

시뮬레이션 기법을 이용한 양륙항만 야적화물의 소산 개선에 관한 연구

방현석¹, 조규성^{2*}

¹동명대학교 항만물류시스템학과 대학원생, ²동명대학교 항만물류시스템학과 교수

A Study on the Improvement of Yard-Cargo Dispersal at a Seaport of Debarkation using Simulation Modeling

Hyun Seok Bang¹, Gyu Sung Cho^{2*}

¹Student, Department of Port Logistics System, Tongmyong University

²Professor, Department of Port Logistics System, Tongmyong University

요약 러시아-우크라이나 전쟁 등 국제 분쟁이 장기화 되면서, 전시 양륙항만(Sea Port Of Debarkation, SPOD)의 신속한 기능 회복과 증원전력의 신속 전개 지원 능력이 전시에서 매우 중요한 요인이 되었다. 국내 항만분야에서는 해양수산부를 중심으로 국가 비상사태에 대비하여 정부 기능 유지 및 군사작전 지원을 위한 충무계획을 통한 양륙항만 야적화물의 소산 계획을 수립하고 있다. 하지만, 전시 전환 시점에서 컨테이너 야드(Container Yard, CY)에 잔존하는 상업용 야적화물이 적시에 타 장소로 소산되지 못하면 컨테이너 야드 가용성 저하 및 상업용 야적화물과 군수화물의 혼잡으로 군수물자의 후속 처리 지연이 발생할 수 있다. 이에 본 연구는 전시 양륙항만 야적화물의 소산을 효율적으로 수행하기 위한 정수계획 기반 소산계획 평가 방법을 제시하였다. 그리고 제시된 소산 계획 평가 방법을 검증하기 위해서 부산항 A부두를 대상으로 AnyLogic를 사용한 이산사건 시뮬레이션 기법을 적용하여 본 연구에서 제시된 정수계획 기반 소산계획 평가 방법의 우수성을 검증하였다. 본 연구를 통해서 현재 충무계획 전력 조건에서 목표기간 내 전량 소산의 한계를 증명하였으며, 소산장비 규모, 소산지 수용능력, 이동로 및 동선 제약을 정량적으로 고려한 연구를 지속적으로 수행해야 할 것이다.

주제어 : 양륙항만(SPOD), 야적화물, 소산계획, AnyLogic, 이산사건 시뮬레이션

Abstract As international conflicts such as the Russia-Ukraine war become prolonged, the rapid restoration of wartime Sea Ports Of Debarkation (SPOD) and their ability to support the swift deployment of reinforcement forces have become critical factors in wartime operations. In Korea, the Ministry of Oceans and Fisheries, as the lead agency, establishes dispersal plans for container-yard cargo at SPODs under the Chungmu Plan to ensure the continuity of government functions and support military operations during national emergencies. However, if commercial cargo remaining in the Container Yard (CY) at the time of wartime declaration is not promptly dispersed to alternative locations, reduced yard availability and congestion between commercial and military cargo may delay the subsequent handling of military supplies. To address this issue, this study proposes an integer programming-based evaluation method for dispersal planning aimed at improving the efficiency of cargo dispersal at wartime SPODs. To validate the proposed method, a discrete-event simulation model using AnyLogic was applied to Terminal A of Busan Port, and the effectiveness of the integer programming-based dispersal planning approach was verified. The results demonstrate the structural limitations of achieving full dispersal within the target period under the current force conditions of the Chungmu Plan, and suggest the necessity of continuously incorporating quantitative considerations of dispersal equipment scale, site capacity, and transportation route constraints.

Key Words : Sea Port Of Debarkation(SPOD), Yard Cargo, Dispersal Planning, AnyLogic, Discrete Event Simulation

*교신저자 : 조규성(gscho@tu.ac.kr)

접수일 2026년 03월 03일

수정일 2026년 04월 07일

심사완료일 2026년 04월 17일

1. 서론

전시 양륙항만(Sea Port Of Debarkation, SPOD)은 증원전력 및 군수화물의 유입·처리·반출이 집중되는 전 개작전의 핵심 노드이다[1]. 이때, 전시 SPOD의 성패는 단순한 “하역장비 처리능력”에만 좌우되지 않는다. 전시 전환 시점에 컨테이너 야드(Container Yard, CY)에 이미 적치되어 있는 초기 야적화물을 얼마나 빠르고 체계적으로 소산하여, 군수화물 처리를 위한 최소 작업공간과 운영 여건을 회복할 수 있는지가 중요하다. 야적화물은 전시 전환 시점에 SPOD CY에 이미 야적되어 있는 상업용 야적화물인 상업용 컨테이너 재고를 말한다. 야적화물의 소산계획은 전시 전환시 자연 소멸하지 않으며, 반출(게이트·내부동선), 수송(차량 대수·회차시간·통제), 소산지 수용(진입로·회차·적치단수·운영시간·장비대수) 제약 등을 고려할 경우 매우 복잡한 문제로 정의가 될 수 있다. 선행연구는 군 전력 전개 과정의 항만선택, 수송 의사결정을 고려한 연구[2], 최적의 컨테이너 터미널의 야드·장비·게이트 운영을 위한 시뮬레이션 적용 연구[3-7]가 있다. 또한, 전시 복합운송 의사결정에 시뮬레이션을 적용한 연구[8] 및 시뮬레이션 모형의 검증 및 타당성 확보 방법론[9]이 제시되었으나, 전시 SPOD에서 초기 야적화물의 신속한 소산을 독립된 핵심 제약으로 두고, 부두 반출·수송·소산지 수용을 통합한 계획모형을 검증한 연구는 제한적이다. 또한, 항만·해상교통로·화학사고 등 다양한 분야에서 재난 상황 발생시 대규모 물동량 일괄적 처리 및 소산 방식의 한계를 지적하고, 대상의 특성과 시간적 제약을 고려한 선별적·단계적 소산계획의 필요성을 제시한 연구가 있다[10-12]. 그러나, 기존 연구들은 전시 SPOD 운용을 위한 야적화물의 소산 문제를 정량적 계획 산출-운영 실행 검증으로 연결하는 통합 프레임으로 다루지 못하였다. 기존의 항만운영 연구는 주로 평시 컨테이너 터미널의 장비 배치, 게이트 혼잡, 야드 운영 효율화 등에 초점을 두어 왔으며, 군수 분야 연구는 증원전력의 항만선택과 수송 의사결정에 중점을 두었다. 그러나 전시 SPOD에서 실제로 선행되어야 하는 과업은 기존 상업용 야적화물을 신속히 소산하여 군 전개를 위한 작업공간을 확보하는 것이며, 이는 단순한 평시 항만운영 문제나 일반 수송계획 문제와 구별되는 독립적 운영문제이다. 특히 전시 전환 시점에 CY에 잔존하는 야적화물이 적시에 제거되지 못할 경우, 항만 지정 자체가 이루어져도 실제 RSOI 수행은 지연될 수 있으므로, 계획의 존재 여부보다 실행 가능성에 대한 정량적 검증

이 더욱 중요하다.

따라서, 본 연구는 기존연구의 한계점인 전시 SPOD의 반출·수송·수용능력을 동시에 고려한 정량적 소산 최적화 모형의 부재를 보완하기 위하여, 정수계획 기반 소산최적화 방법을 제시하고, 시뮬레이션 방법을 통한 전시 SPOD 야적화물 소산개선을 수행하고자 한다. 이를 통해, 기존의 총무계획과 전시 항만지원체계가 실제 운용 수준에서 얼마나 실행 가능한지에 대한 정량적 검증과 전시 SPOD의 초기 공간회복 문제를 정량적·실증적으로 분석하고, 계획과 실행의 간극을 검증할 수 있는 통합 분석틀을 제시함으로써, 전시 항만운영 연구의 공백을 보완하고 실질적인 계획 개선의 근거를 제공하고자 한다.

2. 전시 양륙항만 운영

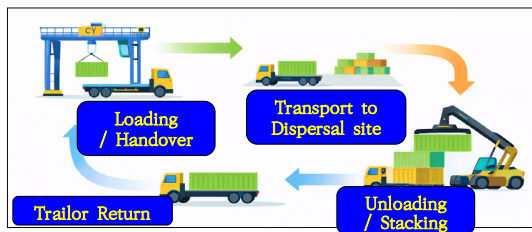
2.1 전시 항만운영 지원계획

SPOD은 전시 또는 국가비상단계에서 증원전력과 군수화물의 유입·처리·반출이 집중되는 핵심 노드이며, 전시 전환 초기의 항만 기능 회복 수준은 후속 전개 일정과 직접적으로 연동된다[1][13]. SPOD는 단순 하역 지점이 아니라 ① 선박 접안·하역, ② 야적 및 작업장 운영, ③ 통관·검역 등 지원 기능, ④ 이동통제와 배후 수송 연계가 결합되는 복합 운영으로 정의된다. 우리나라의 비상대비체계는 총무계획을 기반으로 관계기관이 역할을 분담하여 항만 기능을 유지·전환하고, 군 전개 지원이 가능하도록 하는 실행틀을 마련하고 있다[14-15]. 특히, 전시 항만지원은 부두의 단순 제공이 아니라, 전시 전환 과정에서 항만 기능 유지와 군 전개 지원을 동시에 달성하기 위한 민·관·군 협력 운영을 전제로 한다[16-17]. 전시 항만운영은 군 단독으로 수행될 수 없으며, 해양수산분야 행정기관의 비상대응 계획, 항만운영 주체(항만공사·터미널 운영사)의 자원·시설 운용, 지자체·관계기관의 교통·치안·방호 지원이 결합되어야 한다[17]. 또한, 군은 전시 이동통제 및 수송지원 체계를 기반으로 SPOD 인수 이후 RSOI를 수행하게 된다[16]. RSOI는 Reception(수용), Staging(대기), Onward Movement(전방 이동), Integration(전력 통합)의 약자로 전구(戰區)에 도착한 증원전력이 작전부대에 통합되기까지의 전 과정을 의미한다. 다만 전시 전환의 현실적 취약점은 “즉시성”과 “기존 화물 처리” 문제로 수렴한다. 전시 전환 시점에 CY에 잔존한 상업용 야적화물이 야드 가용성과 내부 동선을 저해하면, 증원전력의 하역 및 RSOI 수행 자체가 지연될

수 있으므로 기존 화물의 신속한 소산이 핵심적인 과업이 된다[14][17]. 미군 교리에서도 항만 개방단계에서 장비·인력·정보체계의 신속한 투입과 민간 운영주체와의 조정이 전개보장의 선결 조건임을 강조하며, RSOI는 SPOD 처리성과 직접적으로 결합된 전개 프로세스임을 제시한다. 따라서, SPOD에서 초기 야적화물이 적시에 소산되지 않으면 수용(R)단계의 혼잡이 대기(S) 공간의 부족과 전방이동(O) 지연으로 확산되어, 전력통합(I) 시점까지 연쇄 지연될 수 있다. 이런 점에서 전시 SPOD 운영의 목표는 "하역량 증대"만이 아니라, 전시 전환 직후 야드 가용성을 회복하여 RSOI를 수행할 공간과 동선을 확보하는 데 있으며, 이를 위해 초기 야적화물 소산을 독립된 운영과제로 정식화할 필요가 있다.

2.2 야적화물 소산개념

본 연구는 전시 야적화물 소산을 초기재고 소산 문제로 정의하고, ① 부두 반출능력, ② 내륙 수송능력, ③ 소산지 수용능력 등 3가지 요인을 제약식으로 고려한다. 전시 SPOD 야적화물 소산 문제는 제한된 반출·수송·수용 능력 하에서 일별·소산지별 물량을 배정해야 하는 자원배분 의사결정 문제이다. 본 연구는 먼저 정수계획 모형을 통해 야적화물의 병목 구조를 수학적으로 반영한 최적 소산계획을 도출하였다. 이어서, AnyLogic 기반 이산사건 시물레이션을 적용하여 도출된 소산계획의 실행 가능성과 병목 발생 여부를 검증하고, 현실적 소요시간을 분석하였다. 즉, 정수계획이 '최적 계획의 도출'을 담당한다면, 시물레이션은 '계획의 현실 적합성 검증'을 담당하는 상호보완적 구조로 설계하였다. 소산 성과 평가 지표로는 초기재고가 목표수준인 소산완료에 이르는 데 필요한 최소시간으로 정의 하였다[18]. 일반적으로 야적화물 소산은 대상화물 적재/인계-소산지 이동-하역/적차-트레일러 복귀의 순환과정을 거친다. 세부내용은 Fig.1과 같다.

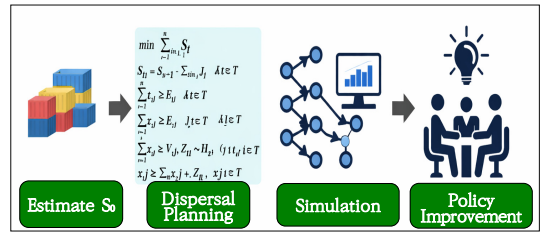


(Fig. 1) Conceptual Diagram of the Cargo Dispersal Process

본 연구의 목적은 전시 SPOD 운영에 필요한 소산계획을 정량적으로 산출하고, 실행 가능성과 병목을 검증하는 통합 접근을 제시하는 것이다. 본 연구의 핵심내용은 다음의 3가지이다.

- ① 초기 야적화물(S_0)은 어떻게 산정할 수 있는가?
- ② 반출-수송-수용 제약 하에서 S_0 의 전량소산의 최소 소요시간은 어떻게 도출되는가?
- ③ 실험 결과 병목구조는 무엇이며, 어떻게 발전시킬 수 있는가?

연구대상은 부산항 A부두이며, 분석 절차는 ① S_0 산정 → ② 정수계획 기반 소산계획 도출 → (3) 시물레이션을 통한 검증 → ④ 정책적 개선과제 도출로 본 연구에서는 Fig.2와 같이 수행한다.



(Fig. 2) Research Procedure

3. 야적화물 소산계획 모형 설계

3.1 S_0 및 소산능력 산정

컨테이너 터미널 운영자료는 터미널 운영사의 핵심 영업·운영 정보에 해당하며, 블록·장비·시간 단위의 터미널 운영시스템(Terminal Operating System, TOS) 원자료는 외부 공개가 극히 제한적이다. 이에 본 연구는 공개 통계자료와 문헌 기반 환산계수를 활용한 간접추정 방식을 적용하여, S_0 를 산정하였다. 이를 위해 먼저, 공개자료의 가용성과 신뢰성을 고려 CY면적과 동시 장치능력이 동시에 공개된 부두인 자성대 부두 면적(462,000㎡)과 동시장치능력(44,681TEU)를 고려한 환산계수는 10.34㎡/TEU 이 된다. 이를, A부두의 면적(442,000㎡)에 대입하여, A부두의 장치능력인 42,800TEU을 산정하였다. 본 연구에서 자성대 부두의 면적 대비 동시 장치능력으로부터 도출한 10.34㎡/TEU 환산계수는 연구대상 부두와 기준부두의 야드 구성 및 장비 운용이 완전히 동일하다는 의미가 아니라, 동일 부산 북항 내 컨테이너 전용터미널 간 장치능력 규모를 공개 자료만으로 일관되

게 비교하기 위한 보수적 공통 환산계수로 채택한 것이며, 실제로 BPA 자료상 신감만·감만(1B)의 적재 가능용량 합계는 40,399TEU이며, 본 환산계수를 적용한 이론적 동시 장치능력 42,800TEU와 큰 차이를 보이지 않아, 간접추정치가 실무 자료와 현저히 괴리되지 않음을 확인하였다. 다만 야드 블록 설계, 통로폭, 장비 배치, 운영방식 등에 따라 오차가 발생할 수 있으므로, 본 추정치는 자료 공백 하에서의 예비적 산정값으로 해석하였다.

또한, 특정시점의 야적재고는 야드 점유율이 약 70% 수준에서 혼잡이 유발될 수 있음을 규정한 OECD자료 [21]를 근거로, 본 연구는 보수적인 혼잡수준인 70%를 적용하여, A부두의 초기 야적재고(S_0)를 30,000TEU로 산정하였다.

전시 소산능력은 부두(게이트 포함) 반출능력, 항만-소산지 수송망 용량(도로·차량·회전율) 및 소산지 일일 수용능력을 동시에 고려하며, 3가지 능력중에서 최소능력을 실제 소산능력으로 산정한다.

본 연구에서는 야적화물 초기재고(S_0)가 누적소산량(D_t)에 의해 모두 해소되는 최소시점을 소산 완료시간(T_{clear})으로 식(1)과 같이 정의한다[21~22].

$$T_{clear} = \text{Min}\{t \in Z_+ : D_t \geq S_0\} \quad (1)$$

T_{clear} 는 야적화물 소산능력의 성과지표라 할 수 있으며, 이는 3.2 정수계획 모형에서 목적함수인 잔류재고 최소화($\text{Min} \sum_{t=1..T} S_t$)와 연결된다.

3.2 정수계획 모형

전시 야적화물 소산 문제는 일자별, 소산지별 소산량을 결정해야 하는 이산적 배정 및 스케줄링 문제로, 다수의 제약조건 하에서 야적화물 소산계획안을 도출해야 하는 의사결정 문제에 해당한다. 이에 본 연구는 정수계획 모형을 통해 반출·수송·수용 제약을 명시적으로 반영한 소산 일정을 도출하고, 이후 이산사건 시물레이션을 활용하여 해당 계획안의 실행 가능성과 병목을 검증하는 접근방법을 사용하였다. 전시 소산계획의 핵심 의사결정은 “t일차에 어떤 소산지로 얼마를 보낼 것인가”이며, 일자별·소산지별 소산량을 결정변수로 하는 정수계획 모형은 아래와 같다.

$$\text{Min} \sum_{t=1..T} S_t \quad (2)$$

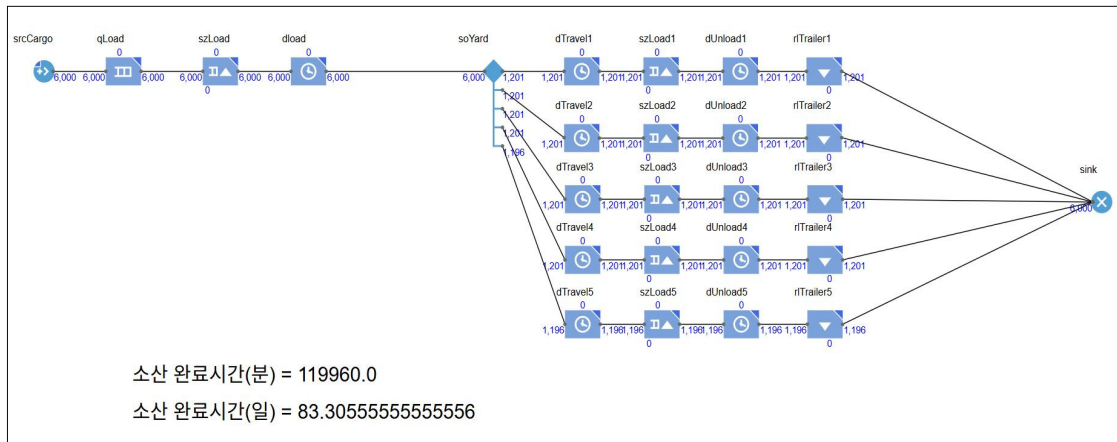
$$\text{s.t. } S_t = S_{t-1} - \sum_{j \in J} x_{jt}, S_t \geq 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jt} \leq E_t \quad (4)$$

$$x_{jt} \leq v_{jt}, x_{jt} \leq h_{jt} \quad (5)$$

$$x_{jt} \in Z_+, S_t \geq 0 \quad (6)$$

식(2)는 본 연구의 목적함수로 계획기간 동안 야적화물 잔류재고(S_t) 최소화가 된다. 식(3)~식(6)은 목적함수인 식(2)의 제약조건으로, 식(3)은 야적화물 잔류재고(S_t), 식(4)~식(5)는 부두반출능력, 수송능력, 야적장 수용능력의 제약조건을 설명하고 있다. 정수계획 모형의 식들은 다음과 같이 세부적으로 설명할 수 있다. 식 (2)는 계획기간 동안의 일자별 잔류재고 총합을 최소화한다. 이는 잔류재고를 가능한 한 초기에 감소시키는 해를 선호하므로, 결과적으로 소산 완료시간 T_{clear} 의 단축과 정합적으로 연결된다. 식(3)은 t일에 소산된 물량(각 소산지로의 소산량 합)만큼 잔류재고가 감소함을 의미한다. 식(4)는 부두·게이트의 일일 반출 한계로 인해, t일의 총 소산량이 반출가능량을 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 (5)는 특정 일자에 특정 소산지로 이동·적치될 수 있는 물량이 각각 수송망 용량과 소산지 하역·적치 용량에 의해 제한됨을 의미한다. 식(6)은 일일 소산량은 물리적으로 분할 가능한 컨테이너 단위(TEU)이므로, 의사결정 변수는 비음수 정수로 제한함을 나타낸다. 본 수식은 재고 균형식과 자원용량 제약을 포함한 기존의 생산·재고계획 모형의 구조를 기반으로 하되, 이를 전시 SPOD 야적화물 소산문제에 맞게 재구성한 것이다. 본 정수계획 모형은 전시 발령 시점의 초기 야적화물량과 제한된 반출·수송·수용 자원을 동시에 고려하여, 일자별·소산지별 최적 소산계획을 도출하는 것을 목적으로 한다. 즉, 정수계획 모형으로 도출되는 결과값은 일자별 / 소산지별 소산스케줄(배정계획)이다. 반출능력, 수송능력, 수용능력 중 어느 하나라도 제약될 경우 해당 일자의 실제 소산량이 제한되도록 제약식이 구성되어, 전시 항만 운용의 병목 구조를 직접적으로 반영한다. 도출된 소산계획은 이후 이산사건 시물레이션을 통해 현실적 운영 제약 하에서의 실행 가능성과 혼잡·대기 현상을 검증하는 입력값으로 활용된다.



〈Fig. 3〉 Structure of the Simulation Model and Simulation Results

4. 시물레이션을 통한 소산계획 검증

본 연구는 앞서 제시한 수리적 모형을 검증하기 위해서 시물레이션기법을 통한 소산계획을 검증하고자 한다. 실험대상은 전시 SPOD으로 가정한 부산항 A부두이며, S_0 는 동시 장치능력과 장치율을 통해 간접추정한 30,000TEU로 고정하였다. 또한, 3장에서 도출된 정수계획 해 x_{ji} (일별·소산지별 소산 스케줄)을 시물레이션의 ‘일자별 출고/소산지 할당 목표’로 입력하여, 계획안이 실제 운영 제약(자원경합·대기·이동시간 변동) 하에서 실행 가능한지를 검증하였다. 소산을 위한 기본전력(트레일러, 리치스태커 등)과 소산지는 층무계획을 적용하였다. 시물레이션 도구로는 AnyLogic을 사용하였으며, 3장에서 산출된 정수계획 기반 소산 스케줄(x_{ji})을 입력값으로 설정하여 ‘계획상 최적 배정안’의 실행 가능성과 병목을 운영 수준에서 검증하였다. 본 연구에서는 3.2절에서 제시한 정수계획 모형을 통해 일자별·소산지별 최적 소산 스케줄 x_{ji} 를 도출하고, 이를 시물레이션 입력값으로 활용하였다. 정수계획 모형의 해는 부두 반출능력, 수송능력, 소산지 수용능력의 집계 제약을 동시에 만족하는 계획상 최적 배정안으로서, 이론적 최소 소산기간을 제시한다는 의미를 가진다. 정수계획 해를 분석한 결과, 본 연구의 기준 조건에서 도출된 이론적 최소 소산기간은 66.7일로 산정되었다. 이는 일자별 총 소산량과 소산지별 배정량을 집계 수준에서 최적화한 결과이며, 개별 차량의 회차시간, 현장 대기, 자원경합, 이동시간 변동과 같은 시간기반 운영제약은 직접 반영하지 않은 값이다. 반면 동일한 배정계획을 AnyLogic 기반 이산사건 시물

레이션에 입력하여 실행한 결과, 실제 전량소산 완료시간은 약 83.3일로 산정되었다. 즉, 시물레이션 결과는 정수계획의 이론적 최소 소산기간 대비 16.6일 증가한 값으로 나타났으며, 이는 집계형 계획모형에서는 나타나지 않는 운영수준의 병목과 지연요인이 추가적으로 반영되었기 때문이다. 따라서 정수계획 모형은 계획상 가능한 최적 배정안을 제시하고, 시물레이션은 그 계획안이 실제 운영환경에서 어느 정도의 시간 손실과 병목을 수반하는지를 검증하는 상호보완적 도구로 해석할 수 있다. AnyLogic은 이산사건 시물레이션, 에이전트 기반 모형, 시스템 다이내믹스를 단일 환경에서 지원하는 멀티메소드 시물레이션 소프트웨어로서, 복잡한 항만·군수 물류 시스템을 시간의 흐름에 따라 동적으로 재현하는 데 적합하다. 전시 군수 복합운송 분야에서도 시물레이션을 활용한 의사결정 연구가 이루어지고 있으며, 항만 운영과 군수 전개 문제에 이산사건 시물레이션과 수리모형을 결합하는 연구를 수행하였다[23]. Fig.3은 AnyLogic을 활용하여 전체 소산을 위한 프로세스를 설계하고, 이를 기반으로 항만, 트레일러, 소산지 및 각 객체의 작동원리를 설계한 모델 구성도이며, Table.1은 주요 프로세스 로직이다.

층무계획에 반영된 기본전력(트레일러, 리치스태커)과 5개의 소산지를 대상으로 시물레이션을 수행한 결과, 초기 야적화물 30,000TEU가 모두 소산지로 이전하는 결과를 도출하였다. 전체 소산이 완료되는 데 소요된 시간은 약 119,960분, 즉 83.31일로 산정되었다. 본 연구에서 제시하는 시물레이션 모델은 모형 내부에서 에이전트 수를 줄이기 위해 스케일링 변수(teuPerAgent)를 사용

<Table 1> Main Process Logic

Category	Contents
Methodology	Process logic based on DES combined with agent-based modeling
Demand Generation	Generation of initial inventory S_0 through srcCargo
CY Ops	Generation of trailer loading objects using qLoad, dLoad agents
Disper.Site Allocation	Dynamic allocation through the soYard agent
Movement Control	Dynamic allocation considering the distance between SPOD and dispersal sites(10~30minutes, approximatel 1~5 block via dTravel)
Dispersal Ops.	Generation of unloading and stacking objects using szLoad1~5 and dUnload1~5 agents
Resouce Allocation	Dynamic allocaton and return circulation of transport/handling equipment using szLoad, szLoad1~5 and rTrailer1~5
teuPerAgent	5

하였다. 따라서, 실질적인 시물레이션 결과값은 나타난 결과값×스케일링 변수가 된다. 이를 통해 본 모형에서 산출한 일일평균 소산능력은 360TEU/일 수준으로 해석할 수 있다. 소산지별 처리물량을 살펴보면, 시물레이션 종료 시점의 누적 처리량은 1~4번 소산지가 각각 약 6,005TEU를, 5번 소산지가 약 5,955TEU를 처리하였으며, 다섯 소산지의 합은 3,000TEU로, 기준 시나리오에서 설정한 균등 분배 로직에 따라 각 소산지가 전체 물량의 약 20%씩을 처리한 것으로 나타났다. 특히 1~4번 소산지는 6,005TEU, 5번 소산지는 5,955TEU를 처리하여, 분기 확률의 무작위성을 고려할 때 통계적으로 균등 분배에 근접한 결과로 볼 수 있다. 종합해보면, 기준 시나리오에서 제시된 장비 구성과 운용조건 하에서는 SPOD 야적장에 존재하는 30,000TEU 규모의 S_0 을 5개 소산지로 완전히 소산하는 데 약 83일이 소요되며, 소산지 간 물량 분배는 균등 수준을 유지하는 것으로 Table 2와 같이 산정되었다. 또한, 소산성과에 직접적으로 영향을 미칠것으로 예상되는 주요요인인 트레일러 규모를 50%, 100% 증강한 시나리오와 각 시나리오에 대해 총 30회의 반복실험을 통해, T_{clear} 평균값과 표준편차, 95% 신뢰구간을 산출하였다. 세부내용은 Table3과 같다.

<Table 2> Table of Simulation Results

Category	Site 1 (9.2Km)	Site 2 (2.4Km)	Site 3 (3.7Km)	Site 4 (2.7Km)	Site 5 (3.2Km)
Throughput (TEU)	6,005	6,005	6,005	6,005	5,955
T_{clear}	119,990min(83.3days)				

<Table 3> Replication Results by Scenario

Scenario	Number of Replications	T_{clear}	Standard Deviation	95% Confidence Interval
Baseline Scenario	30	83.12	1.84	[82.43,83.81]
Trailer Capacity +50%	30	61.45	1.26	[60.98,61.92]
Trailer Capacity +100%	30	42.87	0.95	[42.52,43.22]

결론적으로, 충무계획에 근거한 기본 전력(트레일러, 리치스태커)과 5개의 소산지, 간접 추정한 S_0 를 반영한 시나리오에서 주어진 소산목표일 이내 전량소산은 불가능한 것으로 계산되었다. 그러나, 트레일러 전력을 증강한 시나리오에서는 평균 소산시간이 감소한 것으로 나타났다. 반복실험 결과의 표준편차와 신뢰구간을 비교하면, 기준 시나리오와 대안 시나리오 모두에서 결과가 일정범위 내에서 안정적으로 수렴하는 경향을 보였다. 기준 시나리오에 대한 반복실험 결과는 현행 충무계획상 기본 전력과 소산지 조건만으로는 목표기간 내 전량소산이 어렵다는 기존 결론을 재확인하였고, 추가적인 민감도 분석은 전시 SPOD 소산성과가 트레일러 전력 증강이 소산 완료시간 단축에 가장 직접적인 영향을 미치는 변수 중 하나로 확인되었다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 전시 전환시 SPOD내 잔존하는 초기 야적 화물인 S_0 의 소산 여부가 항만 기능 회복과 전개 성공을 평가하였다. 부산항 A부두를 SPOD으로 가정하여 정수 계획 기반 모형을 적용한 소산계획을 시물레이션으로 검증한 결과 현행 충무계획에서 전제하는 제한된 반출·수송·수용 능력 하에서는 목표기간인 ○일(보안상 공개제한)¹⁾ 이내 전량소산은 제한되는 것으로 확인되었다. 또한, 기준 시나리오의 전량소산 완료시간이 약 83.3일로 산정된 점을 고려하면, 목표소산기간이 83.3일 미만인 모든 경우에는 현행 전력조건하에서 전량소산 달성이 불가능하다는 점을 볼 때, 현행 충무계획 전력조건이 실질적인 기간 제약하에서는 구조적으로 충분하지 않다는 사실을 보여준다고 할 수 있다.

1) 충무계획에 반영된 내용으로 보안업무규정에 의거 처리

충무계획에는 SPOD 지정 시 군 지원부두 야적화물 우선 소산, 부두 인근 학교·민간야드·주차장 등 소산지 사전 지정, 전시전환 시점 ○일 이내 SPOD 야적화물을 소산 완료 후 군 인계 등의 지침이 제시되어 있다. 그러나, 실험 결과와 같이 소산이 완료되지 않은 상태에서 군이 SPOD를 인수하게 되면, 군은 ‘군 주도의 잔존 야적화물 소산’이라는 추가 과업을 수행해야 하며, 이는 증원 전력 전개 및 항만 운영에 심각한 지연을 초래할 수 있다. 따라서, 충무계획에 소산장비(크레인·리치스태커·트레일러 등)규모, 소산지의 실제 수용능력, 소산지별 이동로·동선의 충분성을 사전에 검증·반영하는 절차가 필수적으로 포함되어야 한다. 본 연구는 부산항 A부두를 SPOD으로 가정하고, 컨테이너 야드에서 운영되는 실측 장치량·체류일 분포·게이트 처리량 등 실제 시계열 자료를 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 향후 연구에서는 BPA·터미널 운영사 자료와의 비교를 통해 S_0 및 핵심 파라미터를 보정하고, 반복실험 및 신뢰구간 제시 등 통계적 검증 절차를 강화할 필요가 있다. 또한, 시물레이션 모델의 현실성을 높이기 위한 SPOD, 소산지별 특성, SPOD ↔ 소산지 간 물리적 거리 등을 통합하여 목표기간 내 소산 달성 가능성을 보다 현실적으로 평가할 필요가 있다.

REFERENCES

- [1] Headquarters, Department of the Army, FM 3-35: Army Deployment and Redeployment, Washington, DC, 2023.
- [2] Longhorn, D. C., Muckensturm, J. R., and Baybordi, S. V., "Improving the Port Selection Process during Military Deployments," *Journal of Defense Analytics and Logistics*, Vol.5, No.2, 2021, pp.131-151.
- [3] Choi, Y.-S., Kim, W.-S., and Ha, T.-Y., "Estimation of the Required Number of Yard Tractors in Container Terminals," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol.28, No.6, 2004, pp.549-556.
- [4] Won, S.-H., and Kim, K.-H., "Yard Crane Deployment Problem Considering Storage Planning in Container Terminals," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol.33, No.1, 2009, pp.79-90.
- [5] Bae, J.-W., Choi, S.-H., Kim, C.-H., and Park, S.-O., "A Simulation Model for the ALV System in Container Terminals," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.17, No.4, 2008, pp.29-39.
- [6] Kim, P., Park, S.-J., and Jeong, S.-C., "Exploration and Analysis of Major Independent Variables Affecting Gate Congestion at Port Container Terminals," *Journal of the Korea Big Data Society*, Vol.9, No.2, 2024, pp.47-59.
- [7] Park, S.-H., and Choi, B.-C., "A Study on Port Operation Simulation Models in Multimodal Logistics Systems," *Journal of the Korea Port Economic Association*, Vol.41, No.2, 2021, pp.121-138.
- [8] Jin, H.-E., Park, S.-B., and Seo, C.-Y., "A Study on Wartime Multimodal Transportation Decision-Making Using Simulation," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.23, No.4, 2022, pp.27-35.
- [9] Sargent, R. G., "Verification and Validation of Simulation Models," *Journal of Simulation*, Vol.7, No.1, 2013, pp.12-24.
- [10] Kim, S.-W., A Strategy for Securing Sea Lines of Communication in Korea, Master's thesis, Hannam University, 2005.
- [11] Yoo, B.-T., Development of a Dispersal Planning Support System Based on Toxic Gas Leakage and Dispersion in Chemical Plants, Ph.D. dissertation, Kwangwoon University, 2016.
- [12] Kim, S.-E., A Study on Improvement Measures for Dispersal Planning Targeting Vulnerable Populations in Chemical Accidents, Master's thesis, Inha University, 2019.
- [13] Joint Chiefs of Staff, JP 4-01.8: Joint Tactics, Techniques, and Procedures for Joint Reception, Staging, Onward Movement, and Integration, 2000.6.13.
- [14] Ministry of the Interior and Safety, "Emergency Preparedness Duties Related to Chungmu Training (Chungmu Plan)," Ministry of the Interior and Safety Website.
- [15] Republic of Korea, Emergency Resources Management Act, National Law Information Center, 2012.
- [16] Ministry of National Defense, Defense Transportation Directive, National Law Information Center, 2017.
- [17] Ministry of Oceans and Fisheries, Plan for Maintaining Shipping and Port Functions in Preparation for National Emergencies, Ministry of Oceans and Fisheries, 2022.
- [18] Goldratt, E. M., Theory of Constraints, North River Press, 1990.
- [19] UNCTAD, Port Development: A Handbook for Planners in Developing Countries.
- [20] OECD, The Competitiveness of Global Port-Cities: Synthesis Report, OECD, 2013.
- [21] Silver, E. A., Pyke, D. F., and Thomas, D. J., Inventory and Production Management in Supply Chains, 4th ed., CRC Press, 2017.
- [22] Hopp, W. J., and Spearman, M. L., Factory Physics, 3rd ed., McGraw-Hill, 2011.

- [23] Nevins, M., Macal, C., et al., "A Discrete-Event Simulation Model for Seaport Operations," Simulation, Vol.70, No.4, 1998, pp.213-223.

방 현 석(Hyun Seok Bang)

[정회원]



- 1995년 3월 : 육군사관학교 기계공학과(공학사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 교통공학과(공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 항만물류시스템학과 일반대학원 박사과정수로

<관심분야>

군 물류시스템, 군 철도수송 체계, 국방물류정보체계, 드론 운용

조 규 성(Gyu Sung Cho)

[정회원]



- 1998년 2월 : 동의대학교 산업공학과(공학사)
- 2000년 2월 : 동의대학교 산업공학과(공학석사)
- 2003년 2월 : 동의대학교 산업공학과(공학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 항만물류시스템학과 부교수

<관심분야>

물류시스템, 항만물류, 사이버보안, 시뮬레이션