

조선소 블록 생산 일정 최적화를 위한 선후공정 제약 환경에서의 하이브리드 유전 알고리즘 연구

신민철, 한승주, 한광욱*, 유병우*, 박은찬
동국대학교, *한화오션

dbeoalscjf98@naver.com, tmdwn0324@dgu.ac.kr, *gwanguk.han@hanwha.com,
*dbquddn2304@hanwha.com, ecpark@dgu.ac.kr

A Study on Hybrid Genetic Algorithm for Shipyard Block Production Scheduling Considering Precedence Constraints

Mincheol Shin, Seungjoo Han, *Gwanguk Han, *Byeongwoo Yoo, Eun-Chan Park
Dongguk Univ., *Hanwha Ocean.

요약

본 논문은 조선소 블록 공정에서의 효율적인 스케줄링과 원활한 공장 흐름을 위해, 선후공정 제약을 고려한 하이브리드 유전 알고리즘 기반의 스케줄링 최적화 방안을 제안하고 그 성능을 비교 분석한다. 블록 생산은 공정 간 연계성이 강하고 제약이 복잡하여, 기존의 경험적 방식이나 단순 규칙만으로는 전역적인 최적해를 도출하는 데 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 작업량(MH), 계획 착수일(Plan), 선후공정 간 대기시간(Slack)을 고려한 가중합 기반의 다목적 함수를 설계하고, 유전 알고리즘에 선별적 지역 탐색을 결합하여 기존 방식 대비 적은 시뮬레이션 횟수로도 최적해를 도출하는 하이브리드 접근법을 제시한다.

I. 서론

조선업은 수많은 공정이 유기적으로 연결된 복합 제조 산업으로, 선후공정 간의 긴밀한 연계성과 자원 제약, 엄격한 납기 준수가 요구된다. 특히 선행 공정의 지연은 전체 프로젝트 일정에 연쇄적인 파급효과를 미치므로 효율적인 생산계획 수립이 필수적이다. 그러나 현행 조선소의 생산계획은 주로 작업자의 경험에 의존하거나 단순한 롤링 계획(Rolling Plan) 체계에 머물러 있어, 다중 프로젝트 환경의 복잡성과 자원 경합 문제를 효과적으로 해결하기 어렵다는 한계점이 존재한다[1].

본 연구의 대상인 블록 생산 공정은 선후공정 제약, 반출 회차, 가용 용량 등이 복합적으로 작용하여 해공간이 불연속적이고 비선형적인 Black-box 특성을 보인다. 이러한 환경에서는 목적 함수의 미분 불가능성으로 인해 기울기 기반 최적화(Gradient Descent)를 적용하기 어려우며, 단순 전역 탐색(Grid Search) 또한 막대한 계산 비용으로 인해 효율적인 최적해 탐색에 구조적 제약이 따른다[2].

이에 본 논문은 현실적인 제약 조건이 반영된 시뮬레이션 환경을 구축하고 하이브리드 유전 알고리즘(HGA)을 적용하여 최적 생산 일정을 도출하는 방안을 제안한다. 제안된 기법은 유전 알고리즘의 전역 탐색 능력을 통해 지역 최적해 합성을 회피하고, 선별적 지역 탐색을 결합함으로써 단순 탐색 기법 대비 적은 시뮬레이션 횟수로도 해의 정밀도와 탐색 효율성을 향상시키도록 구현되었다.

II. 본론

2.1 시뮬레이션 설계 및 구현

본 연구는 조선소 블록 생산 공정의 선후공정 및 자원 제약을 정밀하게 모사하기 위해 이산 시간 기반 시뮬레이터로 설계되었다. 각 공정은 고유 식별자를 통해 선행·후행 관계가 매핑되며, 모든 작업은 선행 공정 완료 시점에만 착수 가능하도록 구현하여 투입 로직의 현실성을 확보하였다. 작업장 모델은 라인 정반과 고정 정반의 다단계 구조로 구성된다. 1차 작

업을 수행하는 라인 정반은 A/B 두 개의 독립 라인으로 운영되며, 각 라인은 최대 동시 처리 용량과 특정 시각에만 반출이 가능한 시간적 제약을 갖는다. 2차 작업을 수행하는 고정 정반은 다수의 개별 정반으로 구성되며, 물리적 공간 제약으로 인해 일부 구간에서 단방향 출입에 따른 내부 대기 현상이 발생하도록 구현하였다.

시뮬레이션 엔진은 1시간 단위로 MH 소모와 자원 점유 상태를 갱신함으로써, 단순 일정 계산을 넘어 공정 간 간섭과 물리적 제약이 상호작용하는 현장의 복잡성을 충실히 재현할 수 있게 하였다.

2.2 목적 함수 설계

다양한 운영 목적을 동시에 달성하고 현장 상황에 유연하게 대응하기 위해, 본 연구는 가중합 기반의 그리디 알고리즘을 핵심 스케줄링 로직으로 채택하였다. 본 알고리즘은 매 시점 착수 가능한 공정 집합에 대해 다음 세 가지 핵심 요소를 고려하여 우선순위 점수(Score)를 산출한다.

첫째, 작업량(MH)은 공정의 리드타임과 라인 회전율에 직접적인 영향을 미치는 요소이다. 둘째, 계획 착수일(Plan)은 기존 계획과의 정합성을 유지하기 위한 기준이다. 셋째, 대기시간(Slack)은 선행 공정 완료 후 장기간 대기 중인 공정에 우선권을 부여하여 재공(WIP) 누적과 공정 단절을 방지하기 위한 요소이다. 우선순위 점수는 각 요소의 정규화된 값(f)에 가중치(w)를 곱하여 합산하는 방식으로 계산되며, 점수가 낮을수록 높은 우선순위를 갖는다.

$$Score = w_{mh} \cdot f_{mh} + w_{plan} \cdot f_{plan} + w_{slack} \cdot f_{slack}$$

이를 바탕으로 제안하는 HGA의 개체는 3개의 실수형 유전자로 구성된 가중치 벡터 $w = (w_{mh}, w_{plan}, w_{slack})$ 로 표현된다. 이때, 유전자는 각 요소의 상대적 중요도를 나타내며 실험 조건의 통제와 비교 분석을 용이하게 하기 위해 가중치 합 제약조건($\sum w_i = 1$)과 비음수 제약조건 ($w_i \geq 0$)을 적용하였다. 적합도 평가를 위한 목적함수 $J(w)$ 는 전체 공

정 완료 시간(Makespan)과 대기시간 총합(Wait Sum)의 가중 합으로 정의하였다.

$$J(w) = Makespan(w) + \alpha \cdot WaitSum(w)$$

이때, α 는 대기시간 총합(Wait Sum)의 수치적 규모가 Makespan에 비해 과도하게 커서 목적함수가 편향되는 것을 방지하기 위한 스케일링 계수로서, Makespan의 변화를 유의미하게 반영할 수 있도록 0.01로 설정하였다.

2.3. 알고리즘 설계

정의된 목적함수와 제약조건을 기반으로, 가중합 그리디 스케줄러의 최적 파라미터를 탐색하기 위해 하이브리드 유전 알고리즘(HGA)을 선택하였다. 초기 해 집단은 탐색 공간의 다양성 확보를 위해 무작위로 생성하였으며, 이후 세대별 교차 및 변이 연산과 선별적 지역 탐색을 반복하여 목적함수 값을 개선하도록 설계하였다.

불연속·비선형 해공간에서의 수렴 속도와 해의 품질을 보장하기 위해, 상위 우수 개체를 다음 세대로 보존하는 엘리트 보존 전략을 적용하였다. 변이 연산은 엘리트를 제외한 자손 개체군에 적용되며, 광범위한 탐색을 위한 전역 재샘플링과 국소적 탐색을 위한 미세 조정을 복합적으로 수행함으로써 초기 수렴을 방지하고 해의 정밀도를 확보하였다.

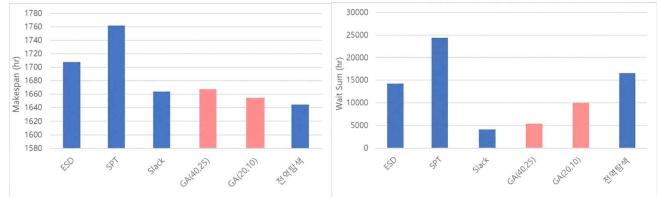
또한, 시뮬레이션 기반 최적화의 높은 계산 비용을 고려하여, 본 연구는 BOHGA(Best-Offspring Hybrid GA) 전략을 채택하였다[3]. 이는 모든 자손에게 지역 탐색을 수행하는 대신, 전역 최적해를 개선하는 우수 자손이 발생할 경우에만 선택적으로 지역 탐색을 수행하는 방식이다. 지역 탐색 알고리즘으로는 미분값이 불필요하여 Black-box 최적화에 적합한 Nelder-Mead Simplex 기법을 적용하였다. 이를 통해 유망한 해 주변을 집중적으로 탐색하여 탐색 효율을 높이고, 적은 횟수의 시뮬레이션 실행으로도 최적해 근방으로 신속하게 수렴하도록 설계하였다.

2.4. 알고리즘 적용 및 파라미터 설정

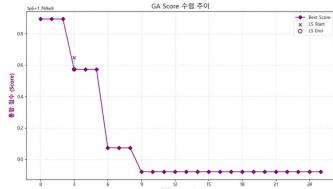
HGA의 핵심 파라미터는 시뮬레이션 기반 평가의 높은 비용을 감안하여 탐색 성능과 계산 시간 간의 균형을 최우선으로 고려해 설정하였다. 특히, 현장의 계산 자원 제약과 요구되는 응답 속도에 따른 성능 변화를 분석하기 위해 실험 파라미터를 두 가지 시나리오로 이원화하여 설정하였다. 충분한 탐색을 통해 해의 품질을 극대화하는 중단기 설정(개체수 40, 세대수 25)과, 긴급한 의사결정을 위해 계산 속도를 우선하는 단기 설정(개체수 20, 세대수 10)을 각각 적용하여 비교 분석하였다. 공통적으로 각 세대에서 적합도 상위 1/3은 엘리트로 보존하고, 나머지는 교차(0.85)와 변이(0.2)를 통해 자손을 생성하였다. 변이 연산은 전역 재샘플링과 미세 조정 (± 0.2)을 혼합하여 초기 수렴을 방지하였으며, 세대 내 최우수 자손이 목적 함수 값을 개선할 경우에 한해 지역 탐색을 수행하였다. 이러한 설정은 전체 스케줄링 결과를 10분 이내에 산출하는 것을 목표로 하였다.

2.5 실험 결과 및 분석

본 연구의 성능 검증은 실제 현장의 생산 특성을 모사하여 재구성된 2개 월 단위 블록 생산 실적 데이터를 기반으로 수행되었다. 비교 대상으로는 기존 계획 준수 방식인 Baseline(ESD, $w=(0, 1, 0)$), 단일 규칙인 SPT($w=(1, 0, 0)$)와 Slack($w=(0, 0, 1)$), 그리디 방식의 전역 탐색을 선정하였다. 제안된 HGA는 탐색 예산에 따른 효율성을 검증하기 위해 고비용 GA(40, 25)와 저비용 GA(20, 10) 설정으로 나누어 평가하였다.



<그림 1> 가중치 조합에 따른 Makespan 및 Wait Sum



<그림 2> 제안된 HGA의 최적화 수렴 과정

실험 결과, <그림 1>의 Baseline(ESD) 대비 제안된 GA(40, 25)는 Makespan을 2.4%, Wait Sum을 62% 감소시켰으며, GA(20, 10)의 경우 Makespan은 3.1%, Wait Sum은 29.8% 단축하여 두 지표를 동시에 개선한 결과를 보여준다. 또한, GA(40,25)의 시뮬레이션 수행 시간은 11.4분으로 측정되었고, GA(20,10)의 경우에는 3.6분으로 GA(40,25) 대비 31.6% 수준으로 감소하였다. <그림 2>는 제안한 HGA에서 세대가 진행됨에 따라 목적 함수가 수렴하는 과정을 나타내며, 10세대 이후에 안정적인 수렴 단계에 진입함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 조선소 블록 생산 공정의 복잡한 선후공정 제약과 작업장 병목을 반영한 시뮬레이션 환경 하에서, 가중합 기반 그리디 스케줄러의 성능을 극대화하기 위한 하이브리드 유전 알고리즘(HGA)을 적용하였다.

실험 결과, 제안된 HGA는 기존 계획 준수(Baseline) 방식이나 단순 전역 탐색 대비 적은 시뮬레이션 평가 횟수로도 전체 공정 완료 시간(Makespan)을 단축함과 동시에 공정 간 대기시간(Wait Sum)을 유의미하게 감소시키는 성과를 보였다. 이는 단일 규칙이나 단순 탐색으로는 달성하기 어려운 생산성과 효율성 간의 균형 잡힌 해를 도출했다는 점에서 의의가 있다. 향후 연구에서는 생산 현장의 복잡한 이해관계를 보다 정밀하게 반영할 수 있도록 가중치 평가 요소를 다각화하고, 실시간 현장 변동에 유연하게 대응하여 목적함수의 최적 가중치를 능동적으로 조정하는 자율형 스케줄링 모델로 확장하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] Shahsavari, Aria, et al. "On the relationship between lean scheduling and economic performance in shipbuilding: A proposed model and comparative evaluation." International journal of production economics 239 (2021): 108202.
- [2] Zheng, Junli, et al. "Spatial scheduling algorithm minimising makespan at block assembly shop in shipbuilding." International Journal of Production Research 49.8 (2011): 2351-2371.
- [3] W. Wan and J. B. Birch, "An Improved Hybrid Genetic Algorithm with a New Local Search Procedure," Journal of Applied Mathematics, 2013.