

조선소 블록 조립 스케줄링을 위한 자연 모사 알고리즘 비교 연구

박세호, 김기현, 나영진, 이동녕*, 장종환*, 임민중
동국대학교, *한화오션

323psh@naver.com, rlsrlgus123@naver.com, dudwls976@naver.com, *dnlee26@hanwha.com,
*jhjang36@hanwha.com, minjoong@dongguk.edu

A Comparative Study of Nature-Inspired Algorithms for Shipyard Block Assembly Scheduling

Seho Park, Ki-Hyun Kim, Young-Jin Na, Dong-Nyeong Lee*, Jong-Hwan Jang*, Minjoong Rim
Dongguk Univ., *Hanwha Ocean

요 약

본 논문은 조선소 블록 조립 공정의 최적화를 위해 대표적인 자연 모사 알고리즘인 고래 최적화(WOA), 회색늑대 최적화(GWO), 개미 군집 최적화(ACO)의 성능을 비교 분석한다. 20, 30, 40 개 블록 규모의 벤치마크 문제에 대해 각 알고리즘을 30 회 독립 실행하여 해의 품질, 수렴 속도, 안정성을 정량적으로 평가하였다. 실험 결과 각 알고리즘은 서로 다른 강점을 보였으며, GWO는 평균 품질, ACO는 안정성, WOA는 계산 속도 측면에서 우수한 성능을 나타냈다. 본 연구는 조선소 공정 최적화를 위한 상황별 알고리즘 선택 방법 및 하이브리드 접근법을 제안한다.

I. 서 론

조선소 블록 조립 스케줄링은 거대한 선박을 구성하는 수백 개의 대형 구조물(블록)을 한정된 작업장(스테이션)과 자원을 이용해 어떤 순서로 조립할지 결정하는 최적화 문제이다. 이는 단순히 순서를 정하는 것을 넘어, 블록 간의 엄격한 선행 조립 순서, 자원 제약 그리고 공간 제약 등 다양한 조건을 동시에 만족시켜야 하는 고유의 특징을 가진다. 따라서, 효율적 스케줄링은 선박 건조 기간 단축 및 Dock 가동률 향상을 가능케 하여 조선소의 핵심 경쟁력을 좌우하는 필수적인 과제이다. 기존 연구들에서는 GA 나 SA 와 같은 전통적인 메타휴리스틱 알고리즘이 활용되었으나, 최신 자연 모사 알고리즘의 조선소 블록 스케줄링에서 성능 비교 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 스케줄링 분야에서 성능이 입증된 서로 다른 탐색 철학을 가진 자연 모사 알고리즘들을 통해 새로운 가능성을 탐색하고자 한다. 강력한 지역 탐색에 특화된 고래 최적화 알고리즘(WOA)[1], 탐색과 수렴의 균형을 추구하는 회색늑대 최적화(GWO)[2], 순열 문제에 최적화된 구성적 탐색 방식의 개미 군집 최적화(ACO)[3]를 선정하여 각각의 강점과 조선소 문제에 대한 적합성을 탐색한다. 본 연구는 특정 알고리즘의 절대적 우월성을 증명하기보다, 탐색 철학이 다른 알고리즘들이 조선소 스케줄링 문제의 어떤 측면에서 강점과 약점을 보이는지 비교 분석하는 데 초점을 맞춘다. 이를 통해 실무 적용 시 상황에 맞는 최적 알고리즘 선택 기준을 제시하고, 향후 각 알고리즘의 장점을 결합한 하이브리드 접근법의 방향성을 제안하고자 한다.

II. 본론

2.1 알고리즘 특징 분석

고래 최적화 알고리즘(WOA)은 혹등고래의 나선형 버블넷 사냥 행동을 모사한다. 최적해 주변을 나선형으로 포위하며 접근하는 방식으로 강력한 지역 탐색 능력을 가진다. 장점은 가장 빠른 초기 수렴과 간단한 구현이며, 단점은 지역 최적 함정에 빠지기 쉬워 최종 해 품질이 열세이고 표준편차가 높아 안정성이 낮다는 점이다.

회색늑대 최적화(GWO)는 늑대 무리의 계층적 사냥 전략을 모델링한다. 상위 3 개 해(α , β , δ)를 동시에 참조하여 이들의 평균 방향으로 이동함으로써 탐색과 수렴의 균형을 유지한다. 장점은 3 개 리더 참조로 WOA 보다 안정적이며 지역 최적 탈출이 우수하고, 파라미터 튜닝 부담이 적다는 점이다. 단점은 제약이 강한 문제에서 효율이 저하될 수 있다는 점이다.

개미 군집 최적화(ACO)는 개미의 페로몬 기반 경로 탐색을 모방한다. 좋은 해에는 페로몬을 증가시키고 시간이 지나면 증발시키는 방식으로 점진적 학습을 수행한다. 장점은 순열 문제에 최적화된 해 구축 방식으로 직접적 접근이 가능하며, 표준편차가 낮아 안정적이고, 지속적인 개선 (0~150 세대)을 보인다는 점이다. 단점에는 상대적으로 느린 수렴과 4 개 파라미터 (α , β , ρ , Q) 튜닝 필요성 등이 있다.

2.2 실험 설계

문제 정의: 작업 환경은 5 개 작업 스테이션, 작업 당 1 ~ 20 일의 무작위 작업 시간, 30% 밀도의 선행 제약으로 설정하였다. 실험은 20, 30, 40 개 블록의 3 가지 규모로 진행하였으며, 각 규모당 30 개의 독립적인 문제 인스턴스를 무작위로 생성하여 알고리즘의 Makespan 최소화 성능을 평가하였다.

파라미터 설정: 공정한 비교를 위해 Population 을 50, 세대 반복은 200 세대로 통일하였다. 이는 예비 실험을 통해 모든 알고리즘이 충분히 수렴하는 것을 확인한 값이다. WOA 와 GWO 는 각 원논문[1][2]에서 권장하는 $a: 2 \rightarrow 0$ 선형 감소를 사용하였으며, ACO 는 $\alpha = 1.0$, $\beta = 2.0$, $\rho = 0.1$, $Q = 100$ 으로 설정하였다. ACO 파라미터는 Dorigo 의 원논문[3] 및 유사 스케줄링 문제 선행연구에서 검증된 값을 채택하였다. 각 문제당 30 회 독립 실행하여 통계적 신뢰도를 확보하였다.

평가 지표: Best/Average Makespan, 표준편차, 수렴 속도, 계산 시간을 측정하였다.

2.3 실험 결과

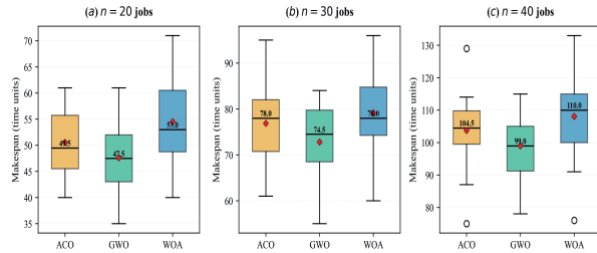


그림 1. 알고리즘 간 성능 비교

각 알고리즘의 결과를 비교하였을 때, GWO 는 평균 Makespan 측면에서 가장 우수한 성능을 나타냈다. ACO 는 표준편차가 상대적으로 낮아 안정성이 우수함을 확인하였다.

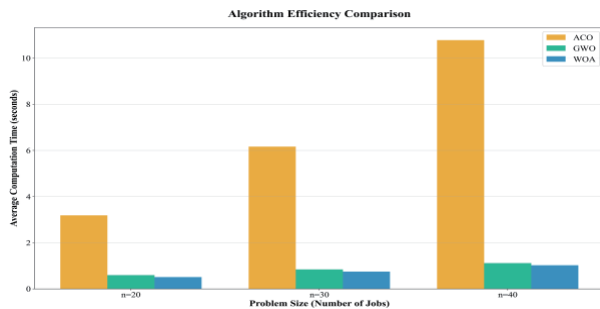


그림 2. 알고리즘 간 실행 시간 비교

알고리즘 실행시간 면에서 WOA 가 0.34-0.70 초로 가장 빠르며, GWO 는 0.43-0.83 초로 약 26-44% 더 소요되었다. ACO 는 3.03-10.25 초로 페로몬 매트릭스 업데이트와 확률적 경로 선택 과정의 계산 복잡도로 인해 시간이 다소 소요되었다.

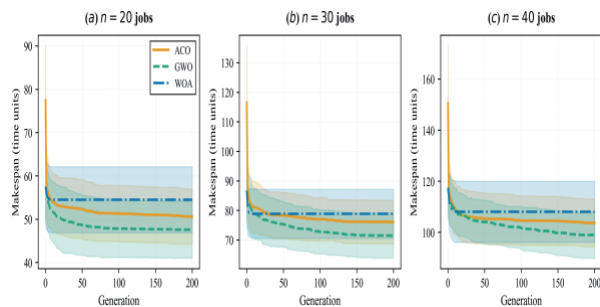


그림 3. 알고리즘 간 수렴 곡선 비교

모든 규모에서 WOA 는 초기 20 세대 이내에 급격히 수렴하나, 이후 정체하는 양상을 보인다. GWO 는 약 50~75 세대에 이르기까지 점진적으로 해를 개선한다.

ACO 는 가장 느리지만 150 세대까지 꾸준한 개선을 보여, 세 알고리즘의 탐색적 특성 차이를 명확히 확인할 수 있다.

2.4 알고리즘 적합성 분석

속도가 중요한 긴급 스케줄링 상황에서는 WOA 가 가장 빠른 수렴을 보이고 계산 시간도 최단이어서 긴급 스케줄링에 적합하다. 품질 우선 스케줄링 상황에서는 GWO 가 평균 Makespan 에서 최고 성능을 보여 일일 및 주간 생산 계획에 가장 적합하다. 계산 시간도 WOA 대비 20% 정도만 증가하여 실용적이다. 마지막으로 안정성이 최우선인 스케줄링 상황에서는 표준편차가 가장 낮은 ACO 가 일관된 결과가 필요한 상황에 적합하다. 계산 시간이 GWO 대비 7-13 배 소요되나 주간 계획 수립 시에는 충분히 허용 가능하다.

2.5 하이브리드 접근법 제안

조전소 블록 조립 스케줄링 최적화를 위해 각 알고리즘의 강점을 결합한 GWO-ACO 하이브리드 전략을 제안한다. Phase 1(0-50 세대)에서 GWO 로 유망 영역을 빠르게 탐색하고, Phase 2(51-200 세대)에서 GWO 결과를 ACO 의 초기 페로몬으로 활용하여 정밀 탐색을 수행한다. 이를 통해 전체 수렴 시간 단축과 해 품질 개선을 기대할 수 있으며, 계산 시간은 단일 ACO 대비 약 20% 절감될 것으로 예상된다.

III. 결론

본 연구는 조전소 블록 조립 스케줄링 최적화를 위해 WOA, GWO, ACO 를 정량적으로 비교하였다. 실험 결과 각 알고리즘은 서로 다른 측면에서 강점을 보였다. GWO 는 평균 Makespan 에서 우수한 성능을 나타냈으며, ACO 는 안정성이 가장 우수하였다. WOA 는 가장 빠른 수렴과 최단 계산 시간을 보였다. 긴급 스케줄링에는 빠른 수렴이 필요하므로 WOA 가, 일일/주간 생산 계획에는 품질과 효율의 균형이 중요하므로 GWO 가, 안정성이 최우선인 상황에는 ACO 가 적합하다. 실제 조전소에 적용하기 위한 연구로는 제안한 GWO-ACO 등의 하이브리드 알고리즘의 구현 및 검증과 동적 재스케줄링 환경 고려가 필요하다. 본 연구는 조선 산업의 디지털 전환에 필수적인 스케줄링 시스템 구축의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 - 학석사연계 ICT 핵심인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2024-00436744).

참 고 문 헌

- [1] S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51-67, 2016.
- [2] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46- 61, 2014.
- [3] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol. 26, no. 1, pp. 29- 41, 1996.