

작업 부하 기반 동적 충전 최적화 전략을 통한 AGV 운영 효율 개선

김탁형¹, 서준혁², 김도희³, 이호인³, 배혜림^{1*}

¹부산대학교 데이터사이언스전문대학원 데이터사이언스학과

²부산대학교 산업공학과 산업데이터융합전공

³부산대학교 SCSC연구센터(ERC)

glorytak74@pusan.ac.kr , hrbae@pusan.ac.kr

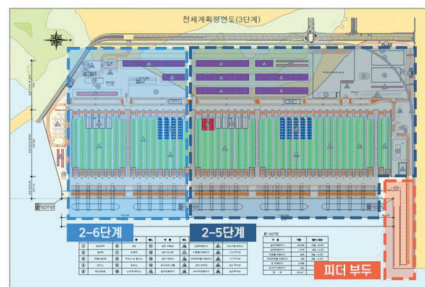
Contents

1. Introduction
 2. Related works
 3. Proposed methods
 4. Experiments
 5. Conclusion
-

1. Introduction

• 연구 배경

- 본 연구는 창원 진해소재 A터미널의 실제 운영 데이터를 활용하여 무인운반장비(Automated Guided Vehicle; AGV)의 정적 배터리 임계값을 동적 충전 전략으로 전환하고 최적화하는 방안을 탐색함
- A 터미널 특징:
 - 초대형 선박 접안이 가능한 5개선석과 전용 피더부두를 포함하여 총 6개의 선석을 보유한 국내 최대 규모 자동화 컨테이너 터미널
 - STS, ARMGC, AGV와 같은 최첨단 장비 도입으로 터미널 전 구간을 무인 자동화
 - Lifting Height 53m, Outreach 72.5m의 국내 최대 STS는 최대 수심 21m 깊이와 안벽에서 25,000 TEU급 초대형 선박도 신속하고 안정적인 작업 가능
 - 전동 STS와 ARMGC, 전기 배터리 충전식 AGV 및 YT를 도입하여 야드 내 전 장비 전기화



<전체계획평면도>

1. Introduction

• 연구 배경

- AGV(Automated Guided Vehicle): 항만 내에서 컨테이너를 크레인(STS), 야드 등으로 이송하는 역할을 수행하는 무인 운반 차량
 - 국내 최초 야드 내 이송장비 자동화
 - STS 크레인 1기 당 5대의 AGV 투입으로 효율적인 컨테이너 이송 작업 가능
 - 선진화된 FMS(Fleet Management System) 도입으로 완전 자동화 스마트 항만 구축
 - 야드 내 무인화를 통한 인명사고 위험성 제거
 - 배터리 Type으로, 일정 이하 전력 소모 시 자동충전 시스템
 - 전진, 후진, S자 이동으로 유연한 이송 작업 가능



1. Introduction

- 연구의 필요성

- 운영 현황



AGV 60대 운영



완충 시 30분 소요



충전소 6개



1회 충전으로 8시간 운행

- 현재 배터리 충전 프로세스

- 일반 프로세스

- 배터리 잔량 55% 기준으로 충전 개시

- 충전소가 모두 비어 있을 때 프로세스

- 배터리 잔량 기준을 65%로 상향



1. Introduction

- 연구의 필요성

- 작업 부하를 고려하지 않는 충전

- 현재 시스템은 충전 주기 시작 시 STS 크레인 작업이나 컨테이너 처리 수요를 고려하지 않음

- 피크 시간 병목 현상

- 충전은 수요가 많은 기간에 발생하여 컨테이너 작업에 가장 필요한 AGV 가용성을 감소시킴

- 최적화되지 않은 자원 활용

- 충전 스테이션은 비수기에는 활용도가 낮고, 바쁜 시간에는 혼잡을 야기함



따라서, 정적인 충전 전략보다 외부 변수들에 대응하여 최적화된 충전 전략을 세워
AGV의 운영 효율성을 확보해야할 필요성이 있음

1) Manual-FDTC 수동 동적 충전 전략

2) GWO-FDTC 최적화 동적 충전 전략

2. Related works

- 선행 연구

- 최근 AGV 관련 연구는 동적 충전 최적화를 비롯해 AI 기반 경로 계획, 충전 스케줄링, 협업 운행정 등 효율성 증대에 집중되고 있음 (Li, Y et al. ,2025)
- 해운항만 분야에서는 AGV를 활용한 자동화와 에너지 관리가 활발하지만 실시간 배터리 관리의 한계와 복잡한 운용 환경에서의 최적화 미흡이 주요 과제로 남아있음 (Hu, Y et al. ,2025)
- 이에 본 연구는 A터미널의 AGV 운용 데이터를 연계하여 작업 부하를 고려한 동적 임계값을 제안하고, 메타휴리스틱(GWO)를 활용하여 최적 임계값을 탐색 및 시뮬레이션으로 검증함(Mirjalili et al. ,2014)

저자(연도)	방법론	데이터	목적	도메인
Nitish Singh et al. (2022)	MILP	가상 데이터	AGV 효율성 검증	제조/생산
Yantong Li et al. (2023)	MILP	가상 데이터	생산 공정 작업 시간 최소화	제조/생산
Cun Cheng Lin et al. (2023)	Reinforcement LR	가상 데이터	AGV 충전 비용 최소화	제조/생산
Rui Zhao et al. (2025)	Reinforcement LR	실제 데이터	AGV 배터리 수명 손실 최소화	항만
Zheng Xing et al. (2025)	MIP	가상 데이터	항만 작업 makespan 최소화	항만
해당 연구	Meta-heuristic	실제 데이터	AGV 가용성 최대화 및 대기열 최소화	항만

3. Proposed methods

- 사용 데이터

- AGV : 한 달(25.07.27. ~ 08.26.) 기간 동안에 AGV가 충전한 충전소와 TimeStamp
- STS : 한 달(25.07.27~08.27) 기간 동안에 STS 크레인의 시간대별 동시 가동 대수와 작업량

AGV 데이터 예시

일시	호기	CH01	CH02	CH03	...
13:40	301	1	0	0	...
15:38	301	0	0	1	...
31:41	301	0	0	0	...
38:09	301	0	1	0	...
14:57	301	0	0	0	...
17:50	301	0	1	0	...
58:14	301	1	0	0	...
...	...	...	...	...	...

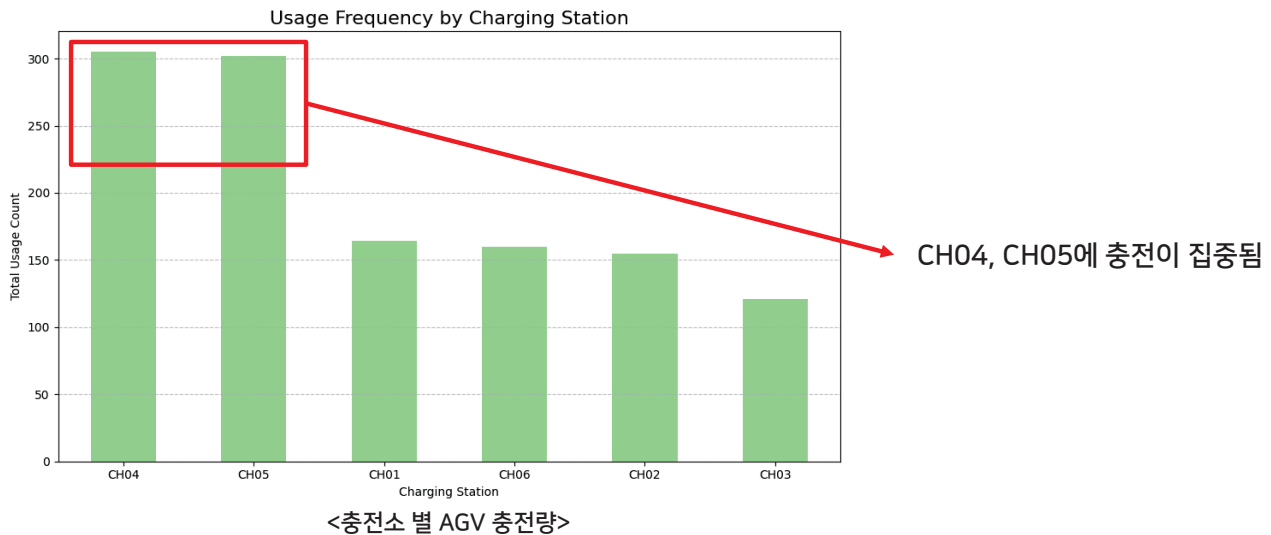
STS 데이터 예시

일시	1	2	3	4	...
07/27 0:00	0	0	40	0	...
07/27 1:00	0	0	18	0	...
07/27 2:00	0	0	11	12	...
07/27 3:00	30	0	0	14	...
07/27 4:00	10	17	36	0	...
...	...	...	...	...	...

3. Proposed methods

- 데이터 EDA

- 충전소 별 AGV 충전량
- 요일별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량
- 시간대별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량

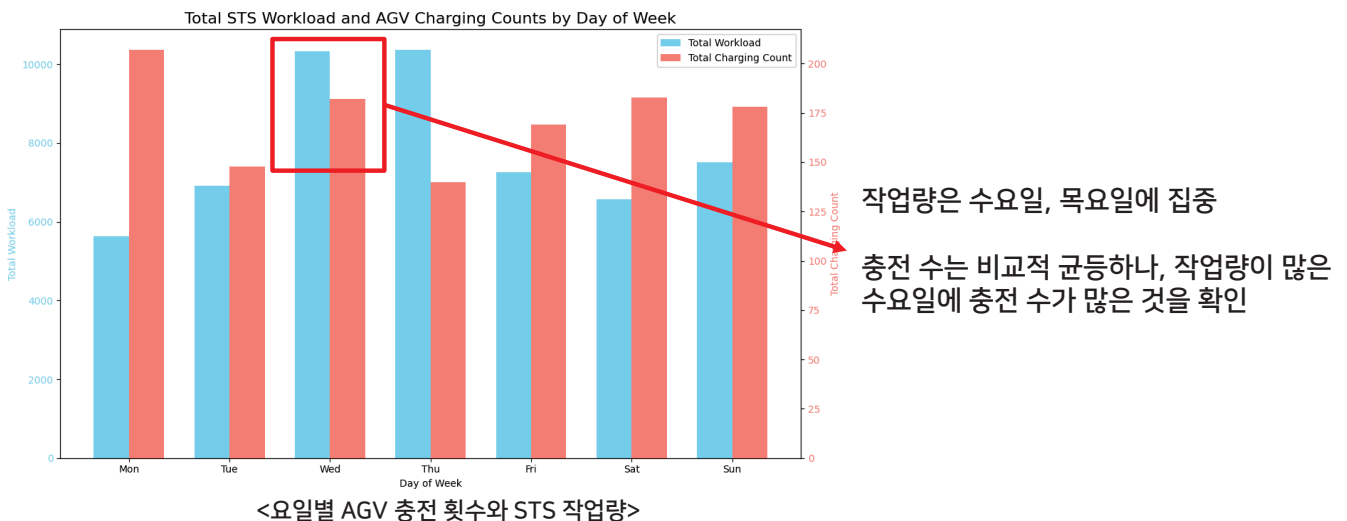


7

3. Proposed methods

- 데이터 EDA

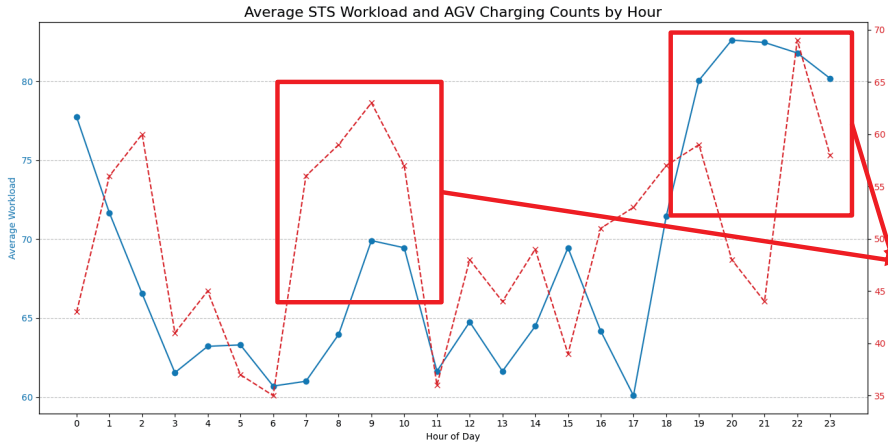
- 충전소 별 AGV 충전량
- 요일별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량
- 시간대별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량



8

3. Proposed methods

- 데이터 EDA
 - 충전소 별 AGV 충전량
 - 요일별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량
 - 시간대별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량



<시간대별 AGV 충전 횟수와 STS 작업량>

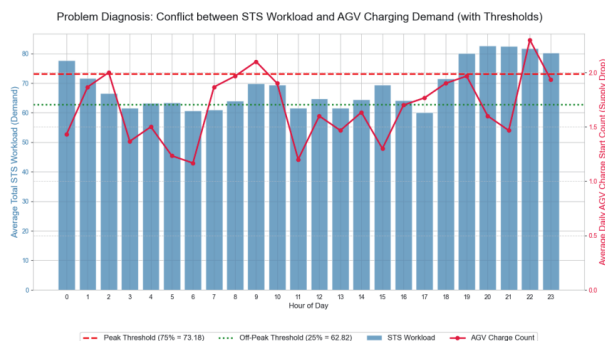
작업량이 많은 시간에 충전의 횟수가 비례해서 증가하는 상황이 다수 존재함

9

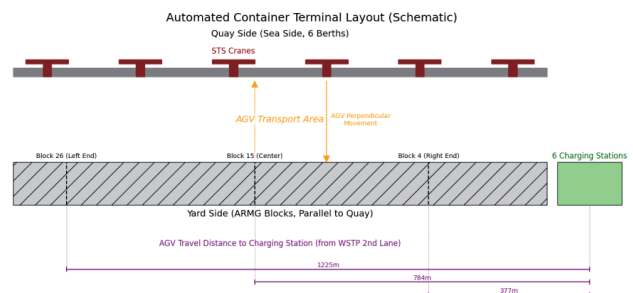
3. Proposed methods

- 작업 부하 기반 동적 충전(FDTC) 전략
 - 터미널의 실시간 작업 부하에 따라 충전 임계값을 T_{peak} (25%) 또는 $T_{offpeak}$ (80%)로 유연하게 변경
 W_{peak} : Q3 ≈ 73.18 (피크 작업량 임계값, STS 작업량 4분위수 기준 3분위수)
 $W_{offpeak}$: Q1 ≈ 62.82 (오프피크 작업량 임계값, STS 작업량 4분위수 기준 1분위수)
 - Peak: AGV의 가용성을 유지하기 위해 낮은 임계값을 적용하여 충전을 억제(운영 방어)
 - Off-peak: 상대적으로 높은 임계값을 적용하여 AGV가 적극적으로 충전하도록 유도(선제적 충전)

터미널 작업량 → Peak/Off-peak 분류 → 충전 임계값 T 결정 → AGV SOC 확인 → 충전 여부 결정



<STS Workload/AGV Charge Count Comparison>



<AGV Yard Layout>

3. Proposed methods

• 이산 사건 시뮬레이션 (DES) 모델 구축

- Simpy 라이브러리를 활용하여 실제 AGV 및 충전소 운영 환경을 모사
- AGV는 '작업 중', '충전 대기', '충전 중', '유휴' 상태를 반복하며, 각 이벤트 발생 시 DES 모델이 해당 사건을 처리

- DES 모델 기본 파라미터

T : 전체 시간 구간의 집합 ($t \in \{0, 1, \dots, T_{max}\}$)
 N_{AGV} : 60 (운영되는 전체 AGV 대수)

$N_{charger}$: 6 (충전소 개수)

T_{charge} : 30 (완충 시간)

T_{op} : 480 (1회 충전 후 운영 시간)

T_{job} : 3.15 (컨테이너 작업 시간)

T_{sim} : 43,200 (시뮬레이션 총 시간,
30일 = 30 * 24 * 60)

E_{base} : 기본 에너지 소모율 (작업량에 따라 동적 조정)

시간 단위: 분

- 작업 시간/충전 시간 정의(Stochastic)

T_{job} : 평균 3.15분을 따르는 정규분포 사용(현장 반영)

T_{charge} : 현재 배터리 잔량에 비례하여 결정

- 에너지 소모 모델(작업 부하와 거리에 따라 소모율 조정)

$$E_{rate} = f(E_{base}, W_{current}, D)$$

기본 소모량: 0.15%/min 고정값 (대기중)

작업 부하 소모량: 현재 작업량/최대 작업량*0.5
작업량에 비례하여 소모량 증가

거리 소모량: AGV의 홈 블록(4,15,26)과 충전소 간 거리에 따라 차등 적용/ 멀수록 소모량 증가

11

3. Proposed methods

• Grey Wolf Optimizer(Mirjalili et al. ,2014)

- Grey wolf의 사회적 계층 구조와 사냥 행동을 모방한 메타휴리스틱 최적화 알고리즘
- 최적 후보 솔루션(wolf)를 리더(최상위 솔루션)와 팔로워를 분류하여 위치 업데이트 메커니즘
- 탐색(exploration)과 착취(exploitation)간 균형으로 Search Space 효율적 탐색

파라미터 벡터 정의

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)|$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}, \quad \vec{C} = 2\vec{r}_2$$

변수 및 제어 계수 설명

$\vec{X}(t)$: 현재 늑대의 위치 (candidate solution)

$\vec{X}_p(t)$: 목표(리더, Alpha/Beta/Delta)의 위치

$\vec{A}, \vec{C}$: 탐색/착취를 조절하는 계수 벡터

$\vec{a}$: 2 → 0으로 선형 감소하며,

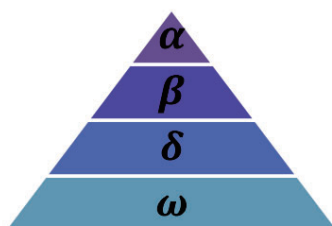
탐색(Exploration)에서

착취(Exploitation)로 전환

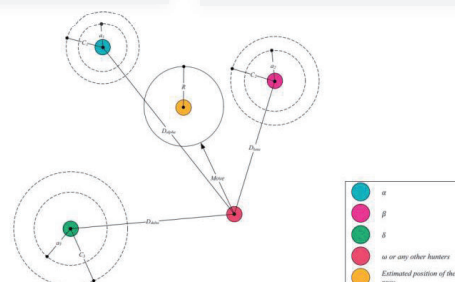
$\vec{r}_1, \vec{r}_2$: [0,1] 균등분포 난수

최종 위치 업데이트

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}$$



<Hierarchy of grey wolf>



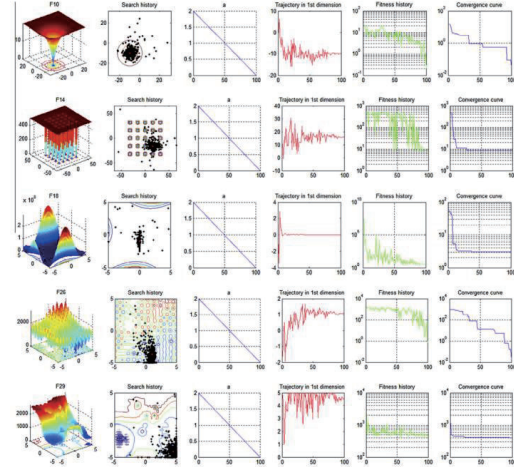
<Position updating in GWO>

3. Proposed methods

- Grey Wolf Optimizer(Mirjalili et al. ,2014)
 - GWO의 강점(매개변수 적음, local optimum 회피)은 해당 연구의 실시간 작업 부하 변동성을 다루는데 적합하며, DES와의 통합으로 실제 터미널 데이터 기반 검증 가능
 - 다른 메타휴리스틱(PSO,SA,GA 등)과 비교 시 GWO는 다중 후보 해 병렬 탐색, 단순 구조와 빠른 수렴속도 등에서 우위에 있음(Li, Y et al. , 2025)



<Hunting behavior of grey wolves>



<Search history and trajectory>

13

3. Proposed methods

- Grey Wolf Optimizer(Mirjalili et al. ,2014)
 - FDTC 전략의 두 핵심 변수인 T_{peak} 와 $T_{offpeak}$ (=충전 임계값)의 최적 조합을 탐색(Decision Variables)
 - AGV의 피크시간 가용성을 극대화하고 충전소 대기열을 최소화(Objective Function)

$$\min F = -w_1 A_{peak} + w_2 Q_{avg}$$

- A_{peak} : 피크 시간 AGV 가용 대수 maximize

$$A_{peak} = \frac{\sum_{t \in T_{peak}} n_{avail,t}}{|T_{peak}| \cdot N_{agv}} \times 100$$

- Q_{avg} : 평균 충전 대기 대수 minimize

$$Q_{avg} = \frac{\sum_{t \in T} q_t}{|T|}$$

T_{peak} : 피크 시간대의 집합
 $n_{avail,t}$: 시점 t에서의 가용 AGV 대수
 N_{agv} : AGV 대수
 $|T|$: 전체 시뮬레이션 기간의 집합
 q_t : 시점 t에서의 충전소 대기열 길이
 $(w_1, w_2 > 0, \text{하이퍼 파라미터 튜닝 필요})$

14

4. Experiments

• 실험 설계

Case1 Static	Case2 Manual-FDTC	Case3 GWO-FDTC
정적 충전 전략 55%	수동 동적 충전 전략 25%/80%	GWO 최적화 동적 충전 전략 36.8%/80%
기존 ACT에서 사용하는 고정된 배터리 충전 임계값 방식	운영 데이터 기반 수동 설정 동적 임계값 조합 사용 전략	GWO 알고리즘을 통해 최적화된 파라미터를 적용하는 제안 전략

*GWO 알고리즘은 8마리 wolf, 15회 반복으로 수행됨
각 후보 임계값 조합은 7일간의 단축 시뮬레이션으로 결정됨

15

4. Experiments

• 실험 결과

Strategy	Peak-time AGV Availability (%)	Avg. Available AGV Count (units)	Avg. Charger Queue Length (units)	Total Charge Events (count)	Improvement vs Static (%)
Static (55%)	46.63	27.98	24.16	17861	—
Manual FDTC (25% / 80%)	55.44	33.26	24.26	18402	+18.88 %
GWO-FDTC (36.8% / 80.0%)	56.08	33.65	23.38	19358	+20.27 %

- 제안된 Manual FDTC 전략의 피크 시간대 AGV 가용성이 기존 Static 전략 대비 약 18.88% 향상된 성능을 보임
- 특히 GWO-FDTC 전략이 Static 전략보다 약 20.27% 추가 개선되어 최적화의 유효성이 검증됨
- 또한, 충전 횟수가 약 8.38 % 증가했음에도, 평균 충전소 대기열은 오히려 3.23% 감소함
-> 충전 수요가 피크 시간에서 오프 피크 시간으로 효과적으로 분산됨

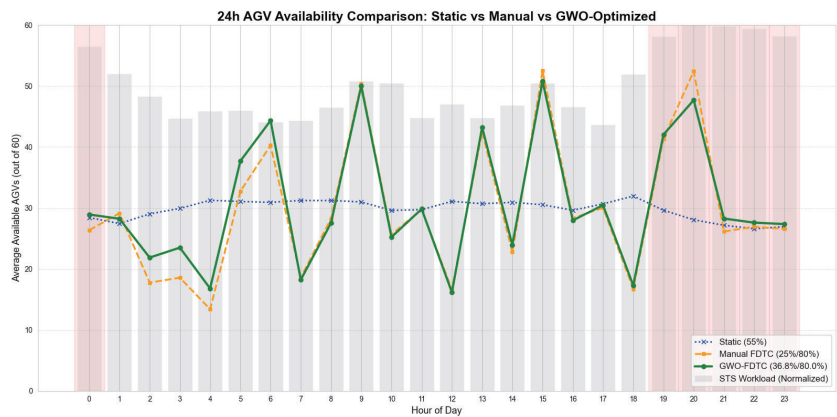
제안한 GWO-FDTC 전략은 AGV의 피크 시간 가용성을 극대화하고 충전 혼잡도를 완화하며,
터미널 운영 안정성을 향상시킴

16

4. Experiments

- 실험 결과

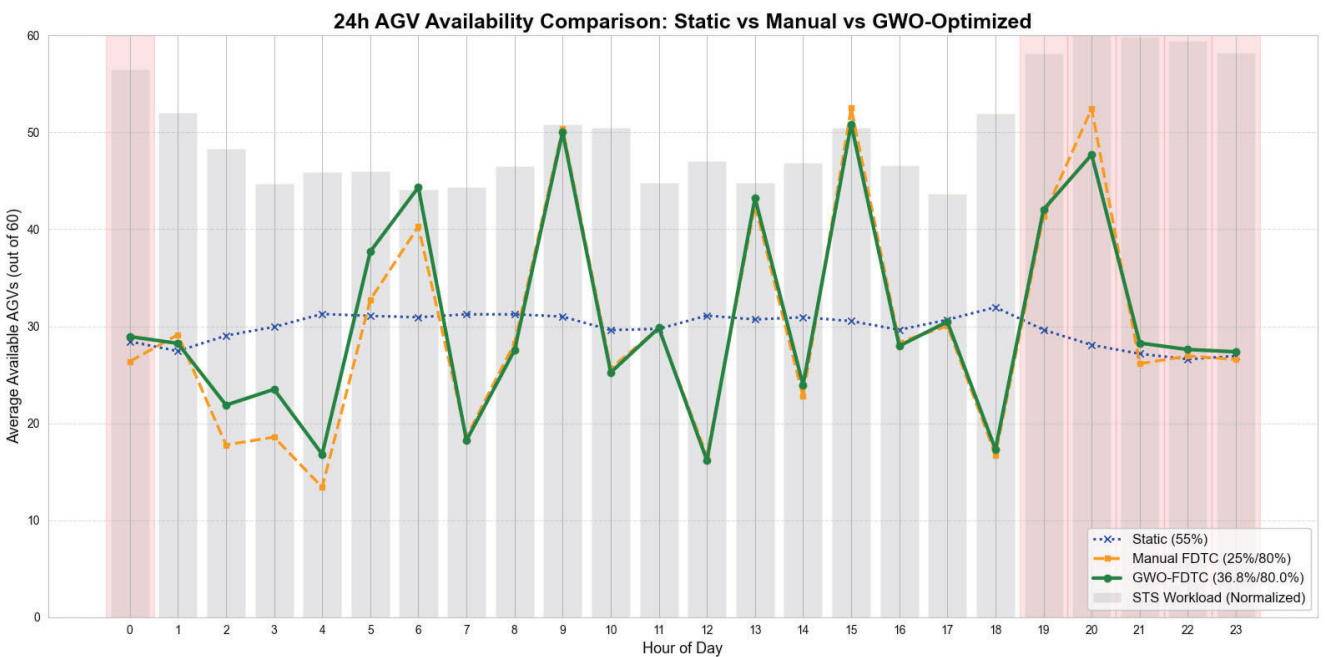
Strategy	Peak-time AGV Availability (%)	Avg. Available AGV Count (units)	Avg. Charger Queue Length (units)	Total Charge Events (count)	Improvement vs Static (%)
Static (55%)	46.63	27.98	24.16	17861	—
Manual FDTC (25% / 80%)	55.44	33.26	24.26	18402	+18.88 %
GWO-FDTC (36.8% / 80.0%)	56.08	33.65	23.38	19358	+20.27 %



17

4. Experiments

- 실험 결과



18

5. Conclusion

- Conclusion

- 본 연구는 자동화 컨테이너 터미널의 AGV 운영 효율을 높이기 위해 작업 부하 기반 동적 충전 임계값(FDTC) 전략을 제안하고, Grey Wolf Optimizer(GWO)를 이용해 최적 충전 임계값을 도출함
- Simpy 시뮬레이션 결과, Manual-FDTC 전략은 AGV 가용성을 Static 대비 18.88% 향상시켰음
- GWO-FDTC 전략은 피크 시간대 AGV 가용성을 Static 대비 20.27% 향상시켰고, 평균 충전 대기열을 3.23% 감소시켰으며, 충전 부하를 오프피크 시간대로 성공적으로 분산시킴
- 1차적으로 터미널 운영사에서 Manual-FDTC 전략을 통해 먼저 현상황을 개선하고, 여러 데이터를 확보 후 향후 GWO-FDTC 전략과 같은 최적화를 거쳐 운영을 해야 함
- 따라서, 본 연구는 운영 전략의 알고리즘 개선으로 항만 생산성과 자원 효율성을 동시에 높일 수 있는 실증적 근거를 제시함

- Future Work

- 실제 운영 환경 반영 필요(충전소가 비어있을 시 임계값 65%로 상승)
- AGV 위치데이터에 대한 고려
- 배터리 열화 혹은 비용 측면에서의 정의
- 장비 수명, 작업 지연 등 다양한 목표를 고려한 다목적 메타휴리스틱 확장 연구로 발전 가능
- 실시간 변동 터미널 상태(대기열, 고장) 등에 따라 임계값을 조정하는 강화학습 기반 제어로 확장

Reference

- [1] Li, Y et al. ,2025. Smart Automated Guided Vehicle scheduling with flexible charging operations and charging setup time. Transportation Research Part B: Methodological.
- [2] Hu, Y et al. ,2025. Coordinated scheduling optimization of quay cranes and AGVs.” Transportation Research Part B: Methodological.
- [3] Xurui Y. et al. ,2025. AGV scheduling in automated container terminals considering multi-load strategy and charging requirements
- [4] Nitish Singh et al. ,2022. A matheuristic for AGV scheduling with battery constraints.
- [5] Yantong Li et al. ,2023. AGV Scheduling Problem with Flexible Charging Operations and Limited Number of Charging Stations.
- [6] Rui Zhao et al. ,2025. Optimizing AGV utilization and battery life in automated container terminals: focus on a novel charging strategy and reinforcement learning algorithm.
- [7] Zheng Xing et al. ,2025. AGV charging scheduling with capacitated charging stations at automated ports
- [8] Chun Cheng Lin et al. ,2023. Real-Time Charging Scheduling of Automated Guided Vehicles in Cyber-Physical Smart Factories Using Feature-Based Reinforcement Learning
- [9] Mirjalili et al. ,2014. Grey Wolf optimizer
- [10] Li, Y et al. , 2025. Optimal multi-objective design of a Photovoltaic/Battery/Wind hybrid system by implementing an innovative meta-heuristic algorithm. Applied Energy

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No.RS-2023-00218913) and supported by the Regional Innovation System & Education(Rise) program through the Institute for Regional Innovation System & Education in Busan Metropolitan City, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Busan Metropolitan City, Republic of Korea(2025-Rise-02-004)