

다단계 조선 블록 생산 작업 환경에서 선후공정 제약을 고려한 시뮬레이션 기반 스케줄링 체계 구축 연구

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

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

A Study on the development of a simulation-based scheduling system that considers pre- and post-process constraints in a multi-stage shipbuilding block production environment

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

요약

본 논문은 조선소의 라인 정반과 고정 정반이 혼재된 복잡한 다단계 시스템에서, 기존의 경험 기반 계획 수립 방식의 한계를 극복하기 위해 선후공정 제약을 고려한 시뮬레이션 기반 스케줄링 체계를 제안한다. 제안된 시스템은 작업량(MH), 계획 착수일(Plan), 선후공정 간 대기시간(Slack)을 고려하는 가중합 기반 그리디 알고리즘을 핵심 로직으로 채택하여 다양한 운영 의도를 반영한다. 시뮬레이션 실험을 통해 231개의 가중치 조합을 분석한 결과, 기존 계획 준수 방식(Baseline) 대비 최적 조합에서 전체 리드타임(Makespan)은 약 3.1% 단축되었으며, 선후공정 대기시간 총합(Wait Sum)은 약 26% 감소하는 성과를 확인하였다. 본 연구는 다목적 최적화가 가능한 시뮬레이션 모델을 통해 스마트 조선소 구축을 위한 데이터 기반 의사결정의 실효성을 입증하였다.

I. 서론

본 연구에서는 조선소의 작업장 중 작업물이 라인을 따라 이동하는 라인 정반과, 고정된 장소에서 작업이 수행되는 고정 정반이 혼재된 다단계 생산 환경을 다룬다. 이러한 환경에서는 설비 고장이나 자재 지연 등 잦은 변동성에 대응하기 위해, 주기적으로 최신 정보를 반영하여 계획을 갱신하는 물리계획 체계의 운영이 필수적이다. 그러나 기존의 경험 기반 계획 수립 방식은 다중 프로젝트 간의 자원 충돌과 복잡한 선후공정 제약을 동시에 고려하여 최적해를 도출하는 데 한계가 있으며, 이는 공정 간 낭비와 생산성 저하로 이어진다[1].

한편, 조선업에서는 스마트 조선소 구축을 위한 기술 개발 필요성이 높아지고 있으며, 이에 있어서 지능형 생산계획 시스템은 핵심적인 기술 중 하나이다. 최근에는 조선 프로젝트를 체계적으로 모델링하고 프로세스 시뮬레이션을 통해 현실적인 생산 계획을 생성하는 방법이 연구되었으며, 이러한 시스템 모델링 기반 접근법은 조선소의 생산 시스템을 디지털 트윈 형태로 구현하는 기반이 될 수 있다[2].

이에 본 연구는 시뮬레이션을 통해 이러한 제약을 고려하고 현장의 불확실성에 유연하게 대응할 수 있는 스케줄링 체계 구축을 제안한다. 특히 본 연구에서는 실시간 현장 상황과 다양한 운영 의도를 효과적으로 반영하기 위해, 해석 및 튜닝이 용이한 가중합 기반의 그리디 알고리즘을 핵심 스케줄링 기법으로 설계하였다.

II. 본론

2.1. 시뮬레이션 설계 및 구현

본 연구의 시뮬레이션은 블록 생산 공정의 선후공정 제약과 자원 제약을 정밀하게 모사하기 위해 이산 시간 기반 모델로 설계되었다. 데이터 전처리 단계에서는 각 공정에 대해 '공사 번호 - 블록 번호 - 송선'을 결합한

고유 식별자를 부여하고, 이를 통해 공정 간의 선행·후행 관계를 매핑한다. 시뮬레이션 상에서 모든 공정은 선행 공정이 완료된 시점에 비로소 착수 가능 상태로 전환되며, 이는 투입 의사결정의 필수 전제 조건으로 작용한다.

작업장 모델은 라인 정반과 고정 정반의 다단계 구조로 구성된다. 1차 작업을 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 시간을 진행시키며, 매 단계마다 작업량(MH, Man Hour) 소모, 자원 점유 상태, 반출 이벤트 등을 갱신한다. 이러한 설계는 단순한 일정 계산을 넘어, 공정 간의 연계성과 작업장의 물리적 병목이 상호작용하는 실제 생산 현장의 복잡성을 실행 기반으로 재현할 수 있게 한다.

2.2. 스케줄링 알고리즘 설계

다양한 운영 목적을 동시에 달성하고 현장 상황에 유연하게 대응하기 위해, 본 연구에서는 가중합 기반의 그리디 알고리즘을 제안한다. 단일 목적 디스패칭만으로는 납기 준수와 생산성 향상이라는 서로 다른 목표를 동시에 만족시키기 어렵다는 점에 착안하여, 해석과 튜닝이 용이한 다목적 우선순위 결정 로직을 설계하였다.

본 알고리즘은 매 시점 착수 가능한 공정 집합에 대해 다음 세 가지 핵심 요소를 고려하여 우선순위 점수를 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 값에 가중치를 곱하여 합산하는 방식으로 계산되며, 점수가 낮을수록 높은 우선순위를 갖도록 설계되었다. 공정 j 의 t 시점에서의 우선순위 점수는 다음과 같이 계산된다.

$$score(j,t) = w_{mh} \cdot \left(\frac{MH_j}{\Delta MH} \right) + w_{plan} \cdot \left(\frac{T_j^{plan}}{\Delta T} \right) + w_{slack} \cdot \left(-\frac{W_j(t)}{\Delta T} \right)$$

수식 1. 공정 투입 우선순위 결정 함수

여기서 w_{mh} , w_{plan} , w_{slack} 은 각 요소의 중요도를 나타내는 가중치이며, MH_j 는 공정 j 의 총 작업량, T_j^{plan} 은 공정 j 의 계획 착수일을 타임스탬프로 변환한 값, $W_j(t)$ 는 시각 t 에서 공정 j 가 선행 공정 완료 이후 대기한 시간, ΔMH 와 ΔT 는 각 항의 정규화를 위한 범위(span)값을 의미한다.

이 구조의 목적은 여러 기준을 동시에 반영하면서도, 각 기준의 상대적 중요도를 가중치로 조절할 수 있게 하며, 정규화를 통해 스케일 차이로 인한 한 항의 과도한 지배를 방지하기 위함이다.

2.3. 실험 설계 및 파라미터 설정

본 연구에서는 제안한 스케줄링 알고리즘의 가중치 변화가 생산 효율성과 공정 연속성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 탐색적 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 실험의 핵심 변수인 가중치 벡터 (w_{mh} , w_{plan} , w_{slack})는 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. 실험 시나리오는 전체 해공간을 0.05 단위로 균등 분할(Grid Search)하여 생성된 총 231개의 가중치 조합에 대해 스케줄링을 수행하고 시뮬레이션을 통해 그 결과를 검증하였다.

스케줄링 성능을 평가하기 위한 정량적 지표로는 전체 리드타임(Makespan)과 선행공정 간 대기시간 총합(Wait Sum)을 선정하였다. Makespan은 모든 공정이 완료되는 시점까지 소요된 총 시간으로, 조선소의 전체적인 생산성을 대변하는 지표이다. Wait Sum은 선행 공정 완료 후 후행 공정이 착수될 때까지 발생한 유휴 시간의 합계로, 공정 간 연계의 연속성과 재공(WIP)의 정체 수준을 나타내는 지표로 활용된다.

시뮬레이션 내부에서 설정한 세부 파라미터는 제공받은 데이터를 참고하여 생성하였으며 설정값은 다음과 같다.

항목	설정값
근무일 및 시간	주 6일 8시간 2교대
라인 정반 용량	A라인 6, B라인 6
라인 정반 처리량	6MH/h
라인→고정 반출 회차	작업시간 중 일 2회
고정 정반 구성	중조 3개, 대조 6개
고정 정반 용량	정반당 최대 2개
고정 정반 처리량	6MH/h
검사 시간	48h
데이터 범위	2개월 실적

표 1. 시뮬레이션 내부 파라미터

2.4. 실험 결과 및 분석

본 절에서는 전역 탐색을 통해 도출된 가중치 조합의 시뮬레이션 결과를 분석한다. 비교 분석의 기준이 되는 Baseline은 기존 계획 준수를 최우선

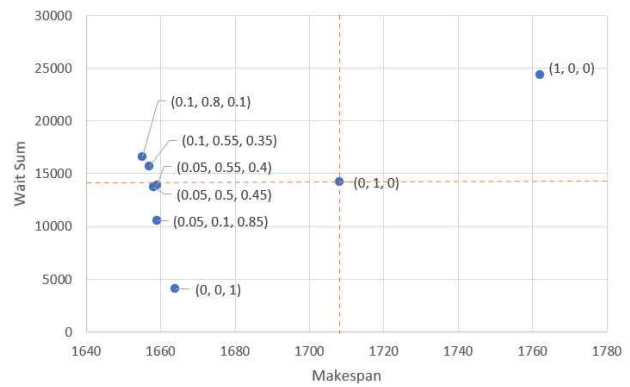


그림 1. 가중치 조합에 따른 Makespan과 Wait Sum

으로 하는 경우, 즉 $w_{plan} = 1$ 인 (0, 1, 0) 조합으로 설정하였다.

실험 결과는 <그림 1>의 산점도를 통해 분석하였다. Baseline(0, 1, 0)을 나타내는 붉은 점선(Makespan 1,708h, Wait Sum 14,242h)을 기준으로, 좌하단 영역에 위치한 해들은 두 지표를 동시에 개선한 결과를 보여준다. 가장 짧은 Makespan을 기록한 (0.1, 0.8, 0.1) 조합은 1,655h로 Baseline 대비 53h를 단축했다. 이와 비교하여 (0.05, 0.1, 0.85) 조합은 Slack 항의 영향이 강해짐으로서 Makespan은 다소 증가하였지만 Wait Sum을 10,521h로 약 26% 감소시켰으며, 또한 Slack 중심 극단값(0, 0, 1)은 Makespan 1,664h, Wait Sum 4,078h를 기록하며 다목적 최적화의 가능성을 입증하였다.

III. 결론

본 연구에서는 조선소의 복잡한 생산 환경을 정밀하게 모사한 시뮬레이터와 가중합 기반의 그리디 스케줄링 알고리즘을 개발하여, 기존의 경험 기반 계획 수립의 한계를 보완할 수 있는 방법론을 제시하였다. 실험 결과, 계획 준수, 작업량, 대기시간의 가중치를 유연하게 조절함으로써 최종 납기일과 공정 재공의 정체를 동시에 개선할 수 있음을 정량적으로 확인하였다. 특히, 단일 규칙보다 혼합 가중치 적용 시 Makespan과 Wait sum을 모두 개선하며 파레토 우위에 가까운 해가 도출된다는 점은 현장 상황에 따른 스케줄링 유연성의 중요성을 시사한다. 향후 연구에서는 유전 알고리즘, 강화학습 등 고도화된 최적화 기법을 적용하여 실시간 현장 상황에 맞는 최적 가중치를 자동으로 탐색하는 지능형 스케줄링 모델로 발전시키고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] Shahsavar, 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] Okubo, Yui, and Taiga Mitsuyuki. "Ship production planning using shipbuilding system modeling and discrete time process simulation." Journal of Marine Science and Engineering 10.2 (2022): 176.