

빈 컨테이너 배분 최적화에 관한 연구

이동제¹, 박제린², 김지은³, 이연재⁴, 홍태금⁵¹ 숭실대학교 물리학과 학부생² 숭실대학교 산업정보시스템공학과 학부생^{3,4} 성결대학교 글로벌물류학부 학부생⁵ 부경대학교 해양수산경영학과 학부생Dongje.musk.lee@gmail.com, umat4714@naver.com, katie020709@gmail.com,
yeonjae1902@naver.com, taegeum0916@gmail.comA Study on the Optimization of Empty Container
DistributionDong-Je Lee¹, Je-Rin Park², Ji-Eun Kim³, Yeon-Jae Lee⁴, Tae-Geum Hong⁵¹Dept. of Physics, Soongsil University²Dept. of Industrial Information System Engineering, Soongsil University^{3,4}Dept. of the Global Logistics, Sungkyul University⁵Dept. of Marine Fisheries Management, Pukyong National University

요 약

해운 물류 산업에서 빈 컨테이너 불균형은 비용 증가와 운영 비효율을 초래하는 주요 과제이다. 본 연구는 이를 해결하기 위해 혼합 정수 계획법(MIP) 기반의 배분 최적화 모델을 설계하고, 유전 알고리즘과 PPO(Proximal Policy Optimization)를 적용하여 성능을 고도화하였다. 이를 통해 해운사의 효율적 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

해운 물류 산업은 글로벌 무역의 핵심이지만, 항구별 빈 컨테이너 불균형으로 인한 비용 증가와 운영 비효율 문제가 지속되고 있다[1].

본 연구는 이를 해결하기 위해 혼합 정수 계획법(MIP)을 기반으로 문제를 정의하고, 유전 알고리즘과 PPO(Proximal Policy Optimization)를 적용해 성능을 비교·분석하였다. 이를 통해 최적의 배분 전략을 도출하여 해운사의 효율적 의사결정을 지원하고자 한다.

2. 빈 컨테이너 배분 최적화 문제 정의

빈 컨테이너 배분 최적화를 위해 운송비와 유류할증료, ETA 지연에 따른 패널티 비용을 최소화하는 MIP 모델을 다음과 같이 구축하였다. 데이터는 COSCO 사의 스케줄 데이터를 사용하였다.

[Sets]

- $p \in P$: 항구 집합
- $r \in R$: 항로 집합
- $v \in V$: 선박 집합
- $i \in I$: 스케줄 번호
- $t \in T$: 시간(일자) 집합

[Parameters]

- O_i : 스케줄 i 의 출발항
- D_i : 스케줄 i 의 도착항
- V_r : 항로 r 에 배정된 선박
- ETD_i : 예정 스케줄 i 의 출발 시각
- ETA_i : 예정 스케줄 i 의 도착 시각
- $RETA_i$: 실제 스케줄 i 의 도착 시각
- Q_r : 항로 r 에 대응되는 주문량(kg)
- $KG_PER_TEU = 30000$ (kg)
- $DEMAND_i$: 스케줄 i 의 수요(주문량) = $\lceil \frac{Q_r}{KG_PER_TEU} \rceil$ (TEU)
- CAP_v : 선박 v 의 적재 용량 (TEU)
- CAP_{v_r} : 항로 r 의 TEU 수용 능력 (TEU)
- $CSHIP = 1000$ (USD): 운송비
- $CBAF = 100$ (USD): 유류할증료
- $CETA = 150$ (USD): ETA 패널티
- $DELAY_i = \max(0, ETA_i - RETA_i)$: 스케줄 i 의 지

연일수

- I_p^0 : 항구 p 의 초기 컨테이너 수 (TEU)

[Decision Variables]

- x_i^E : 스케줄 i 의 empty 컨테이너 수 (TEU)

- y_{tp} : 시간(일자) t 의 항구 p 의 최종 empty 컨테이너 수 (TEU)

- z_i : 스케줄 i 운항 여부

- u_{iv} : 스케줄 i 에 선박 v 배정 여부

[MIP Model]

$$\text{minimize } \sum_i (C_{SHIP} + C_{BAF})(DEMAND_i + x_i^E)u_{iv} + \sum_i C_{ETA} \cdot DELAY_i DEMAND_i z_i$$

subject to

1) 스케줄 운항 시 선박을 정확히 1척 배정

$$\sum_{v \in V} u_{iv} = z_i, \forall i \in I$$

2) 컨테이너 흐름: 항만별 초기 재고, 입출항 스케줄, 적재·하역 과정을 반영하여 컨테이너 수지(balance)가 유지되도록 한다.

$$y_{tp} = y_{(t-1)p} + \sum_{i: D_i=p, RETA_i=t} (x_i^E + DEMAND_i) \cdot z_i$$

$$z_i - \sum_{i: O_i=p, ETD_i=t} (x_i^E + DEMAND_i) \cdot z_i = 0, \forall i \in I, t \in T, p \in P$$

3) 용량 제약: 각 스케줄의 총 적재량(Full + Empty)

이 선박의 TEU 적재 능력을 초과하지 않도록 제한한다.

$$DEMAND_i \cdot u_{iv} + x_i^E \leq CAP_{v_r} \cdot u_{iv}, \forall i \in I, r \in R, v \in V$$

4) 경계(bounds) 조건

$$x_i^E, y_{tp} \geq 0, \forall i \in I, t \in T, p \in P \quad z_i \in \{0,1\}, u_{iv} \in \{0,1\} \forall i, v$$

이를 통해 운송비와 유류할증료, ETA 지연에 따른 페널티 비용을 최소화하는 배분 전략을 제시한다.

하지만 MIP로 접근할 경우 연산 시간이 과도하게 소요된다는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 추가적으로 메타 휴리스틱과 강화학습으로 접근하였다.

3. 유전 알고리즘 구성요소

염색체 표현으로는 215 개의 x_F (풀 컨테이너 할당), 215 개의 x_E (빈 컨테이너 할당), 1,935 개의 y (빈 컨테이너 레벨) 변수로 구성된 실수 벡터를 사용한다. 적합도 함수는 총 운송 비용을 최소화하는 목적 함수로, 항만 운영 비용, 선박 운항 비용, 재배치 비용을 포함한다. 선택 연산자로는 토너먼트 선택 방식을 적용하여 우수한 해의 선택 확률을 높인다. 마지막으로 제약 처리는 페널티 함수를 통해 항만 용량, 선박 용량 제약을 처리한다.

4. PPO 알고리즘 구성요소

상태 공간은 2,395 차원 벡터로 컨테이너 할당 상태, 비용 지표, 제약 위반 정도를 표현한다. 행동 공간은 2,365 차원 연속 벡터로 x_F , x_E , y 변수의 할당량을 직접 결정한다. 보상 함수는 음의 비용 함수로, 낮은 비용일수록 높은 보상을 부여한다.

5. 알고리즘 결과

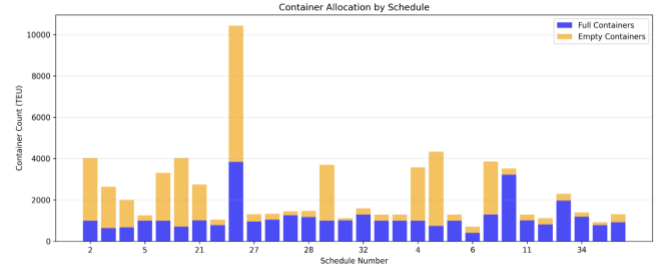


Figure 1 유전 알고리즘을 사용한 컨테이너 배분결과

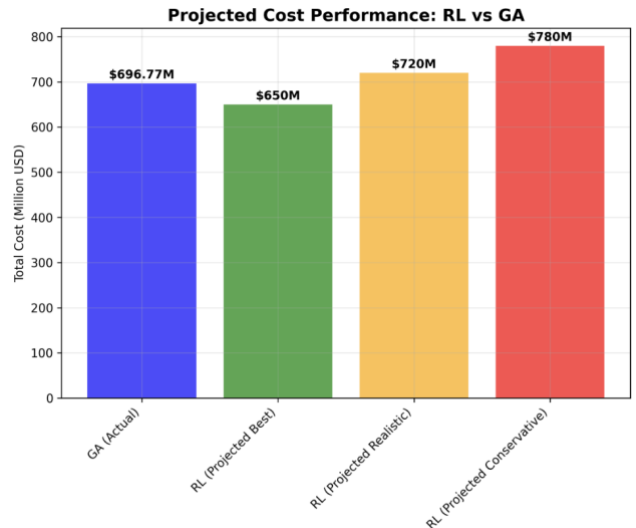


Figure 2 PPO와 유전알고리즘의 최종 비용 비교

6. 결론

유전 알고리즘은 검증된 성능으로 \$696,769,167의 최적 비용을 달성하였으며, PPO에서 가장 자유도를 높게 탐색한 접근법이 최소 비용으로 나왔다

참고문헌

[1] Meng, Q., & Wang, S. (2011). Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(5), 695-708.

※ 본 논문은 해양수산부 스마트 해운물류 융합인재 및 기업지원(스마트해운물류 x ICT 멘토링)을 통해 수행한 ICT 멘토링 프로젝트 결과물입니다