와 비교해 보면 리스크가 공급망에 어떤 영향을 주는지 추정할 수 있다. 부품 공급량을 비교한 결과 시나리오 1은 8,980.4팔레트, 시나리오 2는 5,133.93팔레트로 나타났다. 리스크 발생으로 인해 부품 공급량이 약 43% 감소하였고, 리스크에 따른 공급 성능 영향도는 1.75이었다. 시나리오 1과 2의 결과 차이는 부품

1에서 두드러지게 나타났다. 부품 1의 공급망이 리스크에 매우 취약하여 납기 준수를 평균이 7.01% 하락하였고 95% 신뢰구간의 범위가 크게 넓어져 주문 이행에 관한 시간 불확실성 역시 증가하였다. 마지막으로 리스크 발생으로 인해 재고유지비가 8.22% 증가하였음을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모형은 안정적인 공급망 선정에도 활용할 수 있다. 이를 위해 시나리오 3을 설정하였으며, 이는 공급망 리스크가 발생하는 상황에 대체 운송경로를 사용하는 경우이다. 앞의 시나리오 1과 2는 유럽에서 출발해 한국으로의 운송에서 수에즈 운하 경유 경로를 먼저 고려하고 가용하지 않을 시 희망봉 경유 경로를 고려하지만, 시나리오 3에서는 희망봉 경로만을 고려해서 실험하였다.

실험 반복 횟수와 결과 항목은 앞의 실험과 동일하다. 시나리오 3의 실험 결과를 시나리오 2의 실험 결과와 비교하면 대체 운송경로의 도입 효과를 추정할 수 있다. 시나리오 3의 공급 성능 영향도는 1.04로 리스크에 따른 공급 성능의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았고, 시나리오 2의 1.75와도 큰 차이가 있었다. 이러한 결과는 공급 성능 영향도가 1에 가까울수록 공급망이 리스크를 잘 견뎌낸다는 의미로, 희망봉 운송경로가 공급사슬 리스크를 효과적으로 극복하는데 이바지했음을 알 수 있다.

〈표 3-39〉 시나리오 실험 결과 - 부품 공급량과 공급 성능 영향도

시나리오	부품 공급량 평균 (팔레트)			공급 성능 영향도
	부품 1	부품 2	합계	
1 (일반)	4,287.30 (4,014.13~4,560.47)	4,693.10 (4,567.5~4,818.7)	8,980.40	-
2 (리스크 발생)	412.80 (175.35~650.25)	4,721.13 (4,607.57~4,834.69)	5,133.93	1.75
3 (리스크 발생-희망봉)	3,893.67 (3,495.71~4,291.63)	4,706.60 (4,590.07~4,823.13)	8,600.27	1.04

주: 괄호 안의 값은 95% 신뢰구간
자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 3-40〉 시나리오 실험 결과 - 납기 준수율

시나리오	납기 준수율 평균 (%)	
	부품 1	부품 2
1 (일반)	95.44 (93.89~96.99)	97.94 (97.09~98.79)
2 (리스크 발생)	88.43 (78.69~98.17)	98.19 (97.5~98.88)
3 (리스크 발생-희망봉)	71.93 (68.53~75.33)	98.21 (97.54~98.88)

주: 괄호 안의 값은 95% 신뢰구간
 자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 3-41〉 시나리오 실험 결과 - 조달기간

시나리오	조달기간 평균 (일)		조달기간 표준편차 (일)	
	부품 1	부품 2	부품 1	부품 2
1(일반)	60.71	20.99	24.51	1.00
2(리스크 발생)	63.66	21.03	23.33	1.16
3(리스크 발생-희망봉)	72.00	21.07	24.94	1.46

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 3-42〉 시나리오 실험 결과 - 재고유지비

시나리오	재고유지비 평균 (달러)	기준 대비 비율* (%)
1(일반)	4,356,632	100.00
2(리스크 발생)	4,714,852	108.22
3(리스크 발생-희망봉)	4,158,611	88.20

주: * 시나리오 1의 재고유지비 평균을 기준으로 했을 때의 비율
 자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

제4절 시사점

본 장에서는 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형을 개발하여, 공급망 리스크(예: 운하 마비, 팬데믹 발생) 발생 시 물류 공급망 변화를 간단히 분석하였다. 일반적인 상황에서는 가장 효율적인 물류 네트워크를 구성하였으나, 수에즈 운하가 마비될 경우 아프리카 희망봉을 우회하는 결과도 출되었다. 또한, 팬데믹 발생 시에는 LA/LB항의 인력 수급 부족으로 운송 기간과 비용이 증가하고 가용량이 감소하여 파나마 운하를 통해 동부 항만으로 운송하는 결과가 나타났다.

또한, 여러 공급망 환경 변화에도 안정적으로 운영할 수 있는 물류 공급망을 탐색하기 위해 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 이 시뮬레이션 모형은 Arena 소프트웨어를 사용하여 개발하였으며, 공급망 분석을 위해 필요한 입력 항목, 개체 속성 항목, 상태 변수 항목, 출력 항목 등을 설정하였다. 실험은 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형과 마찬가지로 일반적인 상황과 물류 공급망 리스크 발생 상황을 비교하여 진행하였으며, 결과적으로 태풍, 가뭄, 전쟁, 지진 등의 리스크 발생 시 공급량, 납기 준수율, 조달 기간, 재고 유지비 등의 평가 항목이 낮아지는 것으로 분석하였다. 특히 수에즈 운하 통과 대안과 희망봉 우회 대안을 비교·분석한 결과, 희망봉 우회 대안이 보다 안정적인 공급망으로 나타났다.

이러한 실험을 통해 본 연구는 환경 변화에 따라 물류 공급망이 어떻게 변화하는지를 탐색하였으며, 국가에서 물류 공급망과 관련한 정책 시행 방향에 따라 안정적인 물류 공급망을 유지하기 위해 기초 자료를 제공하였다. 이에 4장에서는 3장에서 조사한 글로벌 공급망 리스크 대응 정책을 적용할 때 발생할 효과를 살펴보았다.

04

공급망 리스크 대응 정책 효과

4장 1절에서는 앞서 조사한 공급망 리스크와 정부 차원의 세 가지 대응 정책이 가지는 효과를 메타휴리스틱 모형 실험으로 분석하고자 한다. 이를 위해 공급망 리스크 발생 전·후의 물류 공급망을 비교하였으며, 특히 리스크 발생 후 정책 시행 여부에 따른 효과를 분석하였다. 이 실험에 사용한 기본 데이터는 3장에서 사용된 것과 동일하며, 4장에서는 물류 공급망 리스크 발생 시 데이터가 변경되는 상황을 가정하여 실험을 진행하였다.

이어 2절에서는 안정적인 물류 공급망 설계를 위한 시뮬레이션 모형 실험을 진행하였다. 1절과는 달리, 2절에서는 기업 차원에서 추진 가능한 정책들, 예를 들어 멀티 소싱(시나리오 4), 리스크 완화 재고(시나리오 5) 등의 효과를 분석하였다. 실험에 사용한 데이터는 1절의 데이터를 기반으로 분포를 추정하여 적용하였으며, 3장에서 시뮬레이션 실험으로 분석한 공급망 리스크 발생 상황(시나리오 2)을 비교하여 그 효과를 분석하였다.

이러한 국가, 기업정책이 공급망 리스크에 완벽히 대응한다고 확신할 수는 없다. 다만 일부 리스크 완화를 기대할 수 있기 때문에 본 장에서는 완화 효과를 분석하고자 하였다.

제1절 국가 정책별 효과 분석

본 절에서는 국가차원에서 추진할 수 있는 해외 거점 항만 개발 정책, 해상 무역로 다양화, 대형 터미널 운영 및 대체 부두 구축 정책과 효과를 분석하였다. 이를 위해 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형을 사용하였으며, 정책 적용 전과 후를 비교하여 설명하였다.

1. 해외 거점 항만 개발 정책

최근 미국 동부 항만의 파업 가능성이 높아지고 있다. 미국 동부 항만의 노동조합인 국제항만노동자협회(ILA: International Longshoremen's Association)는 사측 연합인 미국해양협회(USMX: United States Maritime Alliance)가 항만 자동화를 하지 않겠다는 계약을 어기고 자동화 시스템을 도입한 정황을 발견했다고 보고함에 따라 2024년 9월 30일까지 협상이 타결되지 않을 경우 모든 지역의 협회원들은 10월 1일부터 파업할 것이라고 했다.⁷⁴⁾ 1977년 이후 파업을 하지 않았던 ILA의 파업 예정 소식에 전 세계 물류는 다시 한번 요동치고 있으며, 파업 시 서부 항만의 파업과 같이 수백억 달러 규모의 손실이 발생할 것으로 예상되고 있다.

앞서 살펴보았던 것과 같이 코로나19로 인해 미국 서부 항만은 마비되었었다. 수십 척의 선박들이 접안을 대기했으며, 특히 우리나라는 자국 선사가 운영하고 있는 터미널이 없어 선박 접안이 뒷순위로 계속 밀려나 더 큰 물류차질을 입었다. 그래서 이번 미국 동부 항만의 파업 소식은 우리나라 선사와 물류기업에 좋지 않은 소식이다. NY/NJ항이나 서배너항, 모빌항

74) KOTRA(검색일: 2024.7.23.)

등 미국 동부의 주요 항만에는 우리나라가 운영하고 있는 항만이 없다. 미국 동부 항만이 파업으로 마비된다면 우리나라 선박이 다시 뒷순위로 밀려나 대기가 길어지는 것은 불을 보듯 뻔한 현상일 것이다. 만약 2010년대 현대상선이 LA항에 CUT 터미널을 운영했던 것처럼 미국 동부 항만에 1개 이상의 터미널을 운영하고 있었다면 이러한 문제는 해결되었을 가능성이 크다.

이에 본 절에서는 미국 동부 항만에 우리나라가 운영하는 터미널이 있을 경우의 효과를 실험을 바탕으로 추측해 보고자 한다.

1) 미국 동부 항만 파업

앞서 언급하였다시피 ILA는 2024년 10월 1일 파업을 예고했다. 2023년 미국 서부항만에서는 노사 갈등과 태업으로 인해 120억 달러 이상의 무역이 중단됐으며, 적체된 컨테이너를 정리하는 데 수개월이 소요되었다고 한다.⁷⁵⁾ 본 연구는 미국 동부 파업이 물류에 큰 영향을 미칠 것으로 예상하고 이를 살펴보기 위해 일반적이지 않은 상황의 데이터를 가정하여 비교해 보았다.

본 연구에서는 다음 <표 4-1>과 같이 미국 동부 항만 파업으로 인해 NY/NJ항, 서배너항, 모빌항의 운송비, 운송시간이 각각 200달러, 2주 증가하는 것으로 가정하였다. 또한 운송 가용량도 기존 40 팔레트에서 20 팔레트로 50% 감소하는 것으로 가정하였다.

75) KOTRA(검색일: 2024.7.23.)

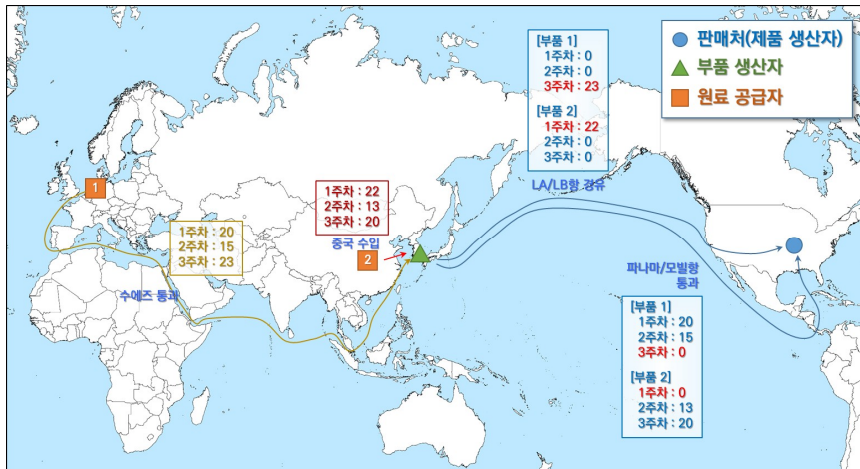
〈표 4-1〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})(미 동부 파업 I)

판매처	부품 생산자	운송비(달러)	운송시간(주)	가용량(팔레트/기간)
미 동부	한국(LA/LB항)	753	3	40
	한국(NY/NJ항)	638 → 838	5 → 6	40 → 20
	한국(서배너항)	527 → 727	5 → 6	40 → 20
	한국(모빌항)	509 → 709	5 → 6	40 → 20

자료: 저자 작성

실험 결과 한국에서 미국 동부 판매처로 수출하는 물량 중 일부는 용량 제약으로 인해 비용이 높은 LA/LB항을 거쳐 수출하고 있는 것으로 분석하였다. 총 비용은 97,964달러로 일반적인 상황 72,488달러 대비 30% 이상 증가하였지만, 미국 동부 항만 파업으로 인해 시간은 증가하고 운송 가용량은 줄어들었다.

〈그림 4-1〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 I)



자료: 저자 작성

〈표 4-2〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 I - 부품 발주량 및 생산자)

판매처	부품	기간(주)	주문량	발주량	부품 생산자 및 경유지
미 동부	부품 1	1	20	20	한국(모빌항)
		2	15	15	한국(모빌항)
		3	23	23	한국(LA/LB항)
	부품 2	1	22	22	한국(LA/LB항)
		2	13	13	한국(모빌항)
		3	20	20	한국(모빌항)

자료: 저자 작성

2) 우리나라 선사 터미널 운영

만약 우리나라 선사가 운영하는 터미널이 있었다고 가정한다면 결과는 달라졌을 것이다. 다음 〈표 4-3〉과 같이 NY/NJ항에 우리나라 선사가 운영하는 터미널이 있다고 가정한다면, 우리나라 선박을 먼저 접안함에 따라 운송비, 운송시간, 가용량에 변화가 없을 것이다. 본 연구는 이러한 NY/NJ항 상황을 고려해 실험하였으며, 〈그림 4-2〉와 같은 결과를 도출했다.

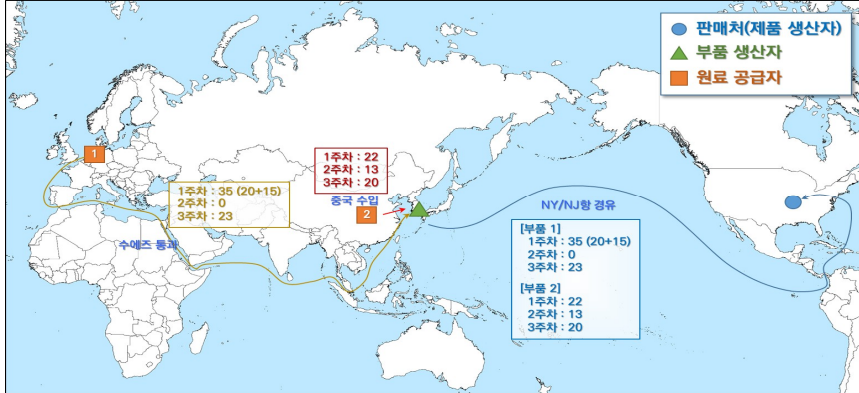
〈표 4-3〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})(미 동부 파업 II)

판매처	부품 생산자	운송비(달러)	운송시간(주)	가용량(팔레트/기간)
미 동부	한국(LA/LB항)	753	3	40
	한국(NY/NJ항)	638 → 638	5 → 5	40 → 40
	한국(서배너항)	527 → 727	5 → 6	40 → 20
	한국(모빌항)	509 → 709	5 → 6	40 → 20

자료: 저자 작성

그 결과, 다음 〈그림 4-2〉와 〈표 4-4〉와 한국에서 미국 동부 판매처로 수출하는 모든 물량을 NY/NJ항을 통해 수출하는 것으로 도출되었다. 총비용은 87,065달러이며, 이는 우리나라 선사가 운영하는 터미널이 있기 때문에 가능한 결과로 항만 파업과 함께 해외 거점 항만 개발의 필요성을 보여주고 있다.

〈그림 4-2〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 II)



자료: 저자 작성

〈표 4-4〉 실험 결과(미국 동부 항만 파업 II - 부품 발주량 및 생산자)

판매처	부품	기간(주)	주문량	발주량	부품 생산자 및 경유지
미 동부	부품 1	1	20	35	한국(NY/NJ항)
		2	15	-	한국(NY/NJ항)
		3	23	23	한국(NY/NJ항)
	부품 2	1	22	22	한국(NY/NJ항)
		2	13	13	한국(NY/NJ항)
		3	20	20	한국(NY/NJ항)

자료: 저자 작성

종합적으로 다음 〈표 4-5〉와 같이 미국 동부 항만 파업 시 우리나라 선사가 운영하는 터미널의 존재 여부에 따라 그 결과가 달라지는 것을 알 수 있었으며, 이는 해외 거점 항만 개발을 시사하는 것으로 볼 수 있다.

〈표 4-5〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(미국 동부 항만 파업)

시나리오	변동 상황 가정(달러, 주, 팔레트/주)			총비용 (달러)	결과
	운송비	운송 시간	수출가용량		
일반적인 상황	509	5	40	72,488	모빌항 이용
(리스크 발생) 미국 동부 파업	200달러 증가	5 → 6	40 → 20	97,964 (135.1%)	운송 가용량이 많은 LA/LB 항으로 일부 화물 이동
(정책 적용) 해상 무역로 다양화	우리나라 선사 터미널 운영			87,065 (120.1%)	우리나라 선사가 운영하여 운송비가 저렴하고 가용량 이 많은 NY/NJ항 이용
	638	5	40		

자료: 저자 작성

2. 해상 무역로 다양화 정책

본 절에서는 해상 무역로의 다양화 정책 효과를 분석하였다. 분석 대상은 수에즈 운하 및 홍해 마비, 파나마 운하 가뭄 등이며 일반적인 상황과 물류공급망 리스크 발생 후의 상황을 비교·분석하였다.

1) 수에즈 운하 및 홍해 마비

앞의 3장 실험에서 살펴보았듯이 일반적으로 부품 1을 유럽에서 수에즈 운하를 통해 수입함으로써 총 72,488달러의 물류비용이 발생하는 것으로 분석되었다. 하지만 수에즈 운하나 홍해가 마비되어 이를 통과하지 못하게 된다면 상황은 달라진다.

본 연구에서는 희망봉 경로가 있을 경우와 희망봉 경로가 없어 수에즈에서 대기할 경우의 상황을 비교했으며, 이를 통해 해상 무역로 다양화 정책의 중요성을 살펴보았다.

(1) 희망봉 우회 경로 이용

2021년 3월 발생했던 에버 기븐호 좌초 사고는 수에즈 운하를 통과하는 선박들에 시간과 비용과 관련하여 큰 피해를 준 사건이었다. 최근에는 홍해 인근 국가들 간의 전쟁과 분쟁으로 인해 수에즈 운하의 이용에 차질이 발생하고 있으며, 급기야 머스크와 같은 대형 선사들은 희망봉을 우회하는 결정을 내렸다.

이러한 사고나 사건은 수에즈 운하의 가용량을 감소시키고 운송시간과 비용은 증가시킨다. <표 4-6>은 일반적인 상황과 비교하여 수에즈 마비 시 운송비와 운송기간, 운송가용량이 달라지는 상황을 나타내고 있다. 일반적인 상황에서 수에즈 운하의 운송 가용량은 기간당 50 팔레트였지만 항만 마비 시 20으로 줄고, 운송시간은 기존 9주에서 10주로, 비용은 기존 72달러에서 80달러로 증가하는 것으로 가정하였다.

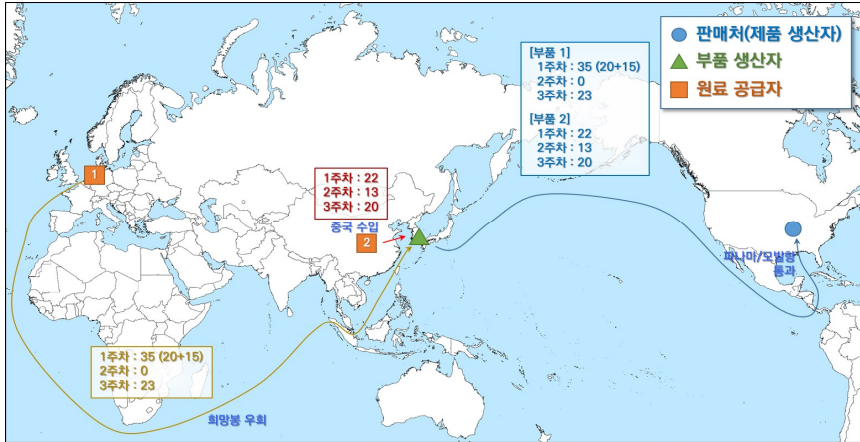
<표 4-6> 변경된 운송비(MT_{ij}) 및 운송기간(MTL_{ij}), 운송가용량(MTL_{ij})(수에즈 마비)

부품 생산자	원료공급자	운송비(달러)	운송시간(주)	가용량(팔레트/주)
한국	유럽 1(수에즈)	72 → 80	9 → 10	50 → 20
	유럽 2(희망봉)	78	10	50
	유럽 3(북극항로)	102	7	50
	호찌민	40	2	50
	싱가포르	45	2	50
	상하이	39	1	50

자료: 저자 작성

그 결과로 <그림 4-3>과 같이 부품 1의 원료공급자가 기존 유럽 1(수에즈 운하)에서 유럽 2(희망봉 우회)로 변경되었으며, 비용 또한 72,836달러로 증가하였다. 이는 수에즈를 통해 운송할 수 있는 가용량이 줄어든 반면, 비용과 시간이 증가함에 따라 수에즈 마비 시 선사들이 언제 재가동될지 모르는 수에즈를 대신해 안정적인 희망봉으로 우회했던 결과와 같았다.

〈그림 4-3〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 확보))



자료: 저자 작성

〈표 4-7〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 확보) - 원료공급자 및 부품별 생산량)

부품 생산자	부품	기간(주)	원료공급자	생산량	판매처 주문량
한국	부품 1	1	유럽 2(희망봉)	35	미 동부(35)
		2	-	-	-
		3	유럽 2(희망봉)	23	미 동부(23)
	부품 2	1	상하이	22	미 동부(22)
		2	상하이	13	미 동부(13)
		3	상하이	20	미 동부(20)

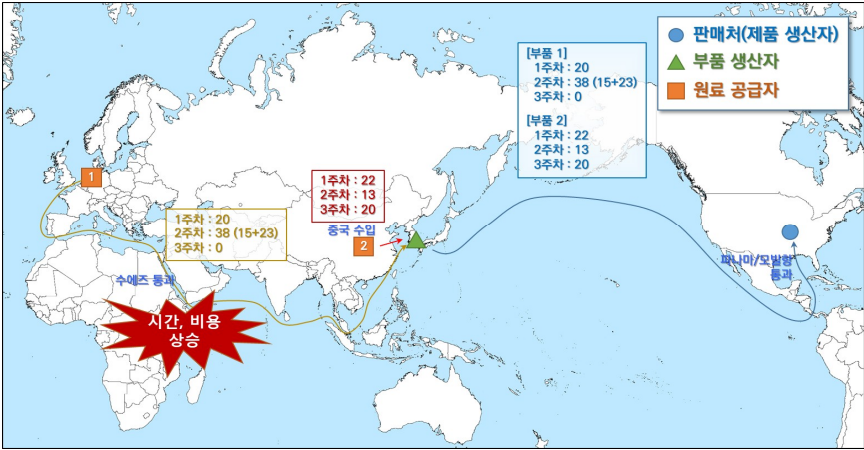
자료: 저자 작성

(2) 희망봉 우회 경로 부재

만약 희망봉 우회 경로를 마련해 놓지 않았다면 어떤 결과가 발생하는지 분석해 보았다. 그 결과 74,228달러의 물류비용이 발생하는 북극항로를 이용하는 것으로 도출되었다. 하지만 북극항로는 아직 개척되지 않았고, 운항할 수 있는 기간과 러시아 전쟁 등의 문제로 사용할 수 없기 때문에 이를 제외하였다.

그 결과 원료공급자와 부품 생산자 간 운송할 수 있는 경로가 존재하지 않는 것으로 분석하였다. 운송할 수 있는 경로는 수에즈 운하를 통한 경로만 있는데 한 번에 운송할 수 있는 가용량이 20으로 한정되어 있어 3주차에 필요한 23개의 팔레트 물량을 한 번에 운송할 수 없기 때문이다. 따라서 추가적인 비용도 지불하고 일주일 이상을 기다리더라도 다음과 같이 기존 수에즈 운하를 이용할 수밖에 없다.

〈그림 4-4〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 미확보))



자료: 저자 작성

〈표 4-8〉 실험 결과(수에즈 운하 마비(희망봉 경로 미확보) - 원료공급자 및 부품별 생산량)

부품 생산자	부품	기간(주)	원료공급자	생산량	판매처 주문량
한국	부품 1	1	유럽 1(수에즈)	20	미 동부(20)
		2	유럽 1(수에즈)	38	미 동부(38)
		3	-	-	-
	부품 2	1	상하이	22	미 동부(22)
		2	상하이	13	미 동부(13)
		3	상하이	20	미 동부(20)

자료: 저자 작성

이러한 상황들을 정리하면 다음 <표 4-9>와 같다. 희망봉이라는 대체 경로가 없는 경우에는 수에즈가 마비되어도 다른 대안이 없기 때문에 일주일 이상 대기해야 하며 추가 비용을 지출하더라도 수에즈 운하를 이용해야 한다. 하지만 희망봉을 우회하는 경로를 확보할 경우에 시간은 일반적인 상황보다 10일 정도 더 걸리겠지만 비용은 팔레트당 6달러씩 운송비만 증가하여 총 348달러 추가되는 것으로 분석되었다.⁷⁶⁾ 따라서 전체 비용이 72,836달러가 발생하여 일반적인 상황과 비슷한 결과를 얻을 것으로 예상된다.

<표 4-9> 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(수에즈 마비)

시나리오	변동 상황 가정(달러, 주, 팔레트/주)			총비용 (달러)	결과
	운송비	운송 시간	수입가용량		
일반적인 상황	72	9	50	72,488	수에즈 운하 이용
(리스크 발생) 수에즈 마비	72 → 80	9 → 10	50 → 20	74,088 (102.2%)	다른 대안이 없으므로 수에즈에서 1주일 이상 대기
(정책 적용) 해상 무역로 다양화	희망봉 우회 경로			72,836 (100.5%)	희망봉으로 우회하여 시간 및 비용 절감
	78	10	50		

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

2) 파나마 운하 가뭄

(1) 희망봉 우회 경로 부재

다음으로 기후변화로 인한 물류변화 상황을 가정하였다. 앞에서도 언급하였듯이 기후변화로 인해 파나마 운하의 가뭄이 발생하였으며, Spire Maritime에 따르면 2023년 10월부터 2024년 2월까지 3개월간 선박 통항량이 21% 감소한 것으로 분석되었다.⁷⁷⁾

76) 최건우(2024.7.), pp. 2-3.; 운하사용료가 감면되어 운송시간은 증가하나 운송비는 거의 차이나지 않는 것으로 분석됨

77) Eco Marine(2024.4.2.) (검색일: 2024.4.23.)

이에 본 연구는 이러한 파나마 가뭄 상황을 가정해 파나마 운하를 지나는 모빌항, 서배너항, NY/NJ항 항로의 가용량을 기존 40 팔레트에서 20 팔레트로 50% 감소시켜 실험을 진행하였다.

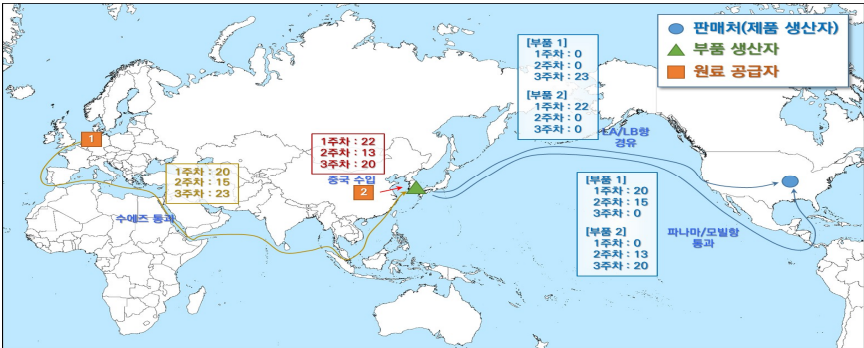
〈표 4-10〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송기간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})(파나마 가뭄)

판매처	부품 생산자	운송비(달러)	운송시간(주)	가용량(팔레트/기간)
미 동부	한국(LA/LB항)	753	3	40
	한국(NY/NJ항)	638	5	40 → 20
	한국(서배너항)	527	5	40 → 20
	한국(모빌항)	509	5	40 → 20

자료: 저자 작성

그 결과 〈그림 4-5〉, 〈표 4-11〉과 같이 기존 모빌항을 통해 전량 수입되던 부품들이 파나마 운하 용량 제약으로 인해 LA/LB항을 통해 일부 운송하고 있음을 확인하였다. 전체 비용은 84,364달러로 크게 증가하였는데 이는 원료공급에도 영향을 미쳐 〈표 4-12〉와 같이 기존 부품 1의 원료 중 1, 2주차 물량을 한꺼번에 주문했던 것을 판매처와 부품 생산자 간 용량 제한인 20 팔레트 이하로 주문하기 위해 각 주마다 주문하는 것으로 변경하였다.

〈그림 4-5〉 실험 결과(파나마 가뭄)



자료: 저자 작성

〈표 4-11〉 실험 결과(파나마 가뭄 - 원료공급자 및 부품별 생산량)

부품 생산자	부품	기간(주)	원료공급자	생산량	판매처 주문량
한국	부품 1	1	유럽 1(수에즈)	20	미 동부(20)
		2	유럽 1(수에즈)	15	미 동부(15)
		3	유럽 1(수에즈)	23	미 동부(23)
	부품 2	1	상하이	22	미 동부(22)
		2	상하이	13	미 동부(13)
		3	상하이	20	미 동부(20)

자료: 저자 작성

〈표 4-12〉 실험 결과(파나마 가뭄 - 부품 발주량 및 생산자)

판매처	부품	기간(주)	주문량	발주량	부품 생산자 및 경유지
미 동부	부품 1	1	20	20	한국(모빌함)
		2	15	15	한국(모빌함)
		3	23	23	한국(LA/LB항)
	부품 2	1	22	22	한국(LA/LB항)
		2	13	13	한국(모빌함)
		3	20	20	한국(모빌함)

자료: 저자 작성

(2) 희망봉 우회 경로 이용

최근 파나마 운하 정체가 가속화됨에 따라 다양한 방안이 논의되고 있다. 이에 머스크는 파나마 운하 인근 항만을 철도로 잇는 랜드 브릿지 서비스를 개편한다고 하였다. 태평양에서는 파나마 발보아항을, 대서양은 만사니요항을 거점으로 하여 화물을 하역하고 철도를 이용해 운송하는 대안을 고민하고 있다. 이에 따라 추가 비용이 발생하겠지만 대기시간을 단축시켜 화주의 요구사항에 맞추고자 한다.

다른 대안으로 희망봉 우회 경로가 있다. 우리나라, 중국 등 동아시아 국가 대부분은 주로 태평양을 거쳐 미국 동부로 운송되는 항로를 이용하고

있다. 하지만 일부 대형 벌크 선박의 경우 거리는 멀지만 미국 동부에서 출발하여 희망봉을 거쳐 동아시아 국가로 운송되는 경로를 사용하고 있으며, 일부 컨테이너 선박도 희망봉을 우회하는 경로를 가지고 있다. 미국 동부에서 유럽을 거쳐 아시아로 오는 경로가 있는데, 이는 항공기 여객 운송의 환승 개념과 유사하여 많은 시간이 소요되고 비용은 비슷하다.

이에 본 연구는 일반적인 상황에서 한국-미국 간 희망봉 우회 경로가 있다고 가정한 후 실험을 진행하였다. 또한 정책 효과를 명확하게 판단할 수 있도록 파나마 운하가 대지진 등으로 인해 붕괴될 경우를 가정하고 파나마 운하를 지나는 모빌항, 서배너항, NY/NJ항의 가용량은 0, 희망봉 우회 경로의 가용량은 LA/LB항과 같은 40 팔레트로 하였다.

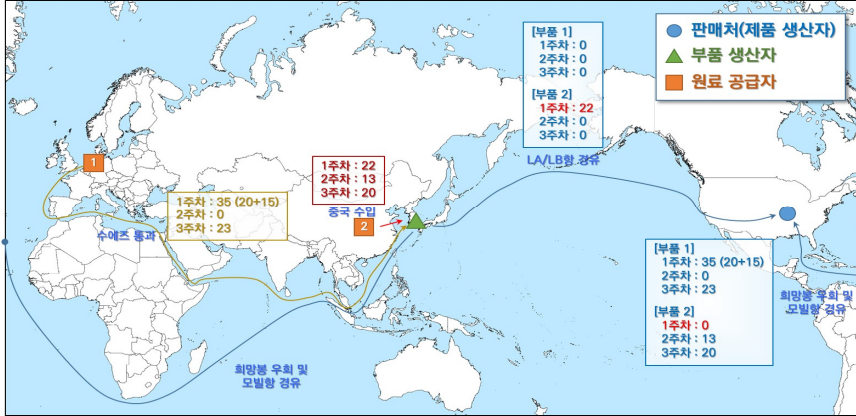
〈표 4-13〉 변경된 운송비(PT_{jp}) 및 운송시간(PTL_{jp}), 운송가용량(PTL_{jp})
(파나마 붕괴 및 희망봉 우회 추가)

판매처	부품 생산자	운송비(달러)	운송시간(기간)	가용량(팔레트/기간)
미 동부	한국(LA/LB항)	753	3	40
	한국(NY/NJ항)	638	5	40 → 0
	한국(서배너항)	527	5	40 → 0
	한국(모빌항)	509	5	40 → 0
	한국(모빌항 - 희망봉 우회)	509	7	40

자료: 저자 작성

이 경우 다음 〈그림 4-6〉과 같이 대부분의 모든 화물을 신규로 추가한 희망봉 우회 경로를 이용하는 것으로 도출하였다. 이는 기존 파나마 운하 경로의 운송이 불가능함에 따라 도출된 결과이며, 시간은 2주 정도 추가되고 총비용 77,856달러로 비용적인 측면에서 모두 LA/LB항을 경유하는 것보다 효과적이다. 만약 희망봉 우회 경로가 없다고 하면, 전량 LA/LB항으로 수출해야 하므로 100,060달러라는 큰 비용이 발생하기 때문에 희망봉 우회 경로의 필요성과 효과를 확인할 수 있는 결과로 판단한다.

〈그림 4-6〉 실험 결과(파나마 붕괴 및 희망봉 경로 경유)



자료: 저자 작성

〈표 4-14〉 실험 결과(파나마 붕괴 및 희망봉 경로 경유 - 원료공급자 및 부품별 생산량)

부품 생산자	부품	기간(주)	원료공급자	생산량	판매처 주문량
한국	부품 1	1	유럽 1(수에즈)	35	미 동부(35)
		2	-	-	-
		3	유럽 1(수에즈)	23	미 동부(23)
	부품 2	1	상하이	22	미 동부(22)
		2	상하이	13	미 동부(13)
		3	상하이	20	미 동부(20)

자료: 저자 작성

〈표 4-15〉 실험 결과(파나마 붕괴 및 희망봉 경로 경유 - 부품 발주량 및 생산자)

판매처	부품	기간(주)	주문량	발주량	부품 생산자 및 경유지
미 동부	부품 1	1	20	35	한국(모빌항-희망봉)
		2	15	-	-
		3	23	23	한국(모빌항-희망봉)
	부품 2	1	22	22	한국(LA/LB항)
		2	13	13	한국(모빌항-희망봉)
		3	20	20	한국(모빌항-희망봉)

자료: 저자 작성

앞의 결과를 정리하면 다음 <표 4-16>과 같다. 희망봉이라는 대체 경로가 없는 경우에 파나마 운하가 지연, 마비되면 일부 또는 전부를 LA/LB항으로 운송함으로써 많은 비용이 발생할 것이다. 하지만 희망봉 우회 경로가 확보되었을 경우 시간은 다소 소요되나 비용이 77,856달러로 소폭 증가하여, 희망봉 우회 경로가 없을 때의 100,060달러보다는 30%p 이상 절감할 수 있을 것으로 분석하였다.

<표 4-16> 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(파나마 가뭄 및 붕괴)

시나리오	변동 상황 가정(달러, 주, 팔레트/주)			총비용 (달러)	결과
	운송비	운송 시간	수출가용량		
일반적인 상황	72	9	50	72,488	모빌항 이용
(리스크 발생 I) 파나마 가뭄	509	5	40 → 20	84,364 (116.4%)	부족한 가용량을 처리하기 위해 일부 LA/LB항으로 운송
(리스크 발생 II) 파나마 붕괴	-	-	40 → 0	100,060 (138.1%)	파나마 운송이 불가능하여 모두 LA/LB항으로 운송
(정책 적용) 해상 무역로 다양화	희망봉 우회 경로			77,856 (107.4%)	희망봉으로 우회하여 시간 및 비용 절감
	509	7	40		

자료: 저자 작성

3. 대형 터미널 운영 및 대체 부두 구축 정책

다음으로 대형 터미널 운영 및 대체 부두를 구축하는 시나리오와 관련한 실험을 수행하였다. 이는 지진, 태풍과 같은 자연재해나 노동자들의 파업 등으로 인해 부두가 마비되었을 때를 가정하였으며, 대체 부두 유무에 따라 정책 효과를 분석하였다.

1) 자연재해로 인한 부산항 마비

본 연구에서는 다소 극단적일 수는 있으나 부산항이 마비되는 시나리오

를 설정, 실험을 진행하였다. 첫 번째 상황은 지진이나 태풍과 같은 자연재해와 얼마 전 발생한 PNC 부두 선박사고와 같은 사건으로 인해 부두 전체 또는 항만 전체가 마비되는 상황을 가정하였다.

이러한 경우 부산항에서 선적할 수 있는 가용량이 급격히 감소할 것이며, 선적을 못 하거나 비싼 비용을 지불하고 다른 경로로 우회하는 화물이 발생할 것이다. 본 시나리오는 가용량을 넘을 경우, 가용량 이상의 화물 운송비용이 2배 증가하며 부산항 수입 가용량은 50 팔레트에서 10으로, 수출 가용량은 40 팔레트에서 10으로 줄어들었다고 가정하였다.

결과적으로 변수 없이 일반적인 상황과 같은 결과가 나왔다. 부품 1의 수입은 수에즈 운하를, 부품 2 수입은 중국 상하이로 통해 수입한다. 만들어진 제품은 모빌항을 통해 수출하며, 부품 1의 1주차 주문과 2주차 주문은 따로 발주하는 것으로 도출되었다. 하지만 부산항의 가용량이 10 팔레트로 감소했기 때문에 가용량을 넘는 화물은 모두 2배의 비용이 발생하여 물류 총비용은 기존 72,488달러에서 103,352달러로 크게 상승하였다.

하지만 대체 부두가 구축되어 있을 경우 다른 결과가 도출되었다. 예를 들어 부산항 진해신항이 있다고 가정할 경우, 그리고 부산항 진해신항에 수입 가용량 50 팔레트, 수출 가용량 40 팔레트인 터미널이 있다면 확보한 대체 부두를 이용하기 때문에 비용은 72,488달러로 일반적인 상황과 같은 결과를 도출하였다. 따라서 대체 부두가 있을 경우 운송을 아예 하지 못하거나 막대한 운송비용을 지출하는 것을 막을 수 있기 때문에 효과적인 정책이라 할 수 있다.

〈표 4-17〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(자연재해 발생)

시나리오	변동 상황 가정(팔레트)		총비용(달러)	결과
	수입 가용량	수출 가용량		
일반적인 상황	50	40	72,488	-
(리스크 발생) 자연재해 발생	50 → 10	40 → 10	103,352 (142.6%)	수입 및 수출 용량 한계로 모든 주 문에 대해 운송 추가비용 발생
(정책 적용) 대체 부두 확보	대체 부두 사용		72,488 (100.0%)	대체 부두 확보로 인해 일반 상황과 같은 결과 도출
	50	40		

자료: 저자 작성

2) 파업으로 인한 부산항 마비

두 번째, 노동자 파업으로 인해 부산항이 마비된 상황을 실험하였다. 파업으로 인해 작업할 수 있는 인력이 부족하여 부산항의 수입, 수출 하역능력이 50% 이하로 감소한다고 가정하였으며, 이로 인해 한 번에 수입할 수 있는 화물량이 20 팔레트로 감소하고 수출할 수 있는 화물량도 25 팔레트로 감소한 경우를 가정하였다.

그 결과로 아래 〈표 4-18〉과 같이 리스크 발생 시 수출 용량이 20 팔레트로 감소함에 따라 부품 1의 3주차 주문과 부품 2의 1, 3주차 주문이 가용량을 넘기게 되어 추가적인 비용을 지출해 총 75,929달러의 물류비용이 발생하였다.

하지만 부산항 신항 2-5단계와 같이 무인 자동으로 운영되는 터미널의 경우 파업에 영향을 적게 받기 때문에 리스크 발생 시 수입 및 수출 가용량보다 큰 30 팔레트를 가용량으로 설정하였다. 그 결과 가용량을 초과하여 운송비용이 추가로 발생하는 주문 없이 한 번에 운송할 수 있어 비용이 절감되었다. 다만, 한 번에 운송할 수 있어 비용이 절감되었던 부품 1의 1주, 2주차 주문이 가용량 30 팔레트에 걸려 분리 발송됨에 따라 총 73,384달러의 물류비용이 발생하였다.

〈표 4-18〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(노동자 파업)

시나리오	변동 상황 가정(팔레트)		총비용(달러)	결과
	수입 가용량	수출 가용량		
일반적인 상황	50	40	72,488	-
(리스크 발생) 노동자 파업	50 → 25(50%)	40 → 20(50%)	75,929 (104.7%)	수출 용량 한계로 인해 일부 운송 추가 비용 발생 (부품 1-3주차, 부품 2-1/3주차)
(정책 적용) 자동화 터미널 운영	대체 부두 사용(자동화)		73,384 (101.2%)	파업에 영향을 적게 받는 자동화 터미널 운영으로 인해 일반 상황과 거의 유사한 결과 도출
	30	30		

자료: 저자 작성

4. 소결

4장의 정책별 실험 결과는 세 가지는 다음 〈표 4-19〉로 요약할 수 있다.

〈표 4-19〉 시나리오별 변동 사항 및 비용 변화(미국 동부 항만 파업)

시나리오		변동 상황 가정(달러, 주, 팔레트/주)			총비용(달러)	결과
		운송비	운송 시간	가용량		
일반적인 상황		509	5	40	72,488	수에즈, 모빌항(파나마) 이용
해외 거점 항만 개발	리스크 발생 (미국동부파업)	200달러 증가	5 → 6	40 → 20	97,964 (135.1%)	운송 가용량이 많은 LA/LB항으로 일부 화물 이동
	정책 적용 (거점항만이용)	638	5	40	87,065 (120.1%)	우리나라 선사가 운영하여 운송비가 저렴하고 가용량이 많은 NY/NJ항 이용
해상 무역로 다양화 (수에즈)	리스크 발생 (수에즈 마비)	72 → 80	9 → 10	50 → 20	74,088 (102.2%)	다른 대안이 없으므로 수에즈에서 1주일 이상 대기
	정책 적용 (희망봉 우회)	78	10	50	72,836 (100.5%)	희망봉으로 우회 하여 시간 및 비용 절감
해상 무역로 다양화 (파나마)	리스크 발생 I (파나마 가뭄)	509	5	40 → 20	84,364 (116.4%)	부족한 가용량을 처리하기 위해 일부 LA/LB항으로 운송
	리스크 발생 II (파나마 봉쇄)	-	-	40 → 0	100,060 (138.1%)	파나마 운송이 불가능하여 모두 LA/LB항으로 운송
	정책 적용 (희망봉 우회)	509	7	40	77,856 (107.4%)	거의 모든 화물을 희망봉으로 우회 하여 시간 및 비용 절감

시나리오		변동 상황 가정(달러, 주, 팔레트/주)			총비용 (달러)	결과
		운송비	운송 시간	가용량		
대형 터미널 운영 및 대체 부두	리스크 발생 (자연재해 발생)	-	-	(수입) 50 → 10 (수출) 40 → 10	103,352 (142.6%)	수입 및 수출 용량 한계로 모든 주 문에 대해 운송 추가 비용 발생
	정책 적용 (대체 부두 이용)	-	-	(수입) 50 (수출) 40	72,488 (100.0%)	대체 부두 확보로 인해 일반 상황과 같은 결과 도출
대형 터미널 운영 및 대체 부두 (자동화)	리스크 발생 (노동자 파업)	-	-	(수입) 50 → 25 (수출) 40 → 20	75,929 (104.7%)	수출 용량 한계로 인해 일부 운송 추가 비용 발생 (부품 1~3주차, 부품 2~1/3주차)
	정책 적용 (자동화 부두 이용)	-	-	(수입/수출) 30	73,384 (101.2%)	파업에 영향을 적게 받는 자동 화 터미널 운영으로 인해 일반 상황과 거의 유사한 결과 도출

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

먼저, 공급망 리스크가 없는 일반적인 상황에서는 수에즈 운하를 통해 원료를 수입한 후 이를 부품으로 생산하고, 파나마 운하를 통해 모빌항을 거쳐 미국 동부로 수출하는 경로를 선택하였으며 총비용은 72,488달러로 분석되었다.

다음으로, ILA(국제 항만 노동자 협회)의 미국 동부 항만 파업이 현실화 되는 상황을 가정, 실험하였다. 이 경우, 모빌항, NY/NJ항, 서배너항 등 미국 동부 항만을 경유하는 수출 운송비가 200달러 증가하여 비용이 저렴한 LA/LB항을 경유하는 경로를 선택하였으며, 총비용 97,964달러(35% 증가)로 분석하였다. 그러나 만약 NY/NJ항에 우리나라가 운영하는 터미널이 있다면 운송비나 운송 시간, 가용량 등에 영향이 없어 NY/NJ항을 경유하면서도 87,065달러(20% 증가)의 비용만이 발생한다. 이 실험을 통해 해외 거점 항만 개발의 효과를 가늠해 볼 수 있었으며, 미국 동부 항만 파업시 발생하는 비용을 15%p 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

다음으로, 해상 무역로 다문화 정책의 효과를 평가하기 위해 시나리오를 설정하고 실험을 진행했다. 먼저 원료 수입과 관련하여 수에즈 운하가 마비되는 상황을 가정하였다. 이는 최근 빈번해지고 있는 홍해 내 국가 간

갈등과 수에즈 운하 사고를 가정한 것으로, 비용과 시간 증가뿐만 아니라 운송 가능한 가용량도 감소한다. 대안이 없는 경우 운송 시간이 일주일 이상 지체되고, 운송비가 증가하여 총비용 74,088달러로 분석하였다. 그러나 세계 최대 선사인 머스크와 같이 희망봉을 우회하는 경로가 있다면, 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

부품 수출과 관련해서도 두 가지 시나리오를 설정하여 실험을 수행했다. 첫 번째, 현재도 영향을 받고 있는 파나마 가뭄 상황을 가정하여 실험했으며, 파나마 운하의 가용량이 50% 감소하는 경우를 다루었다. 이 경우 일부 부품을 LA/LB항으로 운송해야 하므로 총비용이 16% 증가한 84,364달러였다. 두 번째, 지진과 태풍으로 인해 파나마 운하가 완전히 붕괴되는 상황을 가정한 실험에서 파나마 운하를 통한 운송이 불가능해져 모든 부품을 LA/LB항으로 운송하게 되었으며, 총비용이 38% 증가한 100,060달러로 분석되었다. 하지만 수에즈 시나리오와 마찬가지로, 파나마 운하 붕괴에 대비한 희망봉 우회 경로가 확보되어 있었다면 총비용이 7% 증가한 77,856달러로 30%p 이상 절감할 수 있을 것이다. 이 실험을 통해 해상 무역로 다양화의 효과를 확인하였으며, 희망봉 우회 경로뿐만 아니라 북극항로 등 가능한 모든 대체 항로를 고민해야 할 필요성을 제시하였다.

마지막으로, 대체 부두 및 자동화 터미널 운영 효과에 관한 실험을 진행하였다. 태풍 매미와 같은 기후 재난으로 부산항이 마비되어 물동량 처리 능력이 감소하는 상황을 가정하였으며, 화물 처리 대기에 따른 추가 비용이 발생하여 물류비용이 43% 증가한 103,352달러로 예상하였다. 그러나 부산항 진해신항과 같은 대체 부두가 있다면, 추가 비용이 발생하지 않을 것이다.

또한 부산항에 파업이 발생한 상황을 가정한 실험에서는, 수입 및 수출 용량의 한계로 인해 일부 운송에 추가 비용이 발생하여 물류비용이 약 5%

증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 부산항이 자동화 터미널로 운영할 경우, 처리 능력에 영향을 덜 받아 물류비용 증가가 1%에 그칠 것으로 예상하였다. 이 두 가지 실험으로 대형 터미널 운영 및 대체 부두의 효과와 현실적인 정책 마련이 필요함을 확인하였다.

제2절 기업 정책별 효과 분석

앞의 1절에서는 정부 차원에서 추진할 수 있는 세 가지 정책 효과를 분석하였다. 이에 더해 공급망 리스크에 대응하기 위한 멀티 소싱, 리스크 완화 재고 유지 등과 같은 기업 정책이 필요하기 때문에 본 절에서는 기업의 정책별 효과를 분석하였다. 하지만 기업이 정책을 추진하기 위해서는 추가 비용이 발생할 것이기 때문에 국가는 기업에 정책·제도적인 지원을 해야 할 것이다.

1. 멀티 소싱

소싱 전략은 세 가지 기본 특성에 따라 구분할 수 있다. 첫째, 공급자 수이다. 이는 단일 공급자에게 소싱을 받을 것인지, 듀얼(dual) 공급자로부터 소싱을 받을 것인지, 멀티 소싱을 할 것인지에 대한 사항이다. 둘째는 공급자의 지리적 분포이다. 여기에는 지역 또는 국내에서 소싱을 받을 것인지, 국제적 또는 글로벌 소싱을 받을 것인지에 대한 문제이다. 셋째, 재고의 원칙에 관한 사항이다. 여기에는 재고를 위한 소싱인지, 적기 공급생산(JIT) 소싱 방식인지, 특정 방식의 소싱인지에 관한 사항이다. 여기에서는 첫째

사항에 해당하는 싱글, 듀얼, 멀티 소싱에 관한 내용을 살펴보려 한다.

이때 고려해야 할 사항은 적절한 공급자의 수를 결정하기 위한 목적으로 공급자의 제반 사항을 관리해야 한다. 공급자 기반을 줄임으로써 대량 주문(규모) 효과를 얻기 위해, 한 공급자에게 더 많은 양을 주문(싱글 소싱 전략)할 수 있다. 하지만 한 공급자에 의존하는 것은 큰 위험을 일으킬 수 있다.

싱글 소싱 전략은 효율성에 있어 많은 이점이 있지만 최근 다양한 이유로 공급망이 중단되고 있어 공급망 관리자는 이러한 린 소싱 전략(lean sourcing strategy)을 재고해야 한다. 싱글 소싱 전략은 비용 절감 효과가 있지만 때로는 중단 영향(disruption impact)으로 인해 그동안 절감한 비용을 능가하는 문제가 발생하기도 한다. 일본이나 태국의 공급자에 싱글 소싱을 했던 한 기업은 2011년 쓰나미와 홍수로 큰 어려움을 겪었다. 전 세계 많은 생산공장이 몇 달 동안 가동을 중단했었다. 인텔은 2011년 4분기 10억 달러의 매출 손실을 기록했다(Ivanov et al., 2019). 2010년 아이슬란드 화산 폭발로 인해 항공 운송이 중단되어 공급망에 차질을 가져온 적도 있었다. 2000년 미국 뉴멕시코주 앨버커키에 있는 필립스 반도체 공장에서 화재가 발생하여 주요 고객인 에릭슨이 2억 달러의 잠재적 수익 손실을 기록했다(Ivanov et al., 2019). 노키아도 중단으로 인해 영향을 받았지만 3일 이내에 대체 공급자를 찾았다. 하지만 중단과 새로운 공급업체를 찾는데 큰 비용을 사용했다. 싱글 소싱의 또 다른 위험은 제품 표준화와 관련이 있다. 단일 공급자가 다양한 모델의 제품에 사용되는 품목을 생산하는 경우 2011년 토요타의 경우처럼 재난의 영향이 공급망을 통해 매우 빠르게 파급될 수 있다. 이러한 이유로 삼성과 같은 기업들은 최소 두 군데의 공급자와 거래한다.

부품이나 모듈은 두 개 혹은 세 개 공급자와 협력하는 것이 합리적인 전략

일 수 있다. 싱글 소싱 전략과는 달리 이러한 전략은 듀얼 소싱 또는 멀티 소싱이라고 하며 원자재 흐름의 균형을 원활하게 하고 원자재 공급에 대한 리스크를 줄일 수 있다. 소싱 전략을 결정하기 위해서는 다양한 사항을 종합적으로 고려해야 한다. 중요하게 고려되어야 하는 사항으로는 수량(volume), 제품 다양성(product variety), 수요 불확실성(demand uncertainty), 조달 기간 중요성(lead time importance), 중단 및 기타 위험(disruption and other risk), 운송 비용(transportation cost), 제조 복잡성(manufacturing complexity), 조정 복잡성(coordination complexity), 판매 후 이슈(post-sales issues) 등이다.

또한 싱글 소싱의 장단점을 고려하여 공급자의 수를 결정하는 것은 합리적인 전략이 될 수 있으며, 이를 정리하면 다음 표와 같다.

〈표 4-20〉 싱글 소싱의 장단점

장점	단점
• 장기 계약 (long-term agreement) • 가격 안정성 (price stability) • 제품 개발 프로세스의 매우 초기 단계에서 공급업체 참여 가능 • 낮은 거래 비용 (low transaction cost) • 규모 효과 (scale effect)	• 비효율적인 가격 정책 (inefficient price policy) • 조달기간, 품질, 서비스 이슈 (lead time, quality, and service issue) • 많은 공급자와의 협력 부족

자료: 저자 작성

시나리오 4는 리스크가 발생하는 상황에서 멀티 소싱만을 사용하는 시나리오다. 부품 1에는 싱글 소싱을 사용하고, 부품 2는 멀티 소싱을 고려한다. 부품 2는 원료공급자로 상하이에 있는 시설을 먼저 고려하고, 가용하지 않으면 호찌민, 싱가포르 시설을 순서대로 고려한다. 대체 운송경로는 고려하지 않기 때문에, 유럽에서 한국으로의 운송에는 수에즈 운하를 경유하는 경로만이 선택되고 한국에서 미국으로의 운송에는 LA/LB항을 경유하는 경로만이 선택된다.

실험 반복 횟수와 결과 항목은 앞의 실험과 동일하다. 시나리오 4의 실험 결과를 시나리오 2의 실험 결과와 비교하면 멀티 소싱의 도입 효과를 추정할 수 있다. 리스크에 따른 공급 성능 영향도를 살펴보면 시나리오 4는 1.76으로, 시나리오 2의 1.75와 차이가 크지 않았다. 멀티 소싱은 부품 2에만 적용하는데 부품 2의 기준 원료공급자인 상하이 태풍만을 리스크로 고려한다. 상하이의 태풍 발생 평균 간격은 약 5~6월(168.46일), 평균 지속 기간은 1~3일로 공급망에 미치는 영향이 미약하므로 공급 성능에 관한 멀티 소싱 효과는 크지 않은 것으로 판단한다. 멀티 소싱 사용 횟수의 평균은 1.87로 나타났다(95% 신뢰구간은 1.37~2.37). 멀티 소싱에 따라 납기 준수율 평균, 조달기간 평균과 표준편차에 차이가 있었지만, 의미 있는 해석을 하기에는 부족하였다. 다만 멀티 소싱의 도입으로 인해 재고유지비는 15.05% 감소하였음을 알 수 있었다.

〈표 4-21〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 부품 공급량과 공급 성능 영향도

시나리오	부품 공급량 평균 (팔레트)			공급 성능 영향도
	부품 1	부품 2	합계	
2 (리스크 발생)	412.80 (175.35~650.25)	4,721.13 (4,607.57~4,834.69)	5,133.93	1.75
4 (멀티 소싱)	444.30 (201.86~686.74)	4,664.47 (4,538.87~4,790.07)	5,108.77	1.76

주: 괄호 안의 값은 95% 신뢰구간
자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 4-22〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 납기 준수율

시나리오	납기 준수율 평균 (%)	
	부품 1	부품 2
2 (리스크 발생)	88.43 (78.69~98.17)	98.19 (97.5~98.88)
4 (멀티 소싱)	88.15 (78.45~97.85)	96.94 (95.98~97.9)

주: 괄호 안의 값은 95% 신뢰구간
자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 4-23〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 조달기간

시나리오	조달기간 평균 (일)		조달기간 표준편차 (일)	
	부품 1	부품 2	부품 1	부품 2
2(리스크 발생)	63.66	21.03	23.33	1.16
4(멀티 소싱)	64.37	21.18	22.81	1.74

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 4-24〉 시나리오 2와 4의 실험 결과 - 재고유지비

시나리오	재고유지비 평균 (달러)	기준 대비 비율* (%)
2(리스크 발생)	4,714,852	100.00
4(멀티 소싱)	4,005,112	84.95

주: * 시나리오 2의 재고유지비 평균을 기준으로 했을 때의 비율

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

2. 리스크 완화 재고

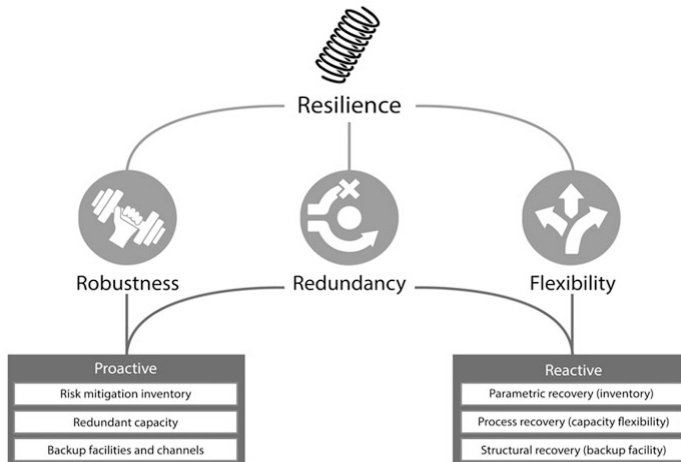
기업은 재고 관리를 하는 데 있어 예측할 수 없는 변동에 따른 수요를 충족시키고 제품의 부족을 줄이기 위해 안전재고(safety inventory)를 보유한다. 안전재고는 공급망 관리자가 불확실성이 있는 상황에서 제품의 가용성을 높이는데 도움이 될 수 있다. 안전재고를 고려하는 경우 부족 비용이나 초과 비용이 발생할 수도 있다. 안전재고 수준을 산출하는 과정은 미리 결정된 서비스 수준을 기반으로 한다. 안전재고를 고려하는 것은 너무 많은 재고를 보유하는 데 따른 비용과 재고 부족으로 인한 판매 기회비용 간의 균형을 맞추는 것을 의미한다.

공급망 관리의 주요 목표 중 하나는 공급망의 효과(판매 및 서비스 수준)와 효율(공급망 비용)을 고려하여 전체 공급망의 성과를 높이는 것이다. 공급망은 계획 단계에서 불확실성이 존재하고 실행 단계에서 중단될 수 있는 리스크가 있다. 이러한 문제가 야기되지 않으려면 교란 및 중단에 대한 공

급망 보호와 효율적인 대응이 필요하다. 따라서 공급망은 기본 속성을 유지하고 안정적인 공급망 확보를 위해 안정적이고 강건하며 탄력성이 있도록 계획되어야 하고, 교란과 중단이 발생할 경우 복구 조치를 통해 계획된 성능을 달성할 수 있도록 조정해야 한다.

다음 <그림 4-7>은 공급망의 탄력성(resilience), 강건성(robustness), 중복성(redundancy), 유연성(flexibility) 간의 관계를 보여주고 있다. 공급망의 탄력성을 확보하는 방안으로 공급망의 중복성을 고려할 수 있는데 이는 두 가지 영역(강건성 확보를 위한 중복과 유연성을 확보하기 위한 중복)에서 사용할 수 있다. 첫째, 특정 이벤트 발생에 따른 교란 영향으로부터 보호하기 위한 목적이다. 이 문제는 공급망 강건성이 관련된다. 둘째, 실제 실행 환경에서 빠르고 유연하게 대응할 수 있도록 다양한 공급망 경로를 확대하기 위해 중복성을 고려하는 것이다. 이 문제는 공급망 유연성과 관련이 있다.

<그림 4-7> 탄력성 통제 요소



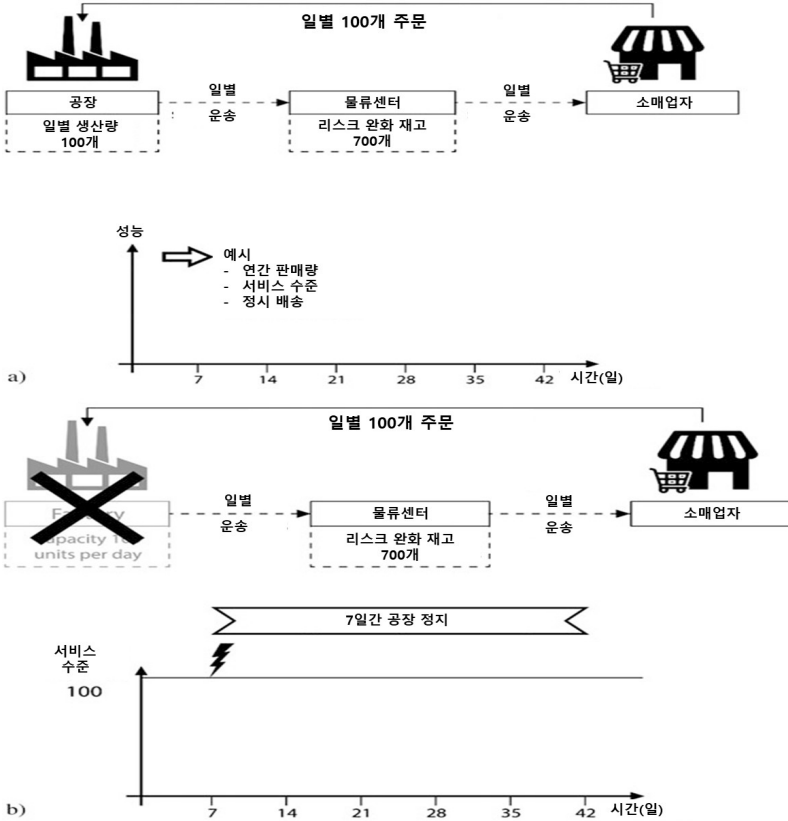
자료: Ivanov et al.(2019), p. 468.

리스크 완화 재고는 공급망의 강건성을 확보하기 위한 전략 중 하나이다. 앞서 살펴본 안전재고와는 다른 개념으로 공급망 중단 리스크를 완화하는 방안으로 볼 수 있다. 리스크 완화 재고는 불확실성 하에서 공급망 설계와 계획을 위한 접근 방법이 관련된다.

리스크 완화 재고는 공급망에 발생할 수 있는 리스크를 감안하고 일정 기간 수요를 고려하여 부품과 제품의 공급이 중단되는 것을 막기 위한 재고라고 할 수 있다. 리스크 완화 재고는 안전재고와 마찬가지로 재고가 증가하게 되어 중복성이 강화되고, 이는 잠재적으로 판매 및 서비스 수준 증가로 이어지는 이점이 생기게 된다. 하지만 중복 요소가 높아지는 것으로 인해 비용이 증가하는 단점이 발생한다.

다음 <그림 4-8>에서 a)는 공장, 창고, 소매업체를 포함한 공급망을 제시하고 있다. 공장의 일일 생산능력은 100개이고 매일 100개의 주문이 이루어진다. 다만, 일괄 처리(batching)를 고려하지 않고 일일 배송이 이루어진다고 가정한다. 창고는 사전에 대응하기 위한 탄력성 정책으로 700개의 리스크 완화 재고를 보유하고 있다. b)는 일주일 동안 공장 생산이 중단되더라도 700개의 리스크 완화 재고와 100개의 일일 수요를 고려하면 중단으로 인한 서비스 수준, 즉 전체 주문에 대한 정시 배송 주문 비율 측면에서 공급망 성능에 전혀 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

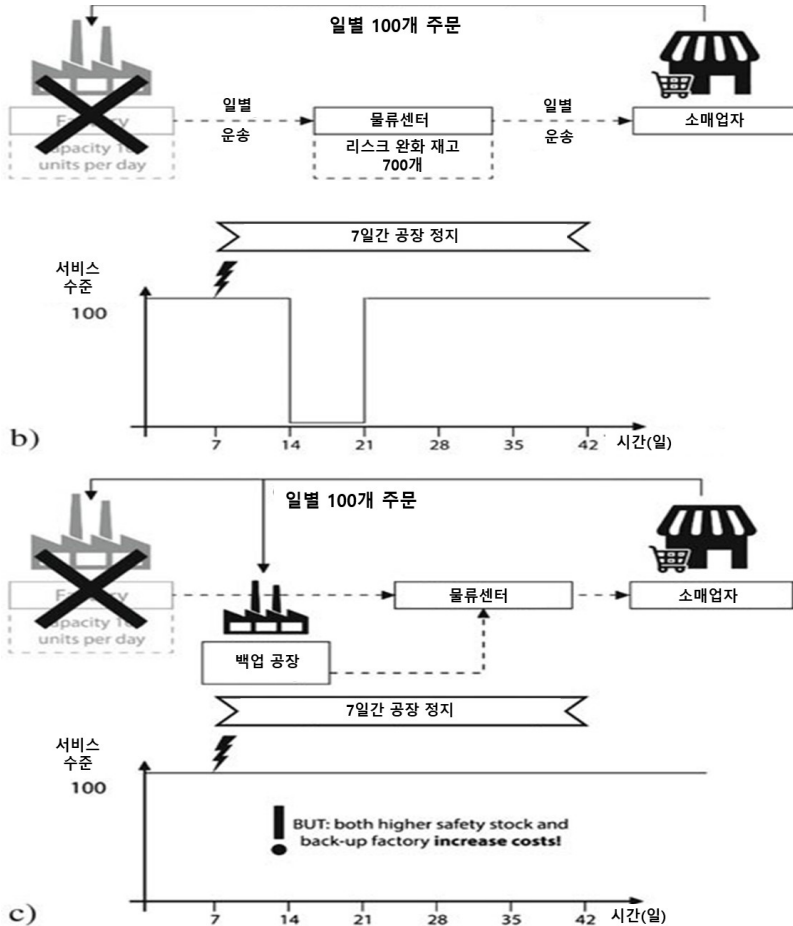
〈그림 4-8〉 사전 대응 정책(리스크 완화 재고)을 갖춘 공급망



자료: Ivanov et al.(2019), p. 471.

다음 〈그림 4-9〉는 공급망 성과와 회복 분석의 일반적인 프레임워크를 묘사하고 있다. 다양한 복구 정책이 공급망 성능에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. b)는 공장이 14일 동안 생산을 중단하는 경우 리스크 완화 재고가 일주일만 준비되어 있어 서비스 수준이 떨어지는 문제가 발생한다. c)는 백업 공장이 있는 경우 파급 효과가 완화되고 서비스 수준이 유지되는 것을 알 수 있다. 그러나 리스크 완화 재고와 백업 공장은 모두 공급망 비용을 증가시킨다.

〈그림 4-9〉 사전 대응 정책(백업 공장)을 갖춘 공급망



자료: Ivanov et al.(2019), p. 472.

본 연구에서 설정한 시나리오 5는 리스크가 발생하는 상황의 대응 정책으로 리스크 완화 재고만을 사용하는 경우이다. 리스크 완화를 위해 한국의 부품생산자, 미국의 판매처에 대한 (s, S) 재고 정책에서 S값을 기존 값에서 각각 50% 증가시킨다고 가정했다. 멀티 소싱은 고려하지 않기 때문에 부품 1의 원료공급자는 유럽, 부품 2의 원료공급자는 상하이 시설만을

선택한다. 대체 운송경로 역시 고려하지 않기 때문에, 유럽에서 한국으로의 운송에는 수에즈 운하를 경유하는 경로만이 선택되고 한국에서 미국으로의 운송에는 LA/LB항을 경유하는 경로만이 선택된다.

실험 반복 횟수와 결과 항목은 앞의 실험과 동일하다. 시나리오 5의 실험 결과를 시나리오 2의 실험 결과와 비교하면 리스크 완화 재고의 도입 효과를 추정할 수 있다. 시나리오 5의 공급 성능 영향도는 1.56으로 리스크에 따른 공급 성능의 영향이 크게 나타나고 있지만, 시나리오 2의 1.75보다 많이 줄어들었음을 알 수 있다. 시나리오 2에 비해 성능이 향상된 요인은 시나리오 5에서 부품 1의 공급량이 시나리오 2에 비해 140.25% 증가하였다는 사실이다. 또한 시나리오 5에서 부품 1의 조달기간 평균은 시나리오 2에 비해 33.87%(21.56일) 감소하였고 표준편차는 비슷한 수준이다. 이에 따라 시나리오 5에서 부품 1의 납기 준수율 평균은 시나리오 2에 비해 6.67% 증가하였다. 특히 시나리오 5의 납기 준수율 평균은 부품 1과 부품 2 모두 95% 이상으로 나타나 리스크가 발생하지 않았던 시나리오 1과 유사한 수준으로 회복되었다. 시나리오 1의 납기 준수율 평균은 부품 1의 경우 95.44%, 부품 2의 경우 97.94%였다. 다만 리스크 완화 재고의 도입으로 인해 재고유지비는 3.87% 증가하였음을 알 수 있다.

〈표 4-25〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 부품 공급량과 공급 성능 영향도

시나리오	부품 공급량 평균 (팔레트)			공급 성능 영향도
	부품 1	부품 2	합계	
2 (리스크 발생)	412.80 (175.35~650.25)	4,721.13 (4,607.57~4,834.69)	5,133.93	1.75
5 (리스크 완화 재고)	991.73 (704.47~1,278.99)	4,774.70 (4,679.49~4,869.91)	5,766.43	1.56

주: 괄호 안의 값은 95% 신뢰구간
자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 4-26〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 납기 준수율

시나리오	납기 준수율 평균 (%)	
	부품 1	부품 2
2 (리스크 발생)	88.43 (78.69~98.17)	98.19 (97.5~98.88)
5 (리스크 완화 재고)	95.10 (90.76~99.44)	97.71 (96.85~98.57)

주: 괄호 안의 값은 95% 신뢰구간
자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 4-27〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 조달기간

시나리오	조달기간 평균 (일)		조달기간 표준편차 (일)	
	부품 1	부품 2	부품 1	부품 2
2(리스크 발생)	63.66	21.03	23.33	1.16
5(리스크 완화 재고)	42.10	21.08	28.74	1.03

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

〈표 4-28〉 시나리오 2와 5의 실험 결과 - 재고유지비

시나리오	재고유지비 평균 (달러)	기준 대비 비율* (%)
2(리스크 발생)	4,714,852	100.00
5(리스크 완화 재고)	4,897,396	103.87

주: * 시나리오 2의 재고유지비 평균을 기준으로 했을 때의 비율
자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

3. 소결

지금까지 공급망 리스크 상황에서 멀티 소싱과 리스크 완화 재고 도입 등 기업 차원에서 추진할 수 있는 정책 효과를 시뮬레이션 실험, 검토하였다. 설계된 시나리오에 따라 정책 도입 효과가 잘 나타난 경우도 있지만, 그렇지 않은 경우도 있었다. 그러나 주요 대응 정책들이 공급망 리스크를 극복할 수 있는 합리적인 해결책임을 확인할 수 있었다.

특히, 멀티 소싱의 경우 도입 효과가 크게 나타나지 않았다. 이는 기존 공급망에 결정적인 리스크가 발생하지 않았기 때문이다. 멀티 소싱은 부품 2에만 적용하였으며, 부품 2의 주원료 공급지인 상하이에서 발생한 리스크 역시 미미했기 때문에 큰 효과를 발휘하지 못하였다.

반면, 리스크 완화 재고는 재고 유지 비용이 상승함에도 불구하고 공급망 리스크를 극복할 수 있는 효과적인 방안으로 확인하였다. 특히 부품 1의 조달 기간을 단축함으로써 공급량 회복과 납기 준수율 단축에 기여할 수 있었다. 리스크 완화 재고를 확보하기 위해 다양한 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 한국의 부품 생산자와 미국의 판매처에 대한 (s, S) 재고 정책에서 S 값을 기존 값보다 각각 50% 증가시키는 것으로 가정하였다.

〈표 4-29〉 전체 시나리오의 부품 공급량 평균과 공급 성능 영향도

시나리오	부품 공급량 평균 (팔레트)			공급 성능 영향도
	부품 1	부품 2	합계	
1(일반)	4,287.30	4,693.10	8,980.40	-
2(리스크 발생)	412.80	4,721.13	5,133.93	1.75
3(리스크 발생-희망봉)	3,893.67	4,706.60	8,600.27	1.04
4(멀티 소싱)	444.30	4,664.47	5,108.77	1.76
5(리스크 완화 재고)	991.73	4,774.70	5,766.43	1.56

자료: 실험 결과를 바탕으로 저자 작성

본 절에서는 공급망 리스크 상황에서 두 가지 기업 대응 정책의 도입 효과를 시뮬레이션 실험을 통해 검토하였다. 그러나 단독으로 대응 정책을 사용하는 것보다는 상황에 따라 선택, 복합적으로 활용하는 것이 공급망 리스크 대응에 더욱 합리적인 방안일 수 있다. 다만, 여러 대응 정책을 동시에 사용할 경우 효과가 중복되어 과도한 투자가 이루어질 수 있으며, 각 정책이 서로 부정적인 영향을 미쳐 효과가 상쇄될 가능성도 존재한다. 따라서 여러 대응 정책을 함께 사용할 때는 각 정책의 순효과를 신중하게 검

증할 필요가 있다.

또한, 기업 차원의 공급망 리스크 대응 정책은 추가적인 비용 발생을 초래할 수 있다. 기업은 비용 절감을 목표로 하고 있는데 이와 같은 정책 도입으로 인해 비용이 증가할 경우, 기업이 공급망 대응 정책을 도입하는 데 어려움을 겪을 수 있다. 우리는 이미 공급망 리스크로 인한 국가 공급망의 붕괴를 경험한 바 있다. 기업의 공급망 안정화는 곧 국가 공급망의 안정화와 경쟁력 강화로 이어지기 때문에 정부는 기업이 정책을 적극적으로 도입할 수 있도록 정책적·제도적 지원 방안을 마련해야 한다.

05

연구결과와 정책제언

제1절 연구 요약 및 결과

전 세계는 전쟁, 기후 위기, 미국 대선 등 다양한 물류 공급망 리스크에 직면해 있다. 러시아·우크라이나 전쟁은 2022년 2월에 시작되어 3년째 접어들고 있지만, 종식의 기미가 보이지 않고 있으며, 이스라엘은 하마스 전쟁뿐만 아니라 이란과도 분쟁을 시작했다. 지구온난화로 인한 기후 위기는 태풍, 폭설, 폭우, 가뭄 등을 발생시켜 물류가 마비될 정도이다.

정치적으로도 물류 공급망은 불안정한 요소를 가지고 있다. 미국은 IRA 법, CHIPS법 등 자국 중심의 정책을 발표하고 있으며, 특히 2024년 11월에 예정된 미국 대선 결과에 따라 법안들이 더욱 강화될 것으로 예상된다. 민주당의 해리스 후보가 당선될 경우, 현 바이든 정부의 기조를 따를 것이며, 공화당의 트럼프 후보가 당선된다면 더 강력한 자국 중심 정책이 추진될 것이다. 또한 대중국 관세 정책이 강화될 가능성이 커짐에 따라 공급망 재편이 절실한 시점이 되었다.

본 연구에서는 공급망 리스크를 정의하고, 리스크에 대응하기 위한 정책 대안을 수립하기 위해 혼합정수계획법, 메타휴리스틱 모형, 시뮬레이션 모

형을 개발하였다. 특히, 개발된 모형을 기반으로 정부와 기업이 추진할 수 있는 여러 정책의 효과를 분석함으로써 급변하는 물류 공급망 환경화에 대응하기 위한 모형과 정책을 제시하는 데 연구적, 정책적으로 기여하였다.

본 연구의 2장에서는 선행 연구를 분석하여 기존 연구와 차별성을 언급하였다. 또한 문헌 조사, 인터뷰, SWOT 분석으로 분석 방법론을 선정하였으며 글로벌 공급망 리스크 대응 정책 효과 분석 모형을 정의하였다.

3장에서는 기존 문헌을 조사하여 공급망 리스크를 정의하고 이를 해결하기 위한 정책을 분석한 후 혼합정수계획법, 메타휴리스틱 모형, 시뮬레이션 모형 등 정책 효과 분석 모형을 개발하였다. 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형은 글로벌 공급망 리스크 발생 시 즉각적인 대안을 도출할 수 있도록 개발하였으며, 실험을 통해 일반적인 상황과 공급망 리스크 발생 시 어떤 대안이 선택되는지를 분석하였다. 시뮬레이션 모형은 앞의 두 모형과 달리, 리스크 발생 시에도 안정적인 대안을 제시할 수 있도록 개발하였다. 시뮬레이션 모형 역시 앞의 두 모형과 마찬가지로 정책 효과를 분석할 수 있도록 설계하였다.

4장에서는 개발된 모형들을 활용하여 정책 효과를 분석하였다. 먼저 1절에서는 혼합정수계획법과 메타휴리스틱 모형이 정부 차원의 세 가지 대응 정책에 어떤 효과를 가져올 수 있는지를 실험하였다. 이를 위해 공급망 리스크 발생 전후의 결과를 비교·분석하였고, 리스크 발생 후에는 정책이 시행된 경우와 시행되지 않은 경우를 비교하여 그 효과를 평가하였다. 2절에서는 안정적인 물류 공급망 설계를 위한 시뮬레이션 모형을 실험하였으며, 1절과 달리 멀티 소싱, 리스크 완화 재고 등 기업 차원에서 추진 가능한 두 가지 정책 시나리오를 설정하여 실험하였다.

본 연구에서는 모형 개발 및 실험을 통해 글로벌 공급망 리스크 대응 정책의 필요성과 효과를 분석하였다. 실험 결과, 정부 차원의 세 가지 정책과

기업 차원의 두 가지 정책 모두 공급망 리스크 발생에 효과적이라는 결론을 도출하였다. 해외 거점 항만 개발을 통해 해당 국가의 항만 파업 시 우리나라 선박을 우선적으로 처리할 수 있으며, 해상 무역로 다양화를 통해 수에즈 및 파나마 운하의 마비 또는 지연 시 피해를 최소화할 수 있었다. 또한, 대형 터미널 운영 또는 대체 부두 개발을 통해 자연재해나 노동자 파업으로 인한 물류 공급망 지연을 방지할 수 있음을 확인하였다. 이렇게 다양한 실험을 통해 우리는 정책 적용 시 효과에 대해 분석할 수 있었으며, 나아가 다양한 정책들에 대해 효과를 분석할 수 있는 기반을 확보할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 정책 분석 모형은 주어진 데이터를 기반으로 그 효과가 어느 정도인지 정량적으로 분석할 수 있다는 점에서 활용도가 높을 것으로 판단한다. 하지만 실제 결과와 비교·분석을 통해 데이터를 쌓고 이를 기반으로 보정의 과정을 거치며 일반적으로 통용될 수 있는 모형으로 발전할 수 있도록 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

또한 대응 정책이 효과적으로 추진되기 위해서는 국가적 차원의 지원 정책이 필요하다. 정부와 기업이 정책을 추진하는 데에는 그에 상응하는 비용과 시간, 상호 간의 노력과 협의가 필요하며 다양한 정책적 제언은 2절에서 다루고자 한다.

제2절 기여점 및 활용방안

1. 글로벌 공급망 지원 물류전략 수립

글로벌 공급망 리스크에 적극적으로 대응하기 위해서는 국가 차원의 글로벌 물류 전략 수립이 필수적이다. 현재 우리나라는 해운 및 항만 분야는 해양수산부, 항공 및 국내 물류는 국토교통부로 각각 분리되어 있으며, 각 부처가 독자적으로 전략을 수립하고 정책을 집행하고 있다. 그러나 국제 물류의 경우, 국내외 물류산업이 밀접하게 연관되어 있음에도 불구하고 이를 총괄하는 조직이나 국가 차원의 통합 전략이 부재한 상황이다. 현재 민간 물류기업은 수요 발생에 따라 자체적으로 대응하고 있으며, 코트라와 항만공사 등 일부 공기업은 수요 및 전략적 목표에 따라 해외 인프라에 투자하고 운영하고 있다.

국가 간 경제블록 형성, 각국의 산업 정책 및 경제 환경 변화에 따라 제조업체 이동과 물류 수요 변화가 발생하고 있다. 제조 거점이 한·중·일에 서 동남아시아 그리고 인도와 서남아시아로 이동할 가능성이 있다. 또한 특정 물류 경로에 의존도가 높은 독점적 공급망이나 우리나라가 독자적으로 대체할 수 없는 수출입 화물이 있는 경우, 리스크를 분산시키기 위한 다원화 전략이 필수적이다. 이에 따라 국내 기업과 국가 경쟁력을 강화하기 위해서 글로벌 공급망을 지원할 수 있는 국가 차원의 물류 전략 수립이 필요하다.

글로벌 공급망 지원을 위한 물류 전략은 다음과 같은 요소를 포함해야 한다. 첫째, 국가의 전략적 방향에 따라 물류의 역할과 비중을 명확히 파악하고 이를 기반으로 국가 차원의 국제 물류 전략을 수립해야 한다. 둘째, 물류 수요가 필요한 기업의 요구를 파악하여 필요한 국제 물류 서비스 분

류를 도출하고 실질적인 해외 물류 인프라와 지원 정책을 마련해야 한다. 셋째, 국내외 여건 변화를 조사하여 국내 실정에 맞는 전략을 수립, 추진함으로써 우리나라의 공급망 안정화를 위한 기반을 마련해야 할 것이다.

2. 해외 주요 거점 항만 확보

글로벌 공급망에서 육상과 해상을 연결하는 물류 거점으로서 항만의 중요성이 점점 커지고 있다. 항만에서 발생할 수 있는 파업, 팬데믹으로 인한 인력 부족, 기상 악화로 인한 적체 등은 글로벌 공급망의 주요 리스크 요인으로 작용한다. 이러한 항만 적체는 선사와 물류기업에 비용 증가를 초래할 뿐만 아니라 기업 경쟁력을 저하시키는 핵심 요인이다. 특히, 터미널 운영사는 적체가 발생할 경우 대규모 물동량을 보유한 초대형 선사와 글로벌 터미널 운영사 등과 연관된 물동량을 우선 처리하는 경향이 있다. 따라서 해외 항만을 보유하고 운영하는 경우, 글로벌 공급망 리스크를 줄이는 데 큰 효과가 있다.

우리나라에도 선사가 공급망 안정성과 운영 이익을 위해 해외 항만에 투자한 사례가 있다. 한진해운은 과거 미국 롱비치항, 스페인 알제시라스항(현재 HMM이 인수), 대만 카오슝항(현재 HMM이 인수)을 운영하였으며, 현재 HMM은 카오슝항, 알제시라스항, 미국 타코마항을 운영하고 있다. 반면, 국내 터미널 운영사나 물류기업의 해외 항만 투자 사례는 거의 전무한 상황이다. 2007년 우리 정부는 해외 물류 사업 진출을 위해 공공기관과 금융권이 참여하는 1조 3,800억 원 규모의 국제물류투자펀드를 설립하였다.⁷⁸⁾ 그러나 러시아, 루마니아, 동남아시아 등 22개 해외 사업을 검토하였지만 성과 없이 2013년에 청산되었다. 이는 리먼 사태 이후 경기 침체로

78) 전자신문(2009.1.7.) (검색일(2024.7.8.))

인해 목표 수익률을 맞출 수 있는 사업이 부족했으며, 물류기업의 경영 여건이 악화되어 해외 투자 역량이 감소했기 때문이다. 정부의 적극적인 지원에도 불구하고 글로벌 선사를 제외한 해외 항만 투자 사업이 부진했던 이유는 자금력, 운영 능력, 물동량 확보 능력 등의 문제와 참여 구성원 간 견해 차이가 존재했기 때문이다. 글로벌 선사는 자사와 얼라이언스의 물동량을 처리할 수 있는 핵심 거점에만 투자하며, 연근해 선사는 해외 항만 투자 필요성이 상대적으로 낮다. 대형 물류기업은 항만보다 물류센터 투자를 우선시하며, 국내 터미널 운영사는 자금과 역량 부족으로 해외 투자가 쉽지 않다. 다만, 항만 건설을 담당하는 건설 및 엔지니어링 기업은 적극적으로 참여하고 있다.

2016년 해양수산부는 공기업, 민간기업, 금융기관이 참여하는 해외항만 개발 지원협의체를 출범시켜 유망 프로젝트 정보 제공, 타당성 조사 지원, 해외 항만 시장 개척 지원단 파견 등으로 해외 항만 개발을 적극 지원하고 있다. 또한 2023년 12월에 한국해양진흥공사법 개정안이 통과되어, 국내외 항만개발사업 등에 대한 투자 및 채무보증이 가능한 법적 근거가 마련되었다. 이에 따라 한국해양진흥공사는 2,130억 원 규모의 글로벌 물류·공급망 투자 펀드를 설립하여⁷⁹⁾ 미국, 동유럽, 동남아시아 등 글로벌 거점 물류 자산 및 기업에 투자할 예정이며, 해외 항만 투자 여건을 점차 개선하고 있다. 그러나 해외 항만 개발에 실질적인 투자가 이루어지지 않는 이유는 항만 개발부터 운영까지 상당한 시간이 소요되며, 주요 거점 항만은 이미 글로벌 물류기업들이 투자하고 있어 진입 장벽이 존재하기 때문이다. 글로벌 선사를 제외한 국내 기업은 해외 항만 투자 및 운영 경험이 전무하며, 국내 터미널 운영사는 자금력만으로는 해외 투자에 한계가 있다. 항만 공사는 항만을 관리하고 있으나 실질적인 운영 경험은 부족한 실정이다.

79) 연합뉴스(2024.11.12.) (검색일:2024.7.8.)

선진 글로벌 선사 및 운영사는 지난 10여 년간 항공 및 물류기업을 인수하거나 신사업에 주력해 왔으나, 최근에는 항만 터미널 지분 인수 또는 신규 개발에 집중하고 있다. 하팍로이드는 독일 빌헬름스하펜 터미널, 이집트 다이에타 터미널, 이탈리아 터미널 운영사(스피넬리), 칠레 터미널 운영사(소시에에다드 매트리스)의 지분을, CMA CGM은 LA항, COSCO는 독일 함부르크항의 지분을 인수하였다. TIL은 로테르담과 베트남(호찌민, 껀저항)에 투자하였으며, 머스크는 브라질 수아페항 개발에 참여하고 있다. 이로 인해 진입 장벽이 점차 높아지고 있다.

항만은 국가 기간 산업으로, 단순히 자금력만으로 지분 확보나 신규 항만 개발에 참여하기가 매우 어렵다. 국내 항만 운영사 선정처럼 물동량 창출, 운영 경험, 자금 조달 등 다양한 역량이 필요한데 국내 물류기업 중 이러한 능력을 모두 갖춘 경우는 극히 드물다. 따라서 해외 항만을 확보하기 위해서는 단계적으로 접근하는 것이 바람직하다.

첫 번째 단계로는 컨소시엄을 구성하여 해외 항만 지분 참여를 추진해야 한다. 우선적으로 물동량을 창출할 수 있는 선사와 글로벌 물류기업, 자금력을 갖춘 해양진흥공사 및 항만공사 등이 참여하는 컨소시엄을 구성할 필요가 있다. 이후 잠재력이 높은 항만에 대한 선제적 투자를 통해 실적과 경험을 축적한 후 글로벌 공급망 핵심 지역에 항만 지분 인수를 추진하는 것이 바람직하다. 이를 통해 앞으로 다양한 구성원이 참여하는 컨소시엄을 기반으로 여러 지역에 투자할 수 있는 토대를 마련할 수 있을 것이다.

두 번째 단계로는 한국형 글로벌 터미널 운영사를 육성하여 해외 항만 확보를 추진해야 한다. 해외 항만을 확보하기 위해서는 물동량 창출 능력, 운영 능력, 자금력, 해외 투자 경험 등이 필수이다. 국내에서는 글로벌 선사만이 이러한 능력을 갖추고 있으나 모든 핵심 거점에 투자하기에는 어려움이 있다. 글로벌 공급망 리스크 감소, 글로벌 항만 네트워크 구축, 운영

수익 확보 등을 위해 글로벌 터미널 운영사를 육성하고 해외 항만 확보를 추진해야 한다. PSA, HPH, DP World, SIPG 등 글로벌 터미널 운영사는 자국 시장을 기반으로 해외 진출을 추진했다. 이들은 자국 모항에서 과반의 물동량을 처리하며, 자본력과 운영 노하우를 축적하고 브랜드화를 통해 해외로 진출했다. DP World, PSA, SIPG사는 모두 국영 기업으로 글로벌 터미널 운영사로 성장하기 전에 자국 항만에서 독점적·과점적 지위를 확보하였다. HPH, HHLA사 등도 자국 항만에서 대형 터미널 운영사로 성장한 후 세계 항만 시장에 진출했다. 그러나 우리나라 운영사는 글로벌 터미널 운영사와 비교했을 때 매출, 순익, 하역 능력 등에서 매우 영세한 수준으로 해외 항만 확보가 매우 어려운 상황이다.

글로벌 터미널 운영사를 육성하기 위해서는 기존 항만 물동량을 기반으로 시작해야 한다. 국내에서는 과당경쟁 발생 가능성이 높으며, 자본 축적에 시간이 소요되어 글로벌 터미널 운영사로 성장하기 어렵다. 항만 운영에 필요한 능력을 갖추기 위해 선사, 물류기업, 항만공사, 해양진흥공사 등이 참여하는 컨소시엄을 구성하고, 신규 부두 운영권을 확보할 필요가 있다. 글로벌 터미널 운영사로 육성하기 위해서는 단기적으로 15년, 장기적으로 30년 이상의 시간이 소요될 것으로 예상된다. 앞으로 항만 하역 시장을 안정화와 리스크 분담, 지속적인 사업 확장과 네트워크 확대를 위해서는 항만공사 및 해양진흥공사의 적극적인 참여가 필요하다. 국내 시장에서 운영 노하우를 축적하고 자본금을 확보한 후, 해외 진출을 추진한다면 성공 가능성이 높아질 것이다.

3. 해상 운송 다각화 검토

우리나라는 무역 중심 국가로서 해상 운송에 크게 의존하고 있으며, 대부분의 수출입 물량이 해상 운송으로 이루어지고 있다. 그러나 현재 우리

나라의 해상 운송 경로는 몇몇 국가와 특정 경로에 집중되어 있어, 글로벌 공급망 리스크에 매우 취약한 구조를 가지고 있다. 이렇게 집중된 의존도는 국제 정세의 불확실성, 자연재해, 팬데믹과 같은 글로벌 위기 상황에서 큰 피해 가능성을 높인다.

따라서 해상 운송 경로의 다각화는 글로벌 리스크를 분산시키는 데 핵심적인 역할을 한다. 현재 특정 국가와 경로에 집중된 구조는 해당 경로에 문제가 발생할 경우 전체 공급망에 치명적인 타격을 줄 수 있다. 예를 들어, 수에즈 운하가 폐쇄되거나 홍해를 둘러싼 군사적 긴장이 발생할 경우, 우리나라의 주요 수출입 경로가 차단될 위험이 크다. 이러한 리스크를 줄이기 위해서는 해상 운송 경로 다변화를 통해 특정 경로에 대한 의존도를 낮추는 것이 필요하다. 다양한 해상 운송 경로를 확보함으로써 예기치 못한 상황에서도 대응할 수 있는 능력이 강화되며, 한 경로에서 문제가 발생할 경우 다른 경로를 통해 물류를 이어갈 수 있는 능력은 공급망 중단으로 인한 경제적 손실을 최소화할 수 있다.

이를 위해 정부와 민간이 협력하여 현재 우리나라 해운 서비스가 상대적으로 열악한 중동, 아프리카, 남미 등 신규 경로를 개척하거나 서비스를 확대함으로써 기존 경로에 대한 의존도를 낮추고, 글로벌 공급망의 안정성을 확보할 필요가 있다. 이를 통해 다양한 해상 운송 옵션을 제공함으로써 물류 효율성을 극대화할 수 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 정부는 신규 해상 운송 서비스를 제공하는 해운업체를 지원하고, 기업의 투자를 촉진할 수 있는 정책을 마련해야 한다. 특히, 상대적으로 투자 경쟁력이 낮은 중소형 선사를 위해 탈탄소 규제와 친환경 선박 전환을 위한 금융 지원, 해외 유망 물류 거점 확보 등 전반적인 지원이 필요하다.

4. 공급망 리스크 대응 협의체 및 시스템 구축

본 연구는 태풍, 전쟁, 가뭄, 전염병 등 최근 빈번히 발생하는 공급망 리스크 상황에서 최적의 또는 안정적인 물류 공급망을 탐색할 수 있는 방법론을 개발하였다. 특히, 공급망 리스크 대응 정책의 적용 전후 결과를 비교하여 정책 효과를 분석한 결과, 이러한 정책들이 공급망 리스크에 효과적으로 대응할 수 있음을 확인하였다.

우리나라는 코로나19, 미·중 갈등, 한·중 갈등 등 다양한 리스크로 인해 물류 위기를 경험하였으며, 이에 따라 정부 부처들은 관련 기관 및 기업을 포함하는 협의체를 구성, 운영하고 있다. 그러나 이러한 협의체는 공급망 리스크 발생 후야 구성되기 때문에 대응책 마련과 실제 대응이 지연되는 문제가 발생하였다.

따라서 산업통상자원부, 해양수산부, 국토교통부 등 무역 및 물류를 관장하는 주무 부처가 중심이 되어 물류 관련 연구기관과 기업이 함께 참여하는 ‘공급망 리스크 대응 협의체’ 구성이 필요하다. 주기적인 협의체 운영을 통해 1) 사전에 공급망 리스크를 정리하고 대응 방안을 모색하며, 2) 공급망 리스크 발생 가능성이 있는 분야를 모니터링할 수 있다. 또한, 3) 공급망 리스크가 실제로 발생할 경우, 미리 준비된 매뉴얼에 따라 신속하게 대응함으로써 공급망 리스크에 효과적으로 대처할 수 있을 것이다.

이러한 협의체 구성을 위해서 법적 근거 마련이 필수적이다. 현재 시행 중인 ‘소재·부품·장비 산업 경쟁력 강화 및 공급망 안정화를 위한 특별조치법(2023년 6월 13일 시행, 이하 소재부품장비산업법)⁸⁰⁾’에는 이러한 협의체와 관련한 내용이 없어 해당 법률의 개정이 필요하다.

법 개정을 위해서는 산업통상자원부, 해양수산부, 국토교통부 등 주무

80) 소재·부품·장비산업 경쟁력 강화 및 공급망 안정화를 위한 특별조치법(법률 제19438호, 2023.6.13.)

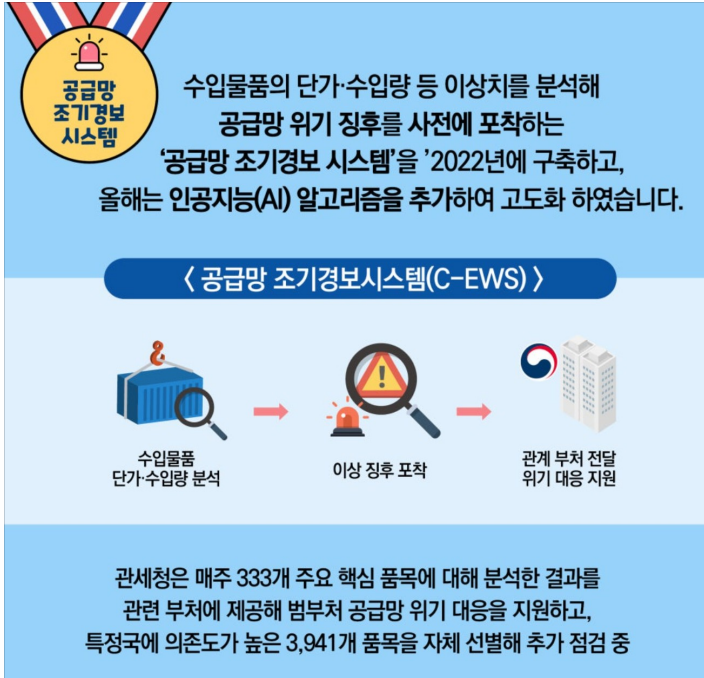
부처 간의 사전 협의가 필요하며, 이후 한국해양수산개발원, 한국교통연구원, 산업연구원, 한국법제연구원 등 국책연구기관을 중심으로 법 개정(안)과 절차와 관련한 연구가 이루어져야 할 것이다.

또한, 공급망 리스크에 선제적으로 대응할 수 있는 조기 경보와 대응 시스템 구축이 필요하다. 본 연구에서 개발한 대응 정책 효과 분석 모형을 기반으로 실시간 데이터를 수집하고 공급망 변화를 분석함으로써 위험에 대한 조기 경보가 가능해진다. 특히, 즉각적인 대안을 제시함으로써 안정적인 대응이 가능할 것으로 기대한다.

현재 관세청에서는 <그림 5-1>과 같이 ‘무역 마이데이터 서비스’ 플랫폼을 운영하고 있으며, 이를 통해 공급망 위기 징후 조기 경보를 지원하고 있다. 이 서비스는 수입 물품의 단가와 수입량 등의 이상치를 분석하여 공급망 위기 징후를 사전에 포착하는 ‘공급망 조기 경보 시스템’을 2022년에 구축하였으며, 2023년에는 AI 알고리즘을 추가하여 고도화를 추진하고 있다.⁸¹⁾ 다만, ‘무역 마이데이터 서비스’는 조기 경보만을 지원하고 대안을 제시하지는 않아, 본 연구에서 개발한 모형과 협업하여 빠르게 대안을 제시한다면, 정부 부처뿐만 아니라 기업들의 신속한 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 기대한다.

81) 한국세정신문(검색일: 2024.8.27.)

〈그림 5-1〉 관세청 무역 마이데이터 C-EWS 소개



자료: 관세청 블로그(검색일: 2024.8.27.)

제3절 연구의 한계점 및 향후 과제

본 연구에서는 글로벌 공급망 리스크에 대응하고 관련 정책의 효과를 분석하기 위해 방법론을 개발하였다. 또한 실제 기업 데이터와 공신력 있는 정보원들의 자료를 수집하고 공급망 리스크 발생 시 결과와 정책 적용 효과를 실험하여 우리나라의 공급망 리스크 대응 기반을 확보하고자 하였다. 그러나 본 연구에는 몇 가지 한계점이 있어 앞으로 이를 논의할 수 있도록

관련 연구가 지속적으로 진행되기를 기대한다.

첫째, 더 많은 데이터를 확보한 후에 실험을 진행하고 현실 세계의 대응 결과와 비교, 모형의 신뢰성을 높여 이를 보정할 필요가 있다. 본 연구에서는 FNA USA와 같은 실제 기업 데이터뿐만 아니라 Drewry, HMM, SeaRates 등 신뢰할 수 있는 정보원으로부터 데이터를 수집하여 활용하였다. 그러나 이 데이터는 외부에 공개 가능한 Tariff 수준의 정보로, 실제 거래에서 사용된 데이터를 확보하고 실험하는 과정이 필요하다. 실제 거래 데이터는 계약 물량과 기간 등에 따라 달라지기 때문에 트럭 운송사, 선사, 터미널 운행사 등을 통해 실제 데이터를 확보하고 이를 활용하여 실험해야만 정확한 검증이 가능할 것이다.

둘째, 모형의 일반화를 위한 추가적인 검증 및 보정이 필요하다. 본 연구에서는 자문회의, 전문가 세미나, 보고회 등을 통해 모형에 관한 1차 전문가 검증을 받았다. 다만 통용화될 수 있는 일반화된 모형으로 발전하기 위해서는 실제 데이터와 비교를 통한 검증과 데이터들을 기반으로 한 보정의 과정이 필요하며, 관련된 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

셋째, 국가와 기업의 사전 대응 비용을 고려하지 않았고 파업 시 인프라 소유 여부에 관계 없이 공급망 운영이 불가하다고 가정하였다는 한계가 있다. 국가와 기업이 공급망 리스크 대응을 위해 발생 전에 이미 대응 비용을 지출하고 있으나 본 연구에서는 이를 고려하지 않았다. 만약 이를 고려한다면 더 큰 비용이 발생하여 결과 역시 변경될 것이다. 또한 공급망 인프라의 소유 여부에 관계 없이 공급망이 마비된다고 가정하였으나 이를 반영할 경우에 다른 결과가 도출될 수도 있을 것이다. 따라서, 추가 연구가 이루어진다면 보다 정확한 결과를 도출할 수 있는 모형으로 발전할 것으로 생각한다.

넷째, 국제협력 연구가 필요하다. 글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과

분석을 위해서는 전 세계의 현실 데이터가 필요하고 국가 간 상호 협력체계 유지가 필요하다. 이를 위해 글로벌 공급망 리스크와 관련하여 많은 연구를 수행하고 있는 미국, 독일 등 물류 선진국과 협력한 후 데이터 및 모형을 현실화하고, 본 연구 결과를 국제적으로 확산시킬 수 있는 계기를 마련해야 한다.

다섯째, 대응 정책별 추진 주체, 인센티브·규제 등 제도 지원 방안에 관한 구체적인 정책연구가 필요하다. 본 연구는 관련 정책들이 얼마나 효과가 있는지 분석하는 모형을 개발하고 실험 수행하였다. 하지만 기초연구라는 한계로 인해 각 정책의 주체, 제도 지원 방안 등은 다루지 않았다. 따라서 본 연구가 제시한 대응 방안별 구체적 정책연구가 필요하며 추진 주체, 인센티브·규제 여부에 따라 모형을 활용해 효과를 분석한다면 또 다른 연구를 추진할 수 있을 것이다.

마지막으로, 모형의 시스템화 및 EWS(Emergency Warning System, 조기경보시스템)의 연계가 필요하다. 본 연구에서 개발한 혼합정수계획법은 ILOG CPLEX를, 메타휴리스틱 모형은 Java를, 시뮬레이션은 Arena를 통해 개발되었다. 이처럼 각 방법론의 플랫폼이 다르기 때문에 이를 통일하는 작업이 필요하다. 특히 사용자들이 편리하게 활용할 수 있도록 통합 인터페이스를 구축하여 시스템화하는 과정이 필요하다. 나아가 관세청의 EWS와 연계하여 EWS가 조기 경보만 발령하는 것이 아니라 대안 물류공급망을 제시할 수 있도록 추가 연구를 진행한다면 우리나라 물류 공급망 안정화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

국내 문헌

- 강무홍(2021), 한국형 스마트항만 추진의 필요성, 군산항 포럼.
- 곽동욱(2020), 공급사슬 회복탄력성의 핵심 역량에 관한 해석적 구조 분석, 통상정보 연구, 22(3), pp. 263-282.
- 권보배 외(2022), 글로벌 가치사슬 변화와 국제물류 분야 대응방안 연구: 전기자동차 산업을 중심으로, 한국해양수산개발원.
- 김민철, 김성환(2023), 지자체 체육정책의 시민평가를 위한 정량적 측정도구 개발 연구, 한국스포츠산업경영학회.
- 김영준, 김창희(2023), 공급망 리스크가 국가 해운 공급망에 미치는 영향에 대한 연구, 한국생산관리학회지.
- 김형근 외(2012.12.) 항만에서의 재난 및 재해 영향과 대응방안 연구, 한국해양수산개발원.
- 박병권 외(2015), 글로벌 해운물류 실시간 위치 추적 시뮬레이션 시스템 개발, 한국정보통신학회논문지.
- 박병주, 최형림, 강무홍(2008), 공급사슬관리의 통합 계획을 위한 유전 알고리즘, 한국SCM학회지, 8(1), pp. 1-8.
- 박세훈, 이현호(2019), AnyLogic 3일 만에 끝내기: 시뮬레이션 모델링 속성 코스, 북코리아.
- 윤수재(2019), 정부 정책효과 측정에 대한 개선방안 연구, 한국행정연구원.
- 이나영 외(2023), 공급망 안정화를 위한 항만의 대응방안 연구, 한국해양수산개발원.

이성우 외(2023), 글로벌 공급망 리스크 대응 물류망 최적화 방안 연구: 한국-북미 물
류공급망 중심, 한국해양수산개발원.

이수진(2022), 코로나19 상황에서 주요국의 글로벌 공급망관리(SCM) 지원정책 비교,
무역보험연구.

정성훈, 김휘강, 우지영(2017), 정보보호 정책의 빅데이터 분석 프레임워크: 보안 사
건을 중심으로, 한국컴퓨터정보학회논문지.

최건우(2024.7.), EU ETS 비용 산정, 한국해양수산개발원 내부자료.

최병일 외(2023), 부품 공급망 위험이 공급사슬과 해운 분야에 미치는 영향: 자동차
산업을 중심으로, 한국생산관리학회지.

최석우 외(2019), 해양수산분야 예견적 위험분석 기반구축 연구, 한국해양수산개발
원.

하명신, 김철민, 장병기(2011), 항만인센티브제도의 효과에 대한 정량적 분석: 부산항
을 중심으로, 한국항만경제학회지.

한국은행(2023.8.), 우리나라 주요 제조업 생산 및 공급망 지도.

한국해양수산개발원(2024.6.), 글로벌 공급망 리스크 대응 전문가 워크숍 결과보고
서.

한능호, 박진우(2020), 코로나19로 인한 동아시아 지역의 공급사슬 재편에 관한 연구,
지역산업연구.

한종석, 이영재, 홍재화(2017), 보육료 지원정책이 기혼여성 노동공급에 미치는 영향:
생애주기 모형을 이용한 정량 분석, 경제학 연구.

국외 문헌

Anparasan, A.A., & Lejeune, M.A. (2018), Data laboratory for supply chain response
models during epidemic outbreaks, *Annals of Operations Research*, 270,
pp. 53-64.

AbuKhoua, E., Al-Jaroodi, J., Lazarova-Molnar, S., & Mohamed, N. (2014). Simulati
on and modeling efforts to support decision making in healthcare supply

- chain management. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 354246.
- Bechtel, E., & Jayaram, J.(1997), Supply chain management: a strategic perspective, *The International Journal of Logistics Management*, 8, pp. 15-34.
- Büyüktaktak ın, İ. E., des-Bordes, E. & K ı b ı ş, E. Y.(2018), A new epidemics-logistics model: Insights into controlling the Ebola virus disease in West Africa, *European Journal of Operational Research*, 265(3), pp. 1046-1063.
- Cavalcante, I. M., Frazzon, E. M., Forcellini, F. A., & Ivanov, D. (2019), A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing, *International Journal of Information Management*, 49, pp. 86-97.
- Chan F T ,Chan H K. (2005), Simulation modeling for comparative evaluation of supply chain management strategies, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 998-1006.
- Chang, Y., Fang, Z., & Li, Y. (2016), Renewable energy policies in promoting financing and investment among the East Asia Summit countries: Quantitative assessment and policy implications. *Energy Policy*, 95, 427-436.
- Ceryno, P. S., Scavarda, L. F., Klingebiel, K., & Yuzgulec, G. (2013). Supply chain risk management: A content analysis approach. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(3), 141.
- Chopra, S. and Sodhi, M. S. (2004), Managing risk to avoid supply-chain breakdown, *MIT Sloan Management Review*, 46, pp. 52-61.
- Dirzka, C., & Acciaro, M. (2022), Global shipping network dynamics during the COVID-19 pandemic's initial phases, *Journal of Transport Geography*, 99, 103265.
- Fitzgerald, B. G., O'Doherty, T., Moles, R., & O'Regan, B. (2012). A quantitative method for the evaluation of policies to enhance urban sustainability. *Ecological Indicators*, 18, 371-378.
- Garvey, M.D., Carnovale, S., & Yenyurt, S. (2015), An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach, *European Journal of Operational Research*, 243(2), pp. 618-627.

-
- Gaudenzi, B., & Borghesi, A. (2006). Managing risks in the supply chain using the AHP method. *The International Journal of Logistics Management*, 17(1), pp. 114-136.
- Ghadge, A., Dani, S., Chester, M., & Kalawsky, R. (2013). A systems approach for modelling supply chain risks. *Supply Chain Management: An International Journal*, 18(5), pp. 523-538.
- Hasani, A., & Khosrojerdi, A. (2016). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87, pp. 20-52.
- Hermoso-Orzáez, M. J., & Garzón-Moreno, J. (2022). Risk management methodology in the supply chain: a case study applied. *Annals of Operations Research*, 313(2), 1051-1075.
- Ivanov, D. (2023). Conceptualisation of a 7-element digital twin framework in supply chain and operations management. *International Journal of Production Research*, 62(6), pp. 2220-2232.
- Ivanov, D. (2017). Simulation-based ripple effect modelling in the supply chain, *International Journal of Production Research*, 55(7), pp. 2083-2101.
- Ivanov, D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic: a conceptual and formal generalisation of four major adaptation strategies. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3535-3552.
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., and Schönberger, J. (2019), *Global Supply Chain and Operations Management*, Second Edition, Springer.
- Jiang, B., Li, J., & Shen, S. (2018), Supply chain risk assessment and control of port enterprises: Qingdao port as case study, *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 34(3), pp. 198-208.
- Kuhla, K., Willner S. N., Otto, C., and Levermann, A. (2023), Resilience of international trade to typhoon-related supply disruption, *Journal of Economic Dynamics & Control*, 151, pp. 1-26.
- Klibi, W., & Martel, A. (2012). Modeling approaches for the design of resilient supply

- networks under disruptions. *International Journal of Production Economics*, 135(2), pp. 882-898.
- Lee, T. W., Park, N. K., & Lee, D. W. (2003). A simulation study for the logistics planning of a container terminal in view of SCM. *Maritime Policy & Management*, 30(3), pp. 243-254.
- Longo, F., & Mirabelli, G. (2008). An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 54(3), p. 570-588.
- Li, J., & Chan, F. (2013). An agent-based model of supply chains with dynamic structures, *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), pp. 5403-5413.
- Macdonald, J. R., Zobel, C. W., Melnyk, S. A., & Griffis, S. E. (2018). Supply chain risk and resilience: Theory building through structured experiments and simulation. *International Journal of Production Research*, 56(12), pp. 4337-4355.
- Maina, J., & Mwangangi, P. (2020). A critical review of simulation applications in supply chain management. *Journal of Logistics Management*, 9(1), pp. 1-6.
- Moeinzadeh, P., & Hajfathaliha, A. (2009). A combined fuzzy decision making approach to supply chain risk assessment. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 3(12), 1631-1647.
- Oliveira, J. B., Jin, M., Lima, R. S., Kobza, J. E., & Montevechi, J. A. B. (2019). The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 92, pp. 17-44.
- Oliveira, J. B., Lima, R. S., & Montevechi, J. A. B. (2016). Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 62, pp. 166-191.
- Park, B. J., Choi, H. R., & Kang, M. H. (2007). Integration of production and distribution planning using a genetic algorithm in supply chain management. *Analysis and Design of Intelligent Systems Using Soft Computing Techniques*, 416-426.

-
- Park, Y. B., & Kim, H. S. (2016). Simulation-based evolutionary algorithm approach for deriving the operational planning of global supply chains from the systematic risk management. *Computers in Industry*, 83, pp. 68-77.
- Persson, F., & Olhager, J. (2002). Performance simulation of supply chain designs. *International Journal of Production Economics*, 77(3), pp. 231-245.
- Pettit, T. J., Fiksel, J. and Croxton, K. L. (2010), Ensuring supply chain resilience: Development of a conceptual framework, *Journal of Business Logistics*, 31 (1), pp. 1-21.
- Popper, R. (2008). Foresight Methodology, *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*, Edward Elgar, Cheltenham, pp. 44-88.
- Picci, L. (2006). The quantitative evaluation of the economic impact of e-government: A structural modelling approach. *Information Economics and Policy*, 18 (2), 107-123.
- Quang, H. T. and Hara, Y. (2018), Risks and performance in supply chain: the push effect, *International Journal of Production Research*, 56(4), 1369-1388.
- Sadghiani, N. S., Torabi, S. A., & Sahebjamnia, N. (2015). Retail supply chain network design under operational and disruption risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, pp. 95-114.
- Terzi, S., & Cavalieri, S. (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in industry*, 53(1), 3-16.
- Tummala, R., & Schoenherr, T. (2011). Assessing and managing risks using the supply chain risk management process (SCRMP). *Supply Chain Management: An International Journal*, 16(6), pp. 474-483.
- Wu, M. (2007). Topsis-AHP simulation model and its application to supply chain management. *World Journal of Modelling and Simulation*, 3(3), pp. 196-201.
- Wu, D., & Olson, D. L. (2008). Supply chain risk, simulation, and vendor selection. *International journal of production economics*, 114(2), 646-655.
- You, F., Wassick, J. M., & Grossmann, I. E. (2009). Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: models and algorithms. *AIChE Journal*, 55(4), 931-946.

Yavuz Acar, Sukran, Kadipasaoglu & Peter Schipperijn (2010). A decision support framework for global supply chain modelling: an assessment of the impact of demand, supply and lead-time uncertainties on performance. International Journal of Production Research, 48(11), 3245-3268.

보도자료

기상청(2024.1.26.), 봄철까지 이어진 기상가뭄, 여름 이후 많은 비로 해소, https://www.kma.go.kr/kma/servlet/NeoboardProcess?mode=download&bid=press&num=1194327&fno=1&callback=https%3A%2F%2Fwww.kma.go.kr%2Fkma%2Fnews%2Fpress.jsp&ses=USERSESSION&k=ATC202401261056031_5d764b8f-08dd-4741-bef5-7d4ec45f2594.hwp(검색일: 2024.7.18.)

뉴스웍스(2024.2.15.), 26조 배달음식 시장 꺾였다…배민-쿠팡이츠-요기요 '보릿고개' 시작될까, <https://www.newsworks.co.kr/news/articleView.html?idxno=743654>(검색일: 2024.4.23.)

파이낸셜뉴스(2024.1.25.), 홍해서 머스크 상선 또 공격, 美 호위에도 운항 전면 중단, <https://www.fnnews.com/news/202401250908158199>(검색일: 2024.4.22.)

Savi, When a Hurricane Hits: See & Solve Shipment Delays in Real Time, <https://savi.com/when-a-hurricane-hits-see-solving-shipment-dealys-in-real-time/>(검색일: 2024.7.30.)

Seatrade Maritime NEWS, Panama Canal takes water saving measures in face of 'unprecedented drought', <https://www.seatrade-maritime.com/panama/panama-canal-takes-water-saving-measures-face-unprecedented-drought>(검색일: 2024.7.18.)

The New York Times, Drought Saps the Panama Canal Disrupting Global Trade(검색일: 2024.7.19.)

인터넷 자료

관세청 블로그, 디지털플랫폼정부 기관 표창 수상, https://blog.naver.com/k_customs/223279255830(검색일: 2024.8.27.)

국가가뭄정보포털, 가뭄정보분석-가뭄지수, <https://www.drought.go.kr/menu/m40/m46.do>(검색일: 2024.7.17.)

국가물류통합정보센터, 생활물류통계, <https://nlic.go.kr/nlic/parcelServiceSales.action>(검색일: 2024.4.23.)

국무조정실 국무총리비서실, 120대 국정과제, <https://www.opm.go.kr/opm/info/government02.do>(검색일: 2024.11.20.)

네이버 지식백과(매일경제, 매경닷컴), 프렌드쇼어링, <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=6624557&cid=43659&categoryId=43659>(검색일: 2024.7.16.)

서울경제(2023.12.22.), 희망봉 우회뎀 최대 2주 지연...컨테이너당 운임 1300만원까지 치솟아, <https://www.sedaily.com/NewsView/29YM18PT08>(검색일: 2024.7.8.)

연합뉴스(2024.11.12.), 부산은행·해양진흥공사, 글로벌 물류·공급망 투자펀드 조성, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20241112143400051?input=1195m>(검색일:2024.7.8.)

연합뉴스(2022.3.18.), 도요타, 지진 여파로 일본 내 공장 80% 최대 3일간 가동 정지, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20220318110900073>(검색일:2024.7.30.)

워터저널, 지하수 이용 소규모 마을상수도, 선제적 가뭄 대응 위해 예·경보 체계 구축 필요, <https://www.waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=65428>(검색일: 2024.7.18.)

위키백과, 2021년 수에즈 운하 마비 사고, https://ko.wikipedia.org/wiki/2021%E2%85%84_%EC%88%98%EC%97%90%EC%A6%88_%EC%9A%B4%ED%95%98_%EB%A7%88%EB%B9%84_%EC%82%AC%EA%B3%A0(검색일: 2024.10.10.)

전자신문(2009.1.7.), 국제물류투자펀드, 러시아 `컨`부두 사업 투자자로 참여, <https://www.electra.co.kr>

- //www.etnews.com/200901060046(검색일: 2024.7.8.)
- 중앙일보(2020.11.5.), 미·중 충돌 대비해 북극항로 개척해야, <https://www.joongang.co.kr/article/23912367>(검색일: 2024.7.8.)
- 한국세정신문(2023.11.27.), 관세청, 디지털 혁신 노력 인정 받았다, <http://www.taxtimes.co.kr/news/article.html?no=262131>(검색일: 2024.8.27.)
- Cargo News(2017.7.4.), 현대상선 LA항 CUT 운영권 포기, <https://www.cargonews.co.kr/news/articleView.html?idxno=36508>(검색일: 2024.7.18.)
- Drewry, Container Freight Rate(2024년 3월 기준), <https://containerfreight.drewry.co.uk>(검색일: 2024.7.9)
- Eco Marine(2024.4.2.), 파나마 운하의 가뭄과 영향, <https://blog.naver.com/ecomarinesys/223403149319>(검색일: 2024.4.23.)
- Economic Policy Uncertainty, GPR(Geopolitical Risk Index), <https://www.policyuncertainty.com/>(검색일: 2024.7.19.)
- HMM, <https://www.hmm21.com/e-service/general/schedule/ScheduleMainPost.do>(검색일: 2024.7.8.)
- KOTRA(2024.6.25.), 해외시장뉴스, 미국 동부항만 계약 협상 중단으로 미국 물류 상황에 관심 집중, https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=80&CONTENTS_NO=2&bbsGbn=242&bbsSn=242&pNttSn=216574(검색일: 2024.7.23.)
- Panama Canal Authority, Gatun Water Levels Indicators and Customer Information -Circulars to Shipping Companies-Monthly Canal Operation, <https://pancanal.com/en/>(검색일: 2024.7.18.)
- SEA-DISTANCES.ORG, Ports Distances, <https://sea-distances.org>(검색일: 2024.7.22.)
- SeaRates, <https://www.searates.com>(검색일: 2024.07.09.)
- Searoutes, <http://app.searoutes.com/>(검색일: 2024.7.16.)
- The University of Utah, Frequently Asked Earthquake Questions, <https://quake.utah.edu/earthquake-information-products/earthquake-faq>(검색일: 2024.7.30.)

Tradlinx, FCL 해상 스케줄, <https://www.tradlinx.com/ocean-schedule-fcl?day=2024-07-08>(검색일: 2024.7.8.)

Tradlinx, 컨테이너 내륙 운임 조회(부산북항기점-울산시 북구 효문동, 2022년 7월 1일 기준), <https://www.tradlinx.com/container-inland-tariff>(검색일: 2024.7.8.)

Uber Freight, A guide to freight trucking rates in 2024, <https://www.uberfreight.com/blog/freight-trucking-rates-guide>(검색일: 2024.7.8.)

Volcano discovery, By Country/Region, <https://volcanodiscovery.com/earthquakes/vietnam/stats.html>(검색일: 2024.7.20.)

Wikipedia, Drought-Drought by country, <https://en.wikipedia.org>(검색일: 2024.7.16.)

Wikipedia, List of drought, <https://en.wikipedia.org>(검색일: 2024.7.16.)

Wikipedia, Tropical Cyclones by year, <https://en.wikipedia.org>(검색일: 2024.7.15.)

Wikipedia, Typhoons in the Korean Peninsula, <https://en.wikipedia.org>(검색일: 2024.7.16.)

Woodwell Climate Research Center, Drought in Panama is disrupting global shipping. These 7 graphics show how, <https://www.woodwellclimate.org/drought-panama-canal-7-graphics>(검색일: 2024.7.18.)

법령 자료

소재·부품·장비산업 경쟁력 강화 및 공급망 안정화를 위한 특별조치법(법률 제19438호, 2023. 6. 13.)

인터뷰 자료

군산대학교 인터뷰 자료(인터뷰일:2024.2.27., NGL 회의실)

디엔비로지스틱스 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.7.9., 전화)

한국해양수산개발원 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.7.8. KMI 3층 회의실)

CJ대한통운 미국 서부지사 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.11., CJ대한통운 미국 서부
지사 회의실)

FNS USA 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.10., FNS USA 미국 서부 지사 회의실)

HMM LA 지점 인터뷰 자료(인터뷰일: 2024.4.11., HMM LA 지점 회의실)

부 록

선행연구 현황

■ 정책효과의 정량적분석 관련 선행연구 현황

정책효과의 정량적분석 관련 선행연구 현황은 <부록 표 1>과 같다.

〈부록 표 1〉 정책효과의 정량적분석 선행연구 현황

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
1	- 연구명: The Quantitative Evaluation of the Economic Impact of E-Government: A Structural Modelling Approach - 연구자(연도): Picci, L. (2006) - 목적: 중앙정부와 지방정부의 다층적 정책 조정 및 정책 효과의 시간 지연을 고려하여 정부의 경제적 영향을 분석	- 구조적 모형 - 시뮬레이션 - 경제성 분석	- 정부 정책은 경제적 효율성을 높이며 고용과 기술 개선에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음 - 정책 효과가 나타나는 데에 시간적 지연이 있으며, 중앙정부와 지방정부 간 정책 조정이 효과성에 중요한 영향을 미침 - 다층적 거버넌스 체제에서 정부 정책의 최적화를 위해 상호 보완적 협력의 필요성 제안
2	- 연구명: 항만인센티브제도의 효과에 대한 정량적 분석: 부산항을 중심으로 - 연구자: 하명신 외 (2011) - 목적: 부산항의 인센티브 제도가 환적화물 증대에 기여했는지를 분석하고, 정책 효과에 대한 재평가	- 문헌조사 - ARIMA 모형	- 인센티브 제도의 도입이 환적화물량 모형의 구조 변화에 유의미한 영향을 미치지 않음 - 지나친 인센티브 경쟁이 국내 항만의 경쟁력 저하를 초래할 우려

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
3	- 연구명: A Quantitative Method for the Evaluation of Policies to Enhance Urban Sustainability - 연구자: Fitzgerald, B. G. 외 (2012) - 목적: 도시 지속 가능성 정책 평가를 위한 정량적 방법을 개발	- SEMPRe - 설문조사	300개 이상의 경제적, 사회적, 환경적 지표를 바탕으로 SEMPRe (지속 가능성 평가 지표)를 개발하여 정책 효과를 평가 - 다양한 지표를 조합해 정책 시나리오를 평가하고, 정책의 지속 가능성 기여도를 수치화하여 정책의 예상 결과를 시뮬레이션함
4	- 연구명: Renewable Energy Policies in Promoting Financing and Investment Among the East Asia Summit Countries: Quantitative Assessment and Policy Implications - 연구자(연도): Chang, Y. 외.(2016) - 목적: 동아시아 정상회담 국가의 재생 가능 에너지 투자 촉진을 위한 정책이 목표를 달성하는지 평가	- 평가지표 구축 - 문헌연구 - 정량적 비교분석	- 재생 가능 에너지 시장 창출, 수익성 개선, 정책 불확실성 감소, 기술 개발, 금융 자원 접근성 증대 여부를 평가하기 위해 각 지표를 기준으로 16개국 정책을 분석 - 인도, 한국, 일본 등이 상위권에 속하였고, 브루나이, 라오스, 미얀마 등은 투자 매력도가 낮은 국가로 분석됨 - 재생 가능 에너지 기술 발전에 대한 정책적 지원이 부족하며, 수익성 및 금융 자원에 대한 정책의 예측 가능성 유지가 중요함을 제언
5	- 연구명: 보육료 지원정책이 기혼 여성 노동공급에 미치는 영향 - 연구자: 한종석 외(2017) - 목적: 혼 여성의 노동 공급에 대한 보육료 지원 정책의 영향을 정량적으로 분석	- 생애주기 모형 구축 - 시뮬레이션	- 보편적 지원의 경우 여성 고용률과 평균 생산성 각각 0.23%와 0.34% 증가 - 취업조건부 지원의 경우 여성 고용률 0.73%, 평균 생산성 0.42% 증가로 나타남 - 양육수당과 보육료 지원이 기혼 여성의 노동 공급에 미치는 영향은 지원 방식에 따라 달라지며, 취업조건부 지원이 고용 증가 효과가 더 큼
6	- 연구명: 정보보호 정책의 빅데이터 분석 프레임워크: 보안 사건을 중심으로 - 연구자: 정성훈 외(2017) - 목적: 보안 사고와 관련된 데이터를 기반으로 정보 보안 정책의 영향을 분석하는 빅데이터 기반 분	- 문헌조사 - 텍스트마이닝 - 네트워크분석	- 보안 사고의 주요 키워드는 스미싱, 랜섬웨어, 시스템 해킹 등의 보안 위협 요소로 구성되었으며, 정책의 주요 키워드는 기업 관리, 공공기관 보안, 신기술 대응 등으로 분석됨 - 사건과 정책의 일치도를 통해 사

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	석 프레임워크를 제안		건 발생 후 정책이 대응하는 데 평균 3개월의 시차가 있음을 확인
7	- 연구명: 정부 정책효과 측정에 대한 개선방안 연구 - 연구자: 윤수재 (2019) - 목적: 중앙행정기관의 정부 업무 평가 시 정책 효과의 문제점과 개선방안을 도출	- 설문조사 - 문헌연구 - 전문가 인터뷰	- 정책 효과의 개선 방안으로는 정책 목표 달성을 위한 체계적이고 구체적인 평가 기준과 방법을 제안 - 평가의 일관성과 신뢰성을 높이기 위해 정부 차원의 통합적 관리 시스템 필요
8	- 연구명: 지자체 체육정책의 시민 평가를 위한 정량적 측정도구 개발 연구 - 연구자(연도): 김민철 & 김성환 (2023) - 목적: 광역자치단체의 체육 성과를 정량적으로 측정하기 위한 지표를 개발하고, 이를 통해 시민 의견이 반영된 체육 정책 수립을 지원	- 문헌조사 - 설문조사 - 요인분석	- 전문체육, 생활체육, 학교체육, 스포츠산업, 노인체육, 체육시설, 장애인체육 등 7개 체육영역에 걸친 21개 문항을 개발하고 시민 평가를 통해 정량적 체육지수를 추출 - 연구 결과 모든 문항에서 정규성 및 신뢰도 기준을 충족하였으며, 체육 정책 평가를 위한 정량적 지표로 채택됨

자료: 기존 연구 분석을 기반으로 저자 작성

■ 대상 및 범위 측면 선행연구 현황

대상 및 범위 측면 선행연구 현황은 <부록 표 2>과 같다.

<부록 표 2> 대상 및 범위 측면 선행연구 현황

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
1	- 연구명: Supply Chain Risk Assessment and Control of Port Enterprises: Qingdao port as case study - 연구자(연도): Jiang, B. 외 (2018) - 목적: 공급망 리스크 강화를 위한 항만의 경쟁력 요인 분석	- 문헌연구 - 설문조사 - 요인분석 (Fuzzy AHP) - 사례분석	- 항만 내 공급망 리스크 관련 요인 도출 및 분석 - 요인분석을 통한 항만 공급망 리스크 평가 모델 구현 - 청도항 사례 공급망 리스크 평가 및 경쟁력 강화 방안 제시
2	연구명: A new	최적화	여러 계획 기간 동안 제한된 예산

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	epidemics-logistics model: Insights into controlling the Ebola virus disease in West Africa - 연구자(연도): Buyuktahtakin et al.(2018) - 목적: 동적 공간 확산을 고려하면서 전염병 발생을 통제하기 위해 할당되는 자원의 최적량, 시기, 위치를 결정하는 새로운 전염병-물류 혼합 정수계획법 모델을 개발	혼합 정수계획법	으로 총감염 및 사망자 수를 최소화하는 모형을 제안 - 지리적으로 다양한 질병 전파 속도, 감염된 개인의 다른 지역 이동, 치료 센터의 제한된 용량으로 인한 다양한 치료 속도를 고려 - 기니, 라이베리아, 시에라리온의 2014~2015년 에볼라 발생 사례를 사용하여 모형의 성능을 설명
3	- 연구명: Data laboratory for supply chain response models during epidemic outbreaks - 연구자(연도): Anparasan, A. A., & Lejeune, M. A.(2018) - 목적: 개발도상국의 전염병 발생 문제 해결을 위한 데이터 구축 및 모델 구현	- 문헌조사 - 자료조사 2차 데이터 활용 - 시계열 자료 생성	- 개발도상국 전염병 발생 문제 해결 모델에 활용할 수 있는 데이터 세트 구축 - 데이터 활용을 통한 전염병 발생 대응 모델 구축 방안 제시
4	- 과제명: 코로나19로 인한 동아시아 지역의 공급사슬 재편에 관한 연구 - 연구자(연도): 한능호 & 박진우 (2020) - 목적: 동아시아 지역의 공급망 변화 추이를 고찰하고, 선행적으로 재편 방향을 탐색하여 공급사슬의 재편을 꾀하는 기업 및 이를 뒷받침하려는 정부에게 효율적인 방향 제시	- 문헌조사 - 사례조사 - 전문가 인터뷰	- 코로나19와 공급사슬의 변화 - 동아시아 각국의 공급사슬 이슈 - 공급사슬 네트워크 재편 방향
5	- 연구명: 코로나19 상황에서 주요국의 글로벌 공급망관리(SCM) 지원정책 비교 - 연구자: 이수진 (2022) - 목적: 글로벌 공급망관리 위기를 대처하기 위한 국가별 정책방안 및 지원 방향 조사	- 문헌조사 - 사례조사	- 세계 주요국들의 지원정책 분석을 통한 우리나라 공급망 위기시 탄력적 대응방안 제시 - 우리나라 공급망 재편 및 회복력 구축을 위한 시사점 도출

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
6	- 연구명: 공급망 리스크가 국가 해운 공급망에 미치는 영향에 대한 연구 - 연구자: 김영준 & 김창희(2023) - 목적: 국가 해운 공급망에 대한 공급망 리스크 영향 분석	- 문헌조사 - 자료포락분석(DEA)	- 국가 해운 물류 공급망의 성과 측정 및 공급망 리스크가 공급망 성과에 미치는 영향 평가 - 다양한 품질 요인들과 리스크의 관계에 따라 공급망 성과 비교 분석
7	- 연구명: 부품 공급망 위험이 공급 사슬과 해운 분야에 미치는 영향: 자동차 산업을 중심으로 - 연구자: 최병일 외(2023) - 목적: 공급망 위험 요인 식별 및 영향을 기반으로 한 공급망 위험 관리 분석	- 문헌조사 - 통계분석 - 벡터자기회귀 모형	- 공급망 위험요인 정의 및 주성분 분석을 활용한 공급망 위험변수 구성 - 공급망 위험의 효과가 국내 자동차 생산량 및 자동차 운반선 시장에 미치는 영향 분석 - 공급망 위험 계량 및 벡터자기회귀모형을 활용한 효과 분석
8	- 연구명: 공급망 안정화를 위한 항만의 대응방안 연구 - 연구자: 이나영 외(2023) - 목적: 항만의 입장에서 공급망 리스크를 완화할 수 있는 체계를 마련	- 문헌조사 - 전문가 인터뷰 - 델파이 조사 - 스트레스 테스트	- 항만의 영향을 미치는 공급망 리스크 요인 도출을 위해 항만 운영자 및 관리자를 대상으로 설문조사 실시 - 공급망 리스크 요인을 측정할 수 있는 대리변수 선정에 대해 경제 및 국제무역 전문가를 대상으로 델파이 조사 시행 - 공급망 리스크가 항만 운영에 미치는 영향분석을 위해 대표적인 리스크 평가방법인 스트레스 테스트 방법론 적용 - 영향분석 결과 및 최근 공급망 리스크에 대한 관계자 인터뷰 등을 통해 공급망 안정화를 위한 대응 방안 제시

자료: 기존 연구 분석을 기반으로 저자 작성

■ 시뮬레이션 모형 선행연구 현황

시뮬레이션 모형 선행연구 현황은 〈부록 표 3〉과 같다.

〈부록 표 3〉 대상 및 범위 측면 선행연구 현황

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
1	- 연구명: Performance simulation of supply chain designs - 연구자: Persson, F., & Olhager, J. (2002) - 목적: 공급망 설계 대안을 평가하여 품질, 리드 타임, 비용의 상호 관계를 분석	- 시뮬레이션 - 상관관계분석	- 공급망 구조와 품질 수준이 비용에 미치는 영향을 분석 - 간단한 공급망 구조와 높은 품질 수준이 비용 절감과 리드 타임 개선에 유리한 것으로 평가 - 공급망의 재설계가 성능 최적화에 기여할 수 있음을 제안
2	- 연구명: A simulation study for the logistics planning of a container terminal in view of SCM - 연구자: Lee, T.-W., Park, N.-K., & Lee, D.-W. (2003) - 목적: 컨테이너 터미널의 물류 계획을 위한 공급망 관리(SCM) 모델 개발 및 성과 평가	- 시뮬레이션 모델링 - 운영정책 모델	- 포트 공급망의 성과를 개선하기 위한 시뮬레이션 모델 구성 - 다양한 전략을 통해 포트 운영 최적화 방안 검토 - 공급망 관리 네트워크의 효율성을 높이기 위한 전략적 요인 제안
3	- 연구명: Simulation in the supply chain context: a survey - 연구자: Terzi, S. & Cavalieri, S. (2004) - 목적: 공급망 관리에서 시뮬레이션 기술의 역할을 분석하고, 시뮬레이션 기법의 적용 가능성을 연구	- 문헌조사 - 시뮬레이션 모델	- 급망 관리 내에서 시뮬레이션 기법의 유용성을 확인 - 병렬 및 분산 시뮬레이션(PDS) 패러다임을 통해 다양한 의사 결정 지원 가능성 분석 - 양한 공급망 전략 시나리오에 대한 시뮬레이션 적용 사례와 기술적 고려사항 제시
4	- 연구명: Simulation modeling for comparative evaluation of supply chain management strategies - 연구자: Chan, F. T., & Chan, H. K. (2005) - 목적: 시뮬레이션을 활용한 시나	- 문헌조사 - 시뮬레이션	- 다섯 가지 일반적인 공급망 모델을 구축하여 시뮬레이션을 활용한 SCM 성능 측정 - 시나리오별 결과 비교 분석을 통해 공급망 모델의 성능 및 성과 측정

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	리오별 SCM 성능 측정		
5	- 연구명: Topsis-AHP simulation model and its application to supply chain management - 연구자: Wu, M. (2007) - 목적: 공급망 관리에서 전략적 협력 파트너 선정에 AHP와 시물레이션을 결합한 방법론 개발	- AHP - 시물레이션	- AHP의 불확실성을 줄이기 위해 시물레이션을 통한 공급업체 선택 모델 제안 - 의사결정의 불확실성을 평가하고 순위 변화 가능성을 계산하여 AHP 기법의 신뢰성 개선
6	- 연구명: An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation - 연구자: Longo, F., & Mirabelli, G. (2008) - 목적: 공급망 관리에서 의사결정을 지원하기 위한 시물레이션 기반 도구 개발	- 이산 사건 시물레이션 - ANOVA	- 다양한 시나리오와 성능 지표를 고려한 공급망 시물레이션 모델 개발 - DOE와 ANOVA를 통한 시물레이션 결과 분석을 통해 최적 의사결정 지원 - 재고 정책, 리드 타임, 수요 변동성 등 주요 변수에 따른 성능 분석
7	- 연구명: Supply chain risk, simulation, and vendor selection - 연구자: Wu, D., & Olson, D. L.(2008) - 목적: 공급망 내 세가지 유형의 위험 평가 모델 비교 분석	- 문헌조사 - 확률적 프로그래밍 (CCP) - 자료포락분석 (DEA) - 다목적프로그래밍(MOP) - 시물레이션	- 세 가지 유형의 공급망 모델에 대한 시물레이션 수행 및 비교 분석 - 불확실한 공급망 환경에서 의사결정을 평가하고 개선할 수 있는 모델 제시
8	- 연구명: Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: Models and algorithms - 연구자: You, F. 외(2009) - 목적: 글로벌 공급망 위험 관리	- 문헌조사 - 시물레이션	- 위험관리 모델을 도입하고 비용과 위험 간의 균형을 설정하기 위해 다중 목표 최적화 모델 제시 - 시물레이션을 활용하여 제안된 모델 및 알고리즘 성능 평가
9	연구명: A decision support framework for global supply chain modelling: an assessment of the impact of demand, supply and lead-time uncertainties on	- 문헌조사 - 공급망 모델링 - 최적화 - 시물레이션	- 글로벌 공급망 영향 분석을 위한 의사결정 지원 프레임워크 개발 - 최적의 계획을 제공하는 공급망 모델링 개발 및 시물레이션을 통한 성능 평가

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	performance • 연구자: Yavuz Acar 외(2010) • 목적: 수요, 공급 및 리드타임 불확실성이 서비스 성과에 미치는 영향 분석		
10	• 연구명: An agent-based model of supply chains with dynamic structures • 연구자(연도): Li & Chan(2013) • 목적: 동적 구조를 가진 MTS(make-to-stock) 및 MTO(make-to-order) 공급망 시뮬레이션을 위한 공통 에이전트 기반 모델을 제안	• 문헌조사 • 시뮬레이션	• 연구는 역동적인 공급망에서 진행되는 복잡한 프로세스에 대한 이해를 높이기 위한 시도 • 가상의 공급망은 쉽게 모델링할 수 있고 모델은 에이전트의 작업을 위해 다른 모델로 확장될 수 있음 • 본 연구는 공급망의 에이전트 기반 모델을 개발하는 이론적 연구에 맞추어져 있지만 도메인이 공급망 관계인 경우 다른 응용 분야로 확장이 가능
11	• 연구명: Simulation and Modeling Efforts to Support Decision Making in Healthcare Supply Chain Management • 연구자(연도): AbuKhoua et al. (2014) • 목적: 의료 공급망 관리에서 의사 결정을 지원하기 위한 시뮬레이션 및 모델링 기법 분석 및 개발	• 문헌조사 • 사례 연구 • 시뮬레이션	• 의료 공급망에서 발생하는 주요 과제 식별 및 해결을 위한 시뮬레이션 접근법 제안 • 시뮬레이션을 통해 의사 결정의 효율성을 높일 수 있는 방법 탐색 • 최신 기술을 활용해 다른 의료 관련 분야에서도 적용 가능성 확인
12	• 연구명: An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach • 연구자(연도): Garvey et al.(2015) • 목적: 공급망의 위험 및 위험 확산을 완화할 수 있는 프레임워크를 제안	• 문헌조사 • 베이지안 네트워크(BN) 분석 • 시뮬레이션	• 베이지안 네트워크 분석을 바탕으로 공급망에서 위험 확산 모델을 개발 • 시뮬레이션을 활용하여 공급망 위험을 어떻게 측정하는지 제시 • 시뮬레이션 연구를 활용하여 특정 위험 측정이 공급망 환경에서 어떻게 사용될 수 있는지 설명
13	• 연구명: 글로벌 해운물류 실시간 위치 추적 시뮬레이션 시스템 개발	• 위치추적 알고리즘 개발	• 태그와 물류거점간의 동적 위치 변화를 이용하여 거점 단위 위치 변화 추정

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	• 연구자: 박병권 외(2015) • 목적: 위치추적 알고리즘 정확성 측정	• 시뮬레이션	• 전세계 물류거점을 대상으로 위치추적 알고리즘 성능 평가
14	• 연구명: Simulation-based ripple effect modelling in the supply chain • 연구자(연도): Ivanov, D.(2017) • 목적: 파급효과에서 미개척 분야인 시뮬레이션 모델링에 대한 연구 방향 제시	• 문헌조사 • 시뮬레이션	• 공급망의 파급효과에 대한 연구는 최적화 모델링이 대부분의 연구를 차지 • 시뮬레이션 모델링 연구 방향을 제시하기 위해 다양한 최근 문헌 분석 • 시뮬레이션 적용의 주요 영역을 설명하기 위해 다단계 공급망 설계를 위한 시뮬레이션 모델 제시
15	• 연구명: A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing • 연구자(연도): Cavalcante et al.(2019) • 목적: 디지털 제조 환경에서 데이터 분석 기능을 활용하여 불확실성 하에서 공급업체 성과의 위험 프로파일을 분석하는 접근 방식을 개발	• 시뮬레이션 • 기계학습	• 시뮬레이션과 기계학습을 결합한 혼합형 기술을 개발하고 탄력적인 공급업체 선택 시 데이터 기반 의사결정 지원에 대한 적용을 검토 • 공급업체 신뢰성의 지표로 정시 납품을 고려하고 탄력적인 공급 성과 프로파일 형성을 둘러싼 조건을 탐구 • 공급업체 성과와 탄력적인 공급 사슬 성능의 위험 프로파일 개념을 이론화
16	• 연구명: A Critical Review of Simulation Applications in Supply Chain Management • 연구자(연도): Maina, J., & Mwangangi, P. (2020) • 목적: 공급망 관리(SCM)에서 시뮬레이션의 활용과 효과를 다양한 사례를 통해 검토	• 문헌조사 • 시뮬레이션	• SCM 내 시뮬레이션의 장점을 설명하고 다양한 산업에서의 적용 사례를 소개 • 시뮬레이션과 최적화 모델의 통합 가능성 및 향후 연구 방향 제시
17	• 연구명: Supply chain simulation and optimization with anyLogistix • 연구자(연도): Ivanov, D.(2021) • 목적: 공급사슬 시뮬레이션과 최	• 시뮬레이션 • 최적화	• anyLogistix의 개요와 다양한 복잡도 수준의 모델 개발 방법을 설명 • anyLogistix를 사용하여 모형화할 수 있는 공급사슬관리 및 물류 분야의 실질적인 문제 설정 세트를 제안

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	적화를 위해 anyLogistix 도구를 사용하는 방법을 소개		- 공급사슬관리 및 물류 문제의 의사결정 지원을 위해 anyLogistix를 사용하는 방법을 단계별로 설명 - anyLogistix를 사용하여 추가로 개발할 수 있는 사례를 제시
18	- 연구명: Global shipping network dynamics during the COVID-19 pandemic's initial phases - 연구자: Dirzka, C., & Acciaro, M. (2022) - 목적: 코로나19 팬데믹으로 인한 정기선 네트워크 영향 분석	- 네트워크 시각화 - 파급효과 시뮬레이션	- 팬데믹으로 인한 정기서비스 영향을 분석한 결과 초기에는 동북아시아를 중심으로 서비스가 중단됨 - 이후 중동과 싱가포르의 환적허브에 영향을 미쳤으며 마지막으로 태평양과 대서양 항로에 영향을 미친 것으로 나타남

자료: 기존 연구 분석을 기반으로 저자 작성

■ 기타 모형 선행연구 현황

기타 모형 선행연구 현황은 <부록 표 4>과 같다.

<부록 표 4> 기타 모형 선행연구 현황

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
1	- 연구명: Managing risks in the supply chain using the AHP method - 연구자(연도): Gaudenzi, B., & Borghesi, A. (2006) - 목적: SCM 최적화를 위한 유전 알고리즘 기반 메타휴리스틱 방법론 개발	- 문헌조사 - MIP 개발 - 유전알고리즘 개발	- MIP 수리모형 개발을 통한 최적 SCM 설계 방법론 개발 - NP Hard 문제 해결을 위한 유전 알고리즘 기반 메타휴리스틱 방법론 개발 - MIP 및 유전알고리즘 결과 비교를 통한 검증
2	- 연구명: Integration of Production and Distribution Planning using a Genetic Algorithm in Supply Chain Management - 연구자(연도): Park et	- 문헌조사 - AHP - 사례연구	- 공급망 목표에 따른 리스크 지표 선정 및 우선순위 설정 - AHP를 이용해 리스크의 중요도와 영향도 분석 - 사례 연구를 통해 모델의 실용성과 관리적 유연성 검증

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	al.(2007) • 목적: 공급망 목표 달성에 방해되는 리스크 평가를 위해 AHP 기법을 사용한 모델을 제시		
3	• 연구명: Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP) • 연구자(연도): Tummala, R., & Schoenherr, T. (2011) • 목적: 공급망에서의 리스크 관리 절차를 통해 위험 요소를 식별하고 평가하며, 이에 대한 대응 계획을 수립하기 위한 프레임워크 제안	• 문헌조사 • SCRMP	• 리스크 식별, 측정, 평가, 완화 및 모니터링의 단계별 리스크 관리 절차 제안 • 공급망의 다양한 리스크 범주와 그에 따른 관리 방안 설명 • SCRMP가 기업의 리스크 대응력 향상에 기여할 수 있음을 강조
4	• 연구명: A Combined Fuzzy Decision-Making Approach to Supply Chain Risk Assessment • 연구자(연도): Moeinzadeh, P., & Hajfathaliha, A. (2009) • 목적: 공급망 위험 평가를 위한 통합 퍼지 결정 방법 개발	• FANP(Fuzzy Analytic Network Process) • FVIKOR	• 공급망 위험 요인 식별 및 위험 평가 인덱스 시스템 구축 • FANP를 통해 지표의 퍼지 가중치 산출 • FVIKOR 기법을 활용하여 위험도가 높은 공급망 구성원 랭킹
5	• 연구명: Modeling approaches for the design of resilient supply networks under disruptions • 연구자(연도): Klibi & Martel(2012) • 목적: 불확실성이 있는 상황에서 위치-운송 문제에 대한 탄력적인 공급망을 설계하기 위한 다양한 모델링 방식을 제시	• 공급사슬 설계 • 시나리오 생성 (몬테카를로 방법) • SAA(Sample Average Approximation)	• 대안적 복원력 모델을 통합하는 몇 가지 확률적 프로그래밍 모델을 제시 • 공급망 중단을 모델링하고 공급망 설계를 정교화 및 평가하기 위한 일반적인 접근 방식 제안 • 제안된 설계 모델을 비교하기 위한 분석이 이루어지고 효율적인 공급망을 설계하기 위한 다양한 접근 방식 제시
6	• 연구명: A systems approach for modelling supply chain risks • 연구자(연도): Ghadge et al. (2013)	• 위험 모델링 • 사례연구	• 시스템 사고를 이용한 공급망 위험 모델링 개념 정립 • 산업 사례를 통한 위험 모델의 타당성 평가

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	• 목적: 공급망 위험을 전체적으로 평가할 수 있는 시스템 기반의 위험 모델링 프레임워크 개발		• 동적 위험 행위 평가를 위한 민감도 분석 및 시뮬레이션 접근 활용
7	• 연구명: Supply Chain Risk Management: A Content Analysis Approach • 연구자(연도): Ceryno et al. (2013) • 목적: 공급망 위험 관리(SCRM) 연구 동향 분석 및 체계적 문헌 검토	• 문헌검토 • 콘텐츠 분석 접근법	• SCRM의 주요 정의와 관련 연구 분야 정리 • 위험 식별, 평가, 관리 도구 등 세 단계로 구성된 개념적 프레임워크 제시 • 연구의 미흡한 점과 향후 연구 필요성 강조
8	• 연구명: Retail supply chain network design under operational and disruption risks • 연구자(연도): Sadghiani, N. S. 외(2015) • 목적: 시나리오 기반의 모델링 기법을 통해 강력하고 탄력적인 소매 네트워크를 설계	• 문헌조사 • MSCM(Multiple Set-Covering Model) 개발 • 시나리오 기반 모델링 • 사례분석 및 검증	• 분석 결과는 운영 및 중단 위험을 고려하지 않고 소매 네트워크를 설계하는 것은 문제가 발생할 수 있음을 확인 • 개발된 모델은 무작위로 생성된 예제와 매업의 실제 사례 연구를 통해 검증 • 다중 척도로 소매점을 여러 번 확인하는 절차를 거치면 네트워크의 복원력이 크게 향상됨
9	• 연구명: Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review • 연구자: Josenildo Brito Oliveira 외(2016) • 목적: 공급망 시뮬레이션의 체계적인 분석	• 문헌조사 • 통계 분석	• 공급망 모델링과 시뮬레이션 방법론은 잘 통합될 수 있다고 평가함 • 실제 데이터를 기반으로 실시한 시뮬레이션은 공급망을 사실적으로 표현하여 문제 해결을 위해 더 유용한 것으로 나타남
10	• 연구명: Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study • 연구자(연도): Hasani & Khosrojerdi(2016)	• 네트워크 설계 • 강건 최적화 • 유전알고리즘	• 연관된 중단의 위험을 완화하기 위한 6가지 복원 전략을 제안 • 혼합형 유전알고리즘의 형태인 병렬 미미틱 알고리즘을 개발 • 글로벌 의류기기 제조사의 실제 사례를 모형으로 해결하여 경영 통찰력을 제시

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	• 목적: 불확실성 하에서 강력한 글로벌 공급사슬 네트워크를 설계하기 위한 혼합 정수 비선형 모형을 개발		
11	• 연구명: Simulation-based evolutionary algorithm approach for deriving the operational planning of global supply chains from the systematic risk management • 연구자: Park, Y. B., & Kim, H. S.(2016) • 목적: 글로벌 공급망 위험을 사전 처리하기 운영 계획 도출	• 문헌조사 • 사례분석 • 시뮬레이션 기반 진화 알고리즘(EA)	• 공급망 위험 관리에 대응하기 위한 시뮬레이션 기반 진화적 알고리즘 개발 • 연구 결과 제안된 알고리즘은 수동적 위험관리와 비교하여 산업 이익을 증가시키는 것으로 나타남
12	• 연구명: Supply chain risk and resilience: theory building through structured experiments and simulation • 연구자: Macdonald, J. R. 외 (2018) • 목적: 기존 공급망 연구 리뷰 및 향상된 모델 제시	• 문헌조사 • 이산사건 시뮬레이션	• 공급망 위험에 기여하는 요인, 영향, 탄력성 등에 대한 정의 • 구조화된 실험 설계와 공급망의 이벤트 시뮬레이션을 결합한 향상된 모델 제시
13	• 연구명: The Role of Simulation and Optimization Methods in Supply Chain Risk Management: Performance and Review Standpoints • 연구자: Oliveira, J. B.et al. (2019) • 목적: 공급망 위험 관리(SCRM)에서 시뮬레이션과 최적화 방법의 역할과 성과를 분석	• 문헌조사 • 최적화 • 시뮬레이션	• SCRM에서 시뮬레이션 기반 최적화 모델의 역할과 한계를 분석 • 복합적인 공급망 위험을 관리하기 위한 최적화와 시뮬레이션의 통합 필요성 강조 • SCRM 향상을 위한 하이브리드 모델 제안
14	• 연구명: Risk management methodology in the supply chain: a case study applied • 연구자: Hermoso-Orzáez, M. J., & Garzón-Moreno, J.	• 문헌조사 • 사례연구	• 공급망 위험 관리 절차의 주요 단계(위험 식별, 분석, 완화, 제어) 설명 • 실제 사례를 통한 방법론 적용과 주요 위험 분석

구분	연구 개요	연구 방법	주요 연구 내용
	(2022) • 목적: 공급망 위험 관리를 위한 ISO 28000 및 ISO 31000 표준을 기반으로 한 사례 연구 접근법 개발		• 위험 관리 향상을 위한 전략 제안 및 ISO 표준의 적용 가능성 논의
15	• 과제명: 공급사슬 회복탄력성의 핵심 역량에 관한 해석적 구조 분석 • 연구자(연도): 박동욱(2020) • 목적: 글로벌 공급망 내의 기업들이 회복탄력성을 증진해 나갈 방안 및 해석적 구조모형을 적용하여 회복탄력성 개념의 구조와 층위를 개념적으로 분석, 글로벌 가치사슬 재편의 실현방안 제시	• 문헌조사 • 사례조사 • 해석적 구조모형 (interpretive structural model)	• 해석적 구조모형 개념 • 핵심역량 구조 분석 • 회복탄력성 증진 방안
16	• 연구명: Conceptualisation of a 7-element digital twin framework in supply chain and operations management • 연구자(연도): Ivanov, D.(2023) • 목적: 공급사슬 및 운영 관리의 디지털 트윈 연구에 필요한 개념적 구조 제시	• 문헌조사 • 디지털 트윈 • 인공지능	• 공급사슬 및 운영 관리의 디지털 트윈 연구에 어떤 요소가 속하는지 결정하기 위해 통합적인 문헌 검토 • 공급사슬 및 운영 관리 디지털 트윈의 7가지 요소(기술, 사람, 관리, 조직, 범위, 작업, 모형화)를 정의 • 공급사슬 및 운영 관리 디지털 트윈의 5가지 주요 유형을 구분 • 공급사슬 및 운영 관리 디지털 트윈은 현실의 단순한 복제가 아니라, 지속적인 인간-인공지능 상호 작용과 관련된 복잡한 사회 기술적 현상이라고 결론지음

자료: 기존 연구 분석을 기반으로 저자 작성

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2024년

01	섬·바다·강 연계 관광 네트워크 구축방안 연구	최일선
02	해양 스타트업 실패 자산화 방안 연구	좌미라
03	시민친화적 바닷가 공간 조성에 관한 연구	정지호
04	연안이용 관리 법제 정비방안 연구	최석문
05	특별관리해역 관리제도 재편 방안 연구	최수빈
06	해양관할구역 과세권한의 체계적 배분방안 연구	이혜영
07	어업인의 디지털 전환 수용성 제고방안 연구	오서연
08	수산물 무역(수출입) 단기 전망모형 구축 연구	한기욱
09	어촌소멸에 따른 사회경제적 영향분석과 대응전략 연구	이상규
10	어촌다움에 기반한 어촌공간관리 방안 연구	이승혜
11	파생상품을 이용한 해운선사의 위험관리에 관한 연구 - 운임선도거래(FFA)를 중심으로 -	김한나
12	내항상선 해양사고 경감방안 연구	허성례
13	항만재개발사업 공공성 강화 방안 연구	김세원
14	해외 항만터미널 확보 전략 연구	김근섭
15	항만 하역능력의 서비스 수준 개선 연구	이화섭
16	국내 무역항 거버넌스 체계 개편방안 연구	김근섭
17	선박의 원격운항을 위한 제도 개선방안 연구	박혜리
18	국제물류기업 육성을 위한 법제 개선방안 연구	최나영환
19	글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구	강무홍
20	한-북미 무역구조 분석 및 물류공급망 변화 대응방안 연구	이성우

2023년

01	자율운항선박 운항을 위한 해상교통관제 대응방안 연구	박상원
02	인공지능(AI)을 활용한 무역규범의 해양수산분야 영향 분석 연구	임병호
03	공급망 안정화를 위한 항만의 대응방안 연구	이나영
04	연안재해 정보 활용 개선 방안 연구	김찬웅
05	항만의 생활물류 기능 활성화 방안 연구	최석우
06	마을어장 이용·관리 개선방안 연구	마창모
07	해양생태계 복원정책 개선방안 연구 - 사회·생태복원 중심으로 -	최석문
08	주민행태기반 해양정책 수용성 제고 설계 방안 연구	이슬기
09	항만연관산업 고도화 방안 연구	김세원
10	탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구	조아현
11	물류 연계 효율화를 위한 스마트항만 구축방안 연구 - 항만물류 데이터 공유 플랫폼을 중심으로 -	서정용
12	어업분야 중대재해처벌법 대응방안 연구	고동훈
13	수산물의 디지털 수출 활성화 방안 연구	이상건
14	항만개발사업의 정책영향평가 연구	이수영
15	해운산업의 미래 변화 예측과 국내 대응 전략 연구	이호춘
16	어선현대화 촉진을 위한 금융제도 개선방안 연구	엄선희
17	연안도시의 쇠퇴와 대응방안 연구	강창우
18	해양범죄 실태 진단을 통한 대응체계 개선방안 연구	민영훈
19	민간기업의 해양환경분야 ESG 활성화 방안 연구	김지윤
20	식량안보를 고려한 수산물 수급관리 방안 연구	허수진
21	지방분권시대의 수산업·어촌분야 대응전략 연구	이호림
22	해운산업 고도화를 위한 선박투자 활성화 방안 연구	김한나
23	글로벌 공급망 리스크 대응 물류망 최적화 방안 연구 : 한국-북미 물류공급망 중심	이성우

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2024년

01	해양정보산업 진흥을 위한 제도 개선 방안 연구	김찬웅
02	한-아프리카 국제수산업 협력 체계 개선 연구	이재령
03	해양안보 MDA 체계 협력적 운용 방안 연구	민영훈
04	인천항 자유무역지역의 효과적 운영을 위한 전략 방안	한장협
05	해양문화자원을 활용한 연안도시활력 증진 방안 연구	이슬기
06	부산항 물동량 유치방안 연구	김은우
07	국제사회의 대북제재 동향과 우리의 대응:해양수산업분야를 중심으로	채수란
08	국내 연안여객선 관광·이용 활성화 방안 연구	이정아
09	내수면어업 허가·신고 제도 개선방안 연구	최순
10	어업 선진화를 위한 어업관리체계 개편 방안 연구	심성현
11	글로벌 공급망 변동에 따른 해운물류 지원방안	황수진
12	연안 중소선사의 탄소중립 달성을 위한 친환경정책 지원방안	류희영
13	항만기술산업 활성화를 위한 법제도 정비 방안 연구	김보경
14	해양모태펀드 투자활성화 방안 연구	한기원
15	특별관리해역 내 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 강화방안	장원근
16	중대재해처벌법 대응 양식장 안전성 개선 방안 연구	윤미경
17	국가관리연안항 발전전략 수립체계 연구	신정훈
18	글로벌 공급망 대응 해운항만물류 전문인력 양성 발전방안 연구	권보배
19	해양수산 국제개발협력 중장기 전략 연구	전혜은

Ⅰ 2023년

01	양식어업 비과세 합리화 방안 연구	이정필
02	복합해양레저관광도시 개념정립 및 추진방안에 관한 연구	최일선
03	항만기술산업 육성을 위한 법제도 마련 연구	안승현
04	블루푸드테크 전문기관의 도입 필요성에 대한 연구	이동림
05	지방자치단체의 해양관할구역 설정 요인 연구	이혜영
06	양식장 내 어류 복지 기준 마련을 위한 연구	오서연
07	해양플라스틱 재활용산업 공급사슬 기반 조성 연구	이윤정
08	중소·중견 물류기업의 ESG경영 가이드라인 구축 연구	이재호
09	신항만건설사업의 민간투자 확대를 위한 제도개선 연구	김보경
10	해수욕장 이용객 집계·관리체계 개선방안 연구	이정아
11	유엔 플라스틱 협약의 주요쟁점 분석 및 대응방향 연구	박수진
12	어촌 활력 제고를 위한 제도 개선방안 연구	문지원
13	어선의 친환경에너지 전환방안 연구	고동훈

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2024년

01	한-북극권 청색경제 협력사업 추진 방안	김엄지
02	전환기 글로벌 해양환경규범의 대응력 강화 연구	박수진
03	해양 지속가능성 시범 평가 연구	최희정
04	Scope 3 기준 원양산업 탄소배출추정 및 대응방안 연구 - 원양저연승어업을 중심으로	조현주
05	수산물 공급망 관리 개선 방안 연구(한·태 무역을 중심으로)	한기욱
06	신통상규범 확대에 따른 수산분야 영향 및 대응방안	박혜진
07	탄소배출규제 대응을 위한 컨테이너 선대 교체 수요 추정연구	최건우
08	연안항개발사업의 경제적 편익에 관한 연구	김성아
09	한국과 미동부 항만 간 녹색해운항로 구축방안 연구	김가현
10	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅲ) -철광석, 화학공업생산물, 기타광석, 잡화를 중심으로	이나영
11	접안 대기시간 감소에 따른 탄소집약도지수(CII) 변화 분석	김보람

Ⅰ 2023년

01	해양수산업 조기경보지수 개발 - 컨테이너 해운시장을 중심으로	권장한
02	AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(Ⅱ) - 우리나라 주요 항만을 중심으로	강무홍
03	우리나라 수산식품 소비 활성화 방안 마련 연구	한기욱
04	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅱ) - 유류, 철재, 모래, 목재, 양곡을 중심으로	이화섭
05	대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구	조아현
06	항만개발사업 정책효과 세부항목별 효과산정 방법 연구	이종필
07	해양 지속가능성 평가체계 구축 연구	최희정
08	국내 해운기업의 ESG 경영 확산 방안 연구	황진희
09	해운 경기순환 분석 및 예측 연구	황수진
10	수산물 공급 안정을 위한 수입수산물 전략품목 관리 방안 연구	박혜진
11	항만산업 여성인력 확대방안 연구	이지원
12	선사공동행위의 규제 및 행동 변화에 따른 영향 분석과 정책방안 연구	류희영

기본연구 2024-19

글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구

인쇄 2024년 12월 29일

발행 2024년 12월 31일

발행인 김 종 덕

발행처 한국해양수산개발원

주소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

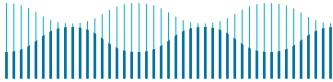
연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 ㈜디자인월드 (051-916-1533)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원



글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구

A Study on the Development of an Analysis Model
for the Effectiveness of Global Supply Chain Risk Hedge Policies



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

부산광역시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

TEL. 051-797-4800

FAX. 051-797-4810



9 791168 662506

ISBN 979-11-6866-250-6 값 15,000원