creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학박사 학위논문

선박 건조 공정과 공간 배치, 물류 흐름을 고려한 조선소 물류 시뮬레이션 시스템

A shipyard logistics simulation system considering shipbuilding process, spatial arrangement, and logistics flow

2018년 2월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

정 용 국

초 록

조선 생산 시스템은 선박을 건조하는데 필요한 일련의 공정과 물리적인 구성 요소, 그리고 각 구성 요소간의 관계로 정의할 수 있다. 이때, 조선소나 조선 산업의 경쟁력을 확보하기 위해서는 선박 건조 공정의 기술적인 경쟁력 뿐만 아니라 조선 생산 시스템을 계획하고 관리하는 경쟁력도 반드시 필요하다. 하지만 구성 요소가 복잡하고 구성 요소 간 다양한 관계가 정의되어 있는 시스템의 특성상 전체적인 관점에서 통합하여 관리하는 능력이 부족한 상황이다.

선박 건조 공정은 단위 선박 건조 공정과 물류 흐름으로 구분할 수 있는데, 조선소에서는 다양한 제약 조건을 고려하여 단위 선박 건조 공정을 대상으로 중장기적인 계획을 수립한다. 물류 흐름은 단위 선박 건조 공정 사이에서 발생하는 원재료나 중간 제품의 물리적 이동으로 정의할 수 있는데, 물류 흐름은 중장기 계획을 수립할 때에는 고려하지 않는다. 다만, 정해진 중장기 계획에 따라 생산 현장에서 발생한 상황에 대응할 수 있는 물류 흐름 계획을 수립하고 있다.

조선 생산 시스템은 단위 생산 공정과 물류 흐름이 유기적으로 연결되어 있는 형태이기 때문에 전체적인 관점에서 통합 관리하기 위한 방법이 필요하다. 하지만 조선 생산 시스템이 물리적으로 구현되어 있는 조선소 사업장은 다른 제조업의 사업장에 비하여 규모가 매우 크고, 투입되는 인력, 공간, 설비와 같은 자원의 불확실성과 변동성도 높기 때문에 생산 관리 수준이 높은 대형 조선소에서도 단위 생산 공정과 물류 흐름을 통합 관리하기 어려운 상황이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 조선 생산 시스템을 구성하는 요소를 정의하고, 여러 시나리오에 따라 조선 생산 시스템의 거동을 분석할 수 있도록 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템에서는 물리적인 제약으로 인하여 조선소에서 발생하는 불확실성과 변동성을 보다 정교하게 제어할 수 있도록 기존의 조선소 시뮬레이션 시스템에서 고려하지 않은 조선 생산 시스템 내 물류 흐름과 공간 배치를 상세히 고려하였다.

또한, 본 연구에서는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 제안하는데 그치지 않고, 실제로 조선소에서 시스템을 구축하고 활용할 수 있도록 절차와 방법을 구체적으로 제시하고 있으며, 시스템의 작동 유효성과 결과 유효성 검증 절차도 포함하고 있다. 이 시스템은 조선소 중장기 계획을 바탕으로 조선 생산 시스템의 물류 흐름을 식별하고 분석하는데 활용할 수 있으며, 생산 현장에서는 물류 이송 설비의 효율적인 배차 계획을 수립하거나 작업장, 적치장의 공간 배치 계획을 수립하는 데에도 활용할 수 있다.

실제로 본 연구에서 제안한 시스템을 이용하여 중장기 계획에 따른 물류 흐름의 변화를 정량적으로 비교할 수 있음을 확인하였다. 그리고 공간 배치를 고려한 물류 시뮬레이션을 통하여 보다 정교한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 본 연구에서 제안한 공간 배치 알고리즘이 선행 탑재장 배치 문제 등에서 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

조선 산업의 경쟁력은 생산 기술의 경쟁력 뿐만 아니라 조선 생산 시스템을 구성하는 요소를 정교하고 체계적으로 관리할 때 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 제안하는 방법과 시스템은 선박 건조 공정 시뮬레이션, 물류 시뮬레이션, 공간 배치 시뮬레이션을 전사적인 관점에서 통합하여 관리하고, 다양한 생산 계획이나 전략에 따른 조선 생산 시스템의

거동을 정량적인 값으로 비교할 수 있도록 지원한다. 이를 통하여 불확실성이나 변동성이 내재되어 있는 조선 생산 시스템의 중장기 계획을 수립하고, 합리적으로 생산 시스템을 운영하는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

주 요 어: 조선 생산 시스템(Ship production system), 조선소 물류 시뮬레이션(Shipyard logistics simulation), 이산 사건 시스템 시뮬레이션(Discrete event system simulation), 선박 건조 공정(Shipbuilding process), 공간 배치 문제(Spatial arrangement problem)

학 번: 2011-23464

목 차

논문 목차

1. 서론 1
1.1 연구 배경 2
1.1.1 조선소 선박 건조 공정과 물류 흐름 분석 2
1.1.2 시뮬레이션 기반 조선소 통합 물류 관리의 필요성 7
1.2 관련 연구 동향 12
1.2.1 조선 생산 공정 시뮬레이션 관련 연구 12
1.2.2 조선소 공급망 관리 관련 연구 16
1.2.3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 관련 연구 18
1.2.4 조선소 공간 배치 문제 관련 연구 21
1.2.5 프로젝트 산업의 공급망, 물류 시뮬레이션 관련 연구 25
1.3 연구 목적 27
1.4 논문의 구성 29
2. 조선 산업 다중 계층 공급망 모델 30
2.1 조선 산업의 공급망 분석 31
2.1.1 공급망, 공급망 관리, 물류 관리의 정의 31
2.1.2 일반 제조업의 공급망 특징 분석 33
2.1.3 조선 산업의 공급망 특징 분석 37

2.2 다중 계층 공급망 모델 정의 42
2.2.1 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층 42
2.2.2 단위 조선소 내부 공급망 계층 44
2.2.3 내부 공급망 단위 구성 요소 46
2.2.4 다중 계층 공급망 모델 계층 구조와 확장 49
3. 조선소 특성을 고려한 물류 시뮬레이션 시스템 51
3.1 시스템 구성 요소 정의 52
3.1.1 조선소 시뮬레이션 프레임워크 52
3.1.2 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 분석 56
3.1.3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 정의 62
3.2 시스템 구축 절차 83
3.2.1 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 기본 구조 83
3.2.2 조선소 생산 계획, 공간 정보 연동 방법 84
3.2.3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 93
3.3 시뮬레이션 시스템 검증 96
3.3.1 작동 유효성 검증 (Verification) 96
3.3.2 결과 유효성 검증 (Validation) 102
4. 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 활용 방법 및 적용 사례 104
4.1 시스템 활용 방법 105
4.1.1 물류 흐름 식별 및 물류 부하 산출 105
4.1.2 공간 배치 계획 수립 109
4.1.3 트랜스포터 배차 계획 수립 112
4.2 시스템 적용 사례 115
4.2.1 트랜스포터 운영 전략 비교 시뮬레이션 115
4.2.2 선행 탑재장 배치 시뮬레이션 125

4.2.3 공간 활용을 고려한 물류 시뮬레이션 135
5. 결론 139
5.1 결론 140
5.2 기대효과 143
6. 참고 문헌 144

List of Figures

Figure 1 선박 건조 공정의 단위 생산 공정과 물류 흐름 3
Figure 2 조선소 생산 계획 시스템의 선표 계획 기능(상) 및 기준 계획 기능(하)..... 5
Figure 3 조선소 생산 부분 조직 구조 현황 7
Figure 4 국내 대형 조선소 공정 별 인력 분포 현황 (2016 년 7 월 말 기준) 8
Figure 5 조선 생산 시스템의 중간 제품과 이송 설비 (좌), 적치장 운영 현황 (우) .10
Figure 6 공급망 분석 관점에 따른 공급망 관리와 물류 관리의 차이 32
Figure 7 일반적인 소매품 제조업의 공급망 구조 개념도.....34
Figure 8 자동차 산업의 공급망 구조 개념도.....35
Figure 9 조선 산업의 공급망 구성 요소 분석 38
Figure 10 단위 조선소의 다중 계층 공급망 구성 요소 (사업장 외부 영역) 43
Figure 11 단위 조선소의 다중 계층 공급망 구성 요소 (사업장 내부 영역) 45
Figure 12 조선소 6 대 요소 정보 모델을 이용한 공급망 단위 구성 요소 정의 47
Figure 13 공급망 단위 구성 요소를 이용한 연결 관계 정의 48
Figure 14 조선소 다중 계층 공급망 모델의 계층 구조와 확장 50
Figure 15 조선소 시뮬레이션 프레임워크 기본 구조.....52
Figure 16 조선소 6 대 요소 정보 모델 상세 구성 요소 53
Figure 17 조선소 시뮬레이션 시스템 구축 절차 55
Figure 18 선표 계획과 선박 건조 공정의 주요 절점 56
Figure 19 탑재 네트워크 계획 사례와 탑재 이벤트 기본 구성 요소 57

목 차

Figure 20 탑재 네트워크 계획 입력 정보와 주 경로 식별 결과 59
Figure 21 탑재 블록 별 탑재 가능일 식별 결과 60
Figure 22 물리적인 제약 조건을 고려한 탑재 블록 별 탑재 가능일 식별 결과.....61
Figure 23 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 목표 및 구조도 63
Figure 24 조선소 시뮬레이션 시스템을 위한 공정 중심 모델링 방법 65
Figure 25 선박 건조 계획 및 선박 건조 공정 기본 구조.....65
Figure 26 선박 건조 계획 및 물류 흐름을 고려한 선박 건조 공정 기본 구조.....66
Figure 27 물류 토큰을 이용한 공정 중심 모델링 방법 개선 66
Figure 28 계층 구조를 가진 조선소 작업 분류 체계 68
Figure 29 계층 구조를 가진 조선소 생산 계획 데이터 69
Figure 30 시뮬레이션 입력 데이터 상황에 따른 동적 해상도 시뮬레이션 방법.....70
Figure 31 조선소 공간 배치 문제의 속성 분석 72
Figure 32 조선소 공간 배치 문제 정의 결과 73
Figure 33 미배치 공간의 형상에 따른 꼬인 형상의 개수 비교 결과 74
Figure 34 선행 탑재장의 효율적 활용을 위한 Greedy-Twist 알고리즘 76
Figure 35 모서리-꼭지점 기반 배치 후보점 탐색 방법.....77
Figure 36 Greedy-Twist 알고리즘의 주요 평가 요소 79
Figure 37 배치 기준에 따른 공간 활용 수준 판단 방법 81
Figure 38 배치 기준에 따른 상대적 처리 속도 및 정확도 비교 82
Figure 39 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 기본 구조 83
Figure 40 조선소 기준 계획 데이터를 이용한 통합 물류 프로세스 체인 정의 방법 85
Figure 41 조선소 공간 정보 관리 체계 87
Figure 42 물류 그룹과 우선 적치장 속성을 이용한 적치장 선정 방법 88

Figure 43 조선소 생산 계획-지리 정보 연동 방법 개념도 89
Figure 44 이동 설비 경로 탐색 방법 개념도 90
Figure 45 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 데이터 어댑터.....93
Figure 46 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 물류 프로세스 체인.....94
Figure 47 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 공간 정보 모델.....94
Figure 48 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 시뮬레이션 수행 결과.....95
Figure 49 작동 유효성 검증을 위한 물류 프로세스 체인 예제 96
Figure 50 공정 중심 모델링 방법을 이용한 상세 물류 로직 및 공정 로직 정의.....98
Figure 51 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과 (Gantt chart).....101
Figure 52 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과 (이송 설비) 101
Figure 53 조선소 물류 시뮬레이션 시스템의 결과 유효성 검증 방법 102
Figure 54 결과 유효성 검증을 위한 야드 내 블록 수 비교 결과.....103
Figure 55 생산 계획 단독 활용 단계 105
Figure 56 공정 시뮬레이션 시스템 활용 단계 107
Figure 57 통합 물류 시뮬레이션 시스템 활용 단계 108
Figure 58 물류 시뮬레이션 결과를 이용한 공간 배치 계획 수립 방법 110
Figure 59 물류 시뮬레이션 시스템 개념도 112
Figure 60 트랜스포터 운영 전략 시나리오 115
Figure 61 제품 별 누적 이동 거리 분포 비교.....119
Figure 62 트랜스포터 용량 별 누적 이동 거리 분포 비교 (1).....120
Figure 63 트랜스포터 용량 별 누적 이동 거리 분포 비교 (2).....123
Figure 64 트랜스포터 1 회 운행 당 평균 이동 거리 비교 124
Figure 65 블록의 조립 단계 별 기하학적 특성 분석 결과 126

목 차

Figure 66 배치 알고리즘에 따른 면적 활용률 변화 추이 128
Figure 67 배치 알고리즘에 따른 배치 현황 비교 129
Figure 68 선행 탑재장 배치 문제의 단위 격자 표현 방법 정의 130
Figure 69 단위 격자 누적 배치일 비교 131
Figure 70 단위 격자 누적 배치일 분포 현황 비교 133
Figure 71 공간 배치 시뮬레이션 결과 종합 비교 134
Figure 72 공간 활용을 고려한 물류 시뮬레이션 예제 모델 기본 정보 135
Figure 73 시뮬레이션 대상 제품의 일정 정보 136
Figure 74 적치장 공간 활용 전략 따른 면적 활용률 변화 추이 비교 137
Figure 75 조선 산업 다중 계층 공급망 모델 140
Figure 76 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 141
Figure 77 물류 시뮬레이션 시스템을 이용한 생산 계획 검증 143

List of Tables

Table 1 조선 생산 공정 시뮬레이션 관련 연구 현황 (국내) 14
Table 2 조선 생산 공정 시뮬레이션 관련 연구 현황 (국외) 15
Table 3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 및 알고리즘 관련 연구 현황 20
Table 4 조선소 공간 배치 문제 관련 연구 현황 (1) 23
Table 5 조선소 공간 배치 문제 관련 연구 현황 (2) 24
Table 6 조선 산업의 공급망 특징 분석 40
Table 7 공급망 단위 구성 요소 기본 정보 47
Table 8 배치 기준에 따른 특징 분석 81
Table 9 공정 기준 조선소 기준 계획 데이터 84
Table 10 제품 기준 조선소 기준 계획 데이터 변환 결과 85
Table 11 배치 유형 구분에 따른 특성 분석 결과 92
Table 12 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 입력 데이터 97
Table 13 작동 유효성 검증을 위한 상세 물류 로직 내용 98
Table 14 작동 유효성 검증을 위한 상세 공정 로직 내용 99
Table 15 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과 100
Table 16 생산 계획 데이터 예시 113
Table 17 공정 시뮬레이션 결과 예시 113
Table 18 물류 시뮬레이션 결과 예시 114
Table 19 권역 별 트랜스포터 정보 (시나리오 1) 117

목 차

Table 20 권역 별 트랜스포터 정보 (시나리오 2)....118
Table 21 트랜스포터 운영 전략에 따른 시뮬레이션 결과 비교 (1)....121
Table 22 트랜스포터 운영 전략에 따른 시뮬레이션 결과 비교 (2)....122
Table 23 트랜스포터 운영 전략에 따른 시뮬레이션 결과 비교 (3)....123
Table 24 실험 케이스 별 배치 대상 혼합 비율....127
Table 25 배치 알고리즘 적용 결과 비교....132
Table 26 적치장 공간 활용 전략에 따른 물류 시뮬레이션 결과 비교....138

약어 설명

BL	: Bottom-Left
BLF	: Bottom-Left-Fill
DES	: Discrete Event System
ERP	: Enterprise Resource Planning
ETO	: Engineering-To-Order
ICT	: Information and Communication Technology
IDEF0	: Integration DEfinition for Function modeling
KPI	: Key Performance Indicator
NFP	: No-Fit Polygon
OEM	: Original Equipment Manufacturing
PE	: Pre-Erection
SCM	: Supply Chain Management,
SCOR	: Supply Chain Operations Reference
TW	: Twist Shape
UML	: Unified Modeling Language
VDT	: Value Drive Tree
WBS	: Work Breakdown Structure
XML	: Extensible Markup Language

제 1 장

서 론

1.1 연구 배경

1.1.1 조선소 선박 건조 공정과 물류 흐름 분석

대부분의 대형 조선소에서는 선체 블록 건조 공법을 적용하여 선박을 건조한다. 이 방법은 조선소의 제한된 자원을 효율적으로 활용하기 위한 방법으로, 선체를 여러 개의 블록으로 나누고 도크나 선대에서 조립하여 선박을 완성하는 공법을 의미한다(Kim et al., 2005). 선박 건조 공정의 중간 제품인 블록은 원재료인 철판을 절단, 가공, 조립, 도장하여 제작한다. 그리고 선체를 제외하고 선박의 기능을 달성하기 위하여 필요한 각종 기자재나 부품을 의장품이라고 하는데, 블록 단계에서 의장품을 설치하기도한다.

선박 건조 공정의 주요 병목 공정인 탑재 공정은 도크나 선대에서 블록을 선박 형태로 조립하는 공정을 의미한다. 일반적으로 조선소의 생산성은 도크나 선대의 회전율로 측정하기도 하는데, 이를 위하여 탑재 블록을 대형화 하거나 하나의 도크에서 동시에 여러 선박을 건조하는 공법을 적용하기도 한다. 도크에서 선박의 형태로 조립된 제품은 진수 과정을 거쳐 선박을 계류할 수 있는 안벽으로 이동된다. 안벽에서는 선박이 요구된 기능을 수행할 수 있도록 나머지 의장품을 설치하고, 도장 작업을 마무리한다. 이와 같이 선박을 건조하기 위해서는 다양한 단위 생산 공정이 순차적으로, 혹은 동시에 진행되어야 한다.

그런데, 실제로 조선소 생산 현장에서는 단위 생산 공정 사이에 원재료, 부재, 중간 제품, 의장품 등을 이동하거나 대기하는 물류 흐름이 존재한다(Figure 1). 이러한 물류 흐름은 선박을 만드는데 직접적으로 가치를 더하는 공정은 아니지만, 물리적으로 넓은 공간에서 진행되는 선박 건조 공정 중 반드시 필요한 공정이다. 하지만 대부분의 대형 조선소에

서는 생산 계획 단계에서 물류 흐름을 고려하지 않고 있으며, 물류 흐름의 관리 수준은 단위 생산 공정에 비하여 매우 낮은 상황이다.

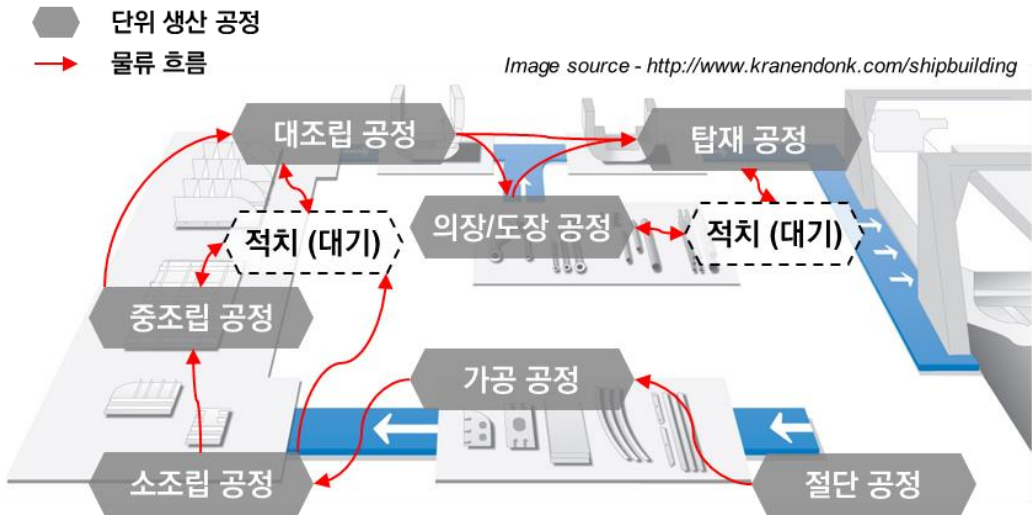


Figure 1 선박 건조 공정의 단위 생산 공정과 물류 흐름

고객의 요구사항에 맞추어 선박을 설계하고 건조하는 조선 산업은 최초 공정 시작일부터 최종 제품이 고객에게 인도되는 시점까지의 시간이 다른 산업에 비하여 긴 특징을 가지고 있다. 그리고 조선소라는 단일 생산 시스템 내에서 여러 프로젝트가 동시에 진행되며, 각 프로젝트의 단위 생산 공정은 계층 구조를 가진 하위 작업 단위로 상세화되는 특성을 가지고 있다. 따라서 선박 건조 공정을 조선 산업의 특징과 조선소의 상황에 맞게 관리하기 위해서는 복잡하고 계층 구조를 가진 선박 건조 공정과 조선소 생산 시스템의 특징을 이해하고 접근해야한다.

이를 위하여 대부분의 대형 조선소에서는 계층 구조를 가진 선박 건조 계획을 수립하여 선박 건조 공정을 관리하고 있다. 선박 건조 계획은

대상으로 하는 제품과 계획 기간을 기준으로 구분할 수 있는데, 일반적으로 선표 계획, 기준 계획, 실행 계획으로 구분된다. 선표 계획은 최종 제품인 선박을 대상으로 수립된 계획을 의미하며, 도크를 기준으로 선박 건조 공정 중 주요 절점에 대한 일정을 결정한다. 그리고 선표 계획 단계에서는 수주 상황을 고려하여 1 년 이상의 장기간의 계획을 수립한다.

기준 계획은 선표 계획을 기준으로 선박 건조 공정의 중간 제품인 탑재 블록이나 조립 블록을 대상으로 수립된 계획을 의미하며, 6 개월에서 12 개월 정도의 일정을 결정한다. 기준 계획 단계에서는 단위 생산 공정이 진행되는 조선소 내 여러 작업장이나 주요 설비의 최대 용량을 고려하여 계획을 수립한다. 하지만, 실제 생산 현장의 상황이나 인력 자원과 같은 변동성이 높은 자원을 모두 고려할 수 없기 때문에 보다 좁은 범위의 상세한 계획이 필요하다. 이를 위하여 조선소에서는 기준 계획을 기준으로 작업장 단위의 일 또는 주 단위 실행 계획을 수립하고, 이에 맞추어 생산 공정을 진행하고 있다.

이처럼 조선소의 생산 계획은 상위 계획이 하위 계획의 제약 조건으로 작용하는 계층적인 구조를 가지고 있으며, 그 밖에도 공간 자원의 중요성이 높기 때문에 공간 배치 계획의 중요성도 높다는 특징을 가지고 있다. Lee et al. (1997)의 연구에서는 이를 고려하여 대형 조선소 전용 생산 계획 시스템을 개발하였으며, 이를 기반으로 한 조선소 생산 계획 시스템은 현재의 대형 조선소에서도 많이 사용되고 있다(Figure 2).

하지만 대부분의 대형 조선소에서는 단위 생산 공정을 대상으로 계획을 수립하고 있으며, 물류 흐름은 계획 단계에서 고려하지 않고 있다. 현재 물류 흐름에 대한 계획은 기준 계획을 바탕으로 실행 계획을 수립하는 단계에서 단위 생산 공정의 진행 상황과 작업 현장의 상황에 맞추어 대응 방안을 마련하는 수준으로 관리되고 있다.

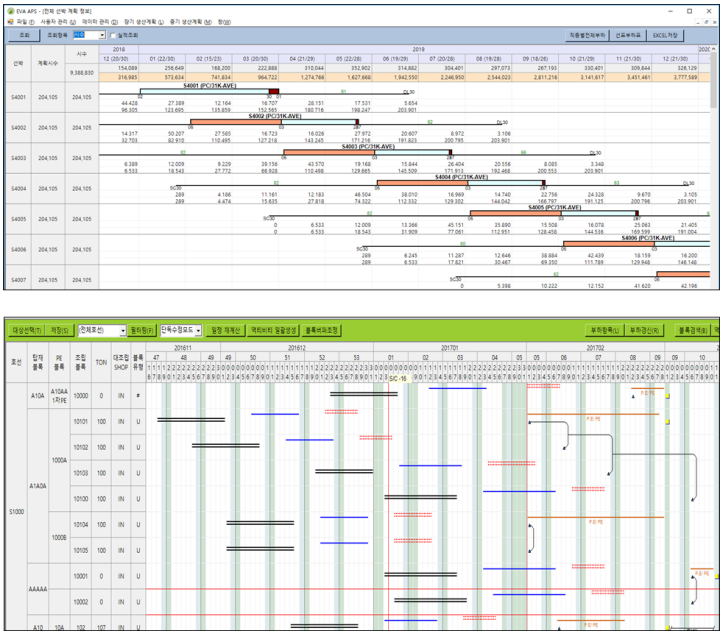


Figure 2 조선소 생산 계획 시스템의 선표 계획 기능(상) 및 기준 계획 기능(하)

조선소에서 발생하는 물류 흐름에 대한 관리 수준이 선박 건조 공정에 비하여 낮은 원인은 여러 가지로 분석할 수 있다. 우선, 조선 산업은 다른 산업에 비하여 자동화 수준이 낮고, 인적 요인이 생산 공정에 큰 영향을 미치는 특성을 가지고 있다. 대표적인 노동 집약 산업인 조선 산업은 패널 조립 공정과 같은 일부 공정을 제외하고 대부분의 공정의 자동화 수준이 매우 낮다. 따라서 단위 작업자의 능률이나 산출량을 정량적으로 산출하기 어려우며, 공정에 투입 가능한 자원의 불확실성과 변동성도 크기 때문에 계획을 수립하여 관리하기 어렵다. 특히, 물류 흐름은 단위 생산 공정 사이에 발생하는 부가적인 공정이기 때문에 중장기 계획을 수립하는 단계에서 물류 흐름까지 고려하여 생산 계획을 수립하기

는 쉽지 않다.

또한 조선 산업은 대표적인 ETO (Engineering-To-Order) 산업으로, 장기적인 작업량을 예측하기 어렵다는 특징을 가지고 있다. 조선, 해양 산업을 비롯한 대규모 ETO 산업은 일반 제조업과 달리 시장의 수요가 주기적으로 발생하지 않으며, 유가나 운임 단가와 같은 외적인 요인에 따라 수요가 불규칙적으로 발생한다. 뿐만 아니라 건조 중인 선박이나 해양 플랜트에 대해서도 선주나 관리 감독 기관의 요구에 따라 설계안이 변경될 가능성도 내포하고 있다. 일반 제조업에서는 고객의 요구사항과 시장의 수요에 맞게 제품을 설계하고, 생산을 하는 반면, 조선 산업에서는 시리즈로 건조되는 선박이나 함정 등을 제외하고 대부분의 선박과 해양 플랜트는 목적과 용도에 따라 설계 결과가 다르다. 이러한 특성들로 인하여 생산 공정 관리를 위한 표준 정보 구축이 어렵다는 특징도 가지고 있다.

그 밖에도 조선소에서 발생하는 물류 흐름은 물리적으로 면적이 넓은 사업장에서 진행되고, 이송하는 제품의 무게가 무겁기 때문에 이러한 상황에서 발생하는 다양한 돌발 상황을 예측하기 어렵다는 특성도 가지고 있다. 조선 산업의 생산 계획 준수율은 다양한 외적, 내적 원인으로 인하여 다른 산업에 비하여 낮으며, 이에 따라서 실제 생산 현장에서 발생하는 물류 흐름에 대한 계획까지 중장기적인 관점에서 통합 관리하기 어려운 상황이다.

1.1.2 시뮬레이션 기반 조선소 통합 물류 관리의 필요성

조선소 생산 현장의 조직 체계는 일반적으로 기능 조직으로 구성되어 있다. 기능 조직은 대부분의 생산 현장에 적용되어 있는 조직 체계로, 기능별로 분화되어 있는 구조를 의미한다. 이러한 조직 체계는 조직 별로 담당하고 있는 업무를 전문화하여 생산성을 극대화하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히 조선소 생산 현장에서는 Figure 3 과 같이 단위 생산 공정을 수행하는 조직(가공/조립, 탑재, 도장, 의장, 전기 등)과 물류 흐름 공정을 수행하는 조직(블록 운반)으로 조직이 분화되어 있는데, 조선 산업의 특성상 다양한 외부 요인에 유연하게 대응하기 위하여 생산 조직 내 하청 인력 비율이 높은 편이다.

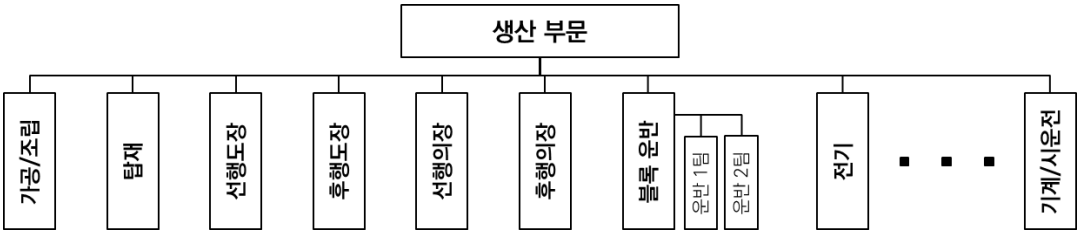


Figure 3 조선소 생산 부분 조직 구조 현황

Figure 4 는 국내 대형 조선소의 공정 별 인력 분포 현황을 나타내고 있다. 이에 따르면 가공/조립, 기계/시운전, 생산 지원 공정을 제외하고는 외주 인력의 비율이 모두 70%를 넘는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 것과 같이 조선소 생산 현장 조직은 기능 조직으로 구성되어 있기 때문에 각각의 공정은 하나의 기능 조직이 담당하는 것으로 볼 수 있다. 이때 공정의 특성에 따라 일부 하위 조직(팀)이 모두 외주 인력에 위탁 운영되는 경우도 있다. 특히 물류 흐름 공정을 수행하는 블록 운반

조직의 하위 조직은 설비의 유지 보수 비용이나 관리의 효율성을 고려하여 직영 조직과 외주 조직이 나누어 구성되어 있는 경우가 많다.

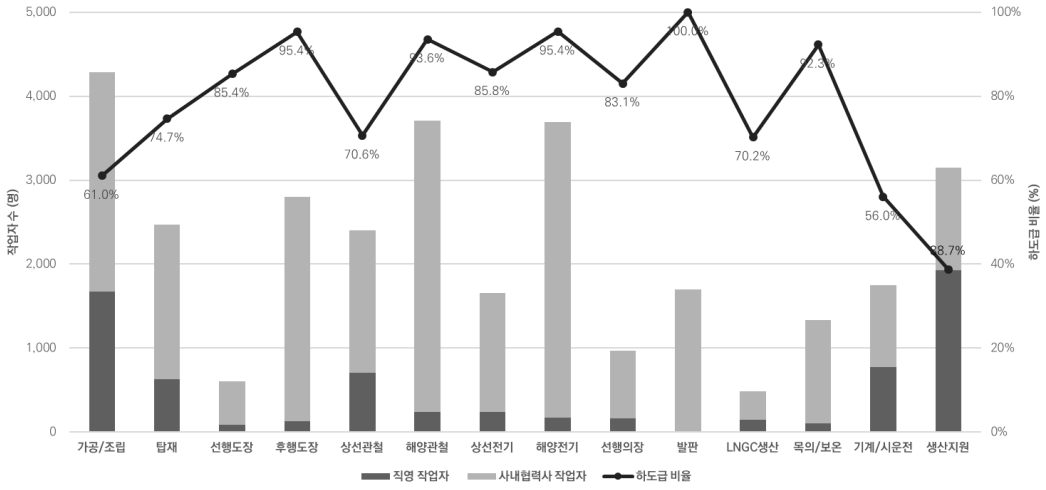


Figure 4 국내 대형 조선소 공정 별 인력 분포 현황
(2016 년 7 월 말 기준, Bae et al., 2016)

이처럼 외주 인력의 비율이 높은 조선소 생산 현장의 조직이 다른 조직과의 소통이나 협력을 하지않고, 각자의 이익을 고려하여 의사 결정을 하는 경우에는 전사적인 관점에서는 오히려 불리할 수 있다. 이러한 현상을 높은 담을 쌓고 정보를 공유하거나 협력하지 않는 곡물 창고(silo)에 비유하여 '사일로 효과(the silo effect)'라고 하는데, 기능 조직으로 구분되어 있는 조직 간 장벽과 부서 이기주의를 의미하는 용어로 사용된다(Tett, 2015). 특히 물류 흐름 공정을 담당하고 있는 블록 운반 부서의 경우, 앞서 언급한 것과 같이 조선소를 권역으로 구분하여 일부 권역에서 발생하는 블록 운반은 직영 조직이 담당하고, 일부 권역은 외주 조

직이 관리하는 것으로 구분되어 있다. 생산 계획을 수립할 때, 이와 같은 상황을 고려하여 통합 물류 흐름 계획을 수립하고 있지 않기 때문에 이를 효율적으로 관리하고 계획하기 위한 방안이 필요하다.

하지만 현실적으로 단위 생산 공정과 물류 흐름이 유기적으로 연결되어 있는 조선 생산 시스템을 전사적인 관점에서 직영 인력과 외주 인력의 상황까지 고려하여 계획을 수립하기는 쉽지 않다. 일반적으로 조선 생산 시스템의 생산 계획은 단위 생산 공정을 중심으로 계획되고 있고, 물류 흐름에 대한 계획은 실행 계획 단계에서 단기적으로 발생한 상황을 처리하고 있다. 따라서 현재의 상황에서 위와 같은 문제를 해결하기 위해서는 시뮬레이션 기술의 도입을 고려할 수 있다. 시뮬레이션 기술을 이용하면, 생산 계획 단계에서 결정된 중장기 계획을 바탕으로 물류 흐름에 대한 상세하고 정량적인 결과를 도출할 수 있다. 다양한 운영 방안이나 규칙에 대하여 정량적인 결과가 도출되기 때문에, 어떠한 운영 방안이나 규칙이 전사적인 관점에서 유리한 것인지 판단하는데 도움을 줄 수 있다.

이때, 시뮬레이션 시스템을 정교하게 구축하기 위해서는 조선 생산 시스템의 특징을 반영해야한다. 선박 건조 공정 중 발생하는 중간 제품인 블록은 다른 제조업에서 다루는 중간 제품에 비하여 크기가 크고, 무거운 특징을 가지고 있다. 조선소의 설비의 차이에 따라 블록을 분할하는 기준이 다르거나 제품의 조립 단계에 따라 크기나 중량이 다를 수 있지만, 일반적으로 블록은 두꺼운 후판을 조립하여 만들기 때문에 수십 톤 이상의 무게와 수십 미터 이상의 크기를 가진다(Figure 5). 따라서 필연적으로 이를 운송하기 위한 단위 비용이 높으며, 넓은 사업장에서 운영되고 있기 때문에 전체 물류 비용이 차지하는 비율도 높은 편이다. 따라서 조선 생산 시스템의 물류 흐름은 다른 제조업에 비하여 높은 중요도를 갖는다고 볼 수 있다.

조선소의 물류 흐름은 중간 제품을 물리적으로 이동시키는 '이송 활동(transportation activity)'과 임시로 대기하는 '적치 활동(stock activity)'로 다시 분류할 수 있다. 적치 활동은 조선 생산 시스템을 구성하는 다양한 자원 중, 공간 자원과 시간 자원을 활용하는 활동으로 볼 수 있다. Figure 5 의 우측 그림은 선행 공정이 완료된 후 후행 공정에 투입되기 전, 적치장에서 대기하고 있는 블록을 나타낸다. 조선소에서는 복수의 프로젝트 단일 사업장에서 동시에 진행되고 있기 때문에 크레인, 트랜스포터와 같은 물리적인 자원 뿐만 아니라 공간 자원과 시간 자원을 효율적으로 활용하는 것도 중요하다. 하지만 앞서 분석한 다양한 원인에 의하여 내재되어 있는 변동성과 불확실성에 의하여 이러한 요소를 생산 계획을 수립하는 단계에서 모두 통합하여 고려하기 어려운 상황이다. 하지만, 시뮬레이션 시스템에서 공간과 시간을 활용하는 방법은 하나의 기능으로 고려할 수 있으며, 생산 현장에서 정의하여 사용하고 있는 다양한 규칙을 시뮬레이션 시스템에 반영할 수 있다.

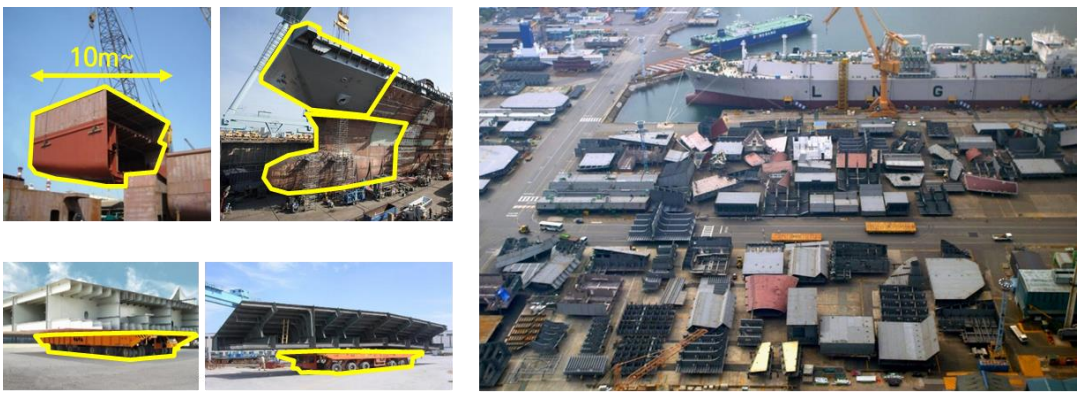


Figure 5 조선 생산 시스템의 중간 제품과 이송 설비 (좌), 적치장 운영 현황 (우)

앞서 언급한 내용을 정리해보면, 조선 산업과 조선 생산 시스템의 특성상 생산 계획이 계층 구조를 가지고 있으며, 상위 단계의 계획에서 생산 현장에서 발생하는 다양한 상황을 모두 고려할 수 없다. 이는 인적 요소의 영향, 물리적인 특성으로 인하여 발생하는 변동성과 불확실성의 영향으로 볼 수 있다. 또한 다른 제조업에 비하여 생산 공정 중 발생하는 물류 흐름의 중요도가 높은 반면, 이에 대한 관리 수준은 낮은 상황이다. 선박 건조 공정은 단위 생산 공정과 물류 흐름으로 나누어 생각할 수 있은데, 현재까지는 이를 통합하여 관리하는 방법과 체계가 부족하였다. 이에 본 연구에서는 시뮬레이션 기반 조선소 통합 물류 시뮬레이션 시스템을 구축하여, 가상의 환경을 구성하였으며 이 시스템을 이용하여 다양한 시나리오를 정량적으로 확인할 수 있도록 하였다. 시스템의 활용도를 높이기 위해서는 조선소에 이미 구축되어 사용하고 있는 기간 시스템과의 연계가 중요하며, 정량적인 결과를 분석하기 위한 방법도 고려해야한다.

1.2 관련 연구 동향

1.2.1 조선 생산 공정 시뮬레이션 관련 연구

조선 생산 공정 시뮬레이션과 관련된 연구는 국내외에서 다양한 연구가 진행되었다. Kim et al. (2002)은 3 차원 제품 모델을 활용하여 디지털 생산 기술을 선박 건조 공정에 적용하였으며, 이 연구에서는 디지털 생산 기술을 선박 건조 공정의 주요 병목 공정인 탑재 공정에 적용하였다. Kim et al. (2003)과 Shin et al. (2004)은 IDEF0 (Integration DEfinition for Function modeling) 방법과 UML (Unified Modeling Language) 분석 방법을 이용하여 각각 탑재 공정과 소조립 라인에 시뮬레이션 기술을 적용하였다. 특히 Shin et al. (2004)의 연구에서는 DELMIA 사의 상용 이산 사건 시뮬레이션 소프트웨어인 QUEST 를 활용하여 가상의 조선소 생산 환경을 구축하였다. Woo et al. (2006)은 디지털 조선소 구축을 위한 조선소 시뮬레이션 프레임워크를 정의하고 프로토타입을 제안하였으며, 이때 사용자의 접근성을 고려하여 웹 기반 시스템을 제안하였다. Song et al. (2009)은 중소형 조선소를 대상으로 선박 건조 공정을 지원하기 위한 시뮬레이션 기반 시스템을 제안하였으며, 시뮬레이션 시스템을 활용하는 방안으로 물류, 소조립 생산 계획 검증 방안을 제시하였다.

Shin et al. (2009)은 조선 생산 공정 시뮬레이션 기술을 활용하여 시뮬레이션 기반 조선소 레이아웃 설계 방법을 제안하고, 이를 활용하여 조선소의 레이아웃을 설계하였다. 그리고 Lee et al. (2009)은 패널 블록 조립 공장의 시뮬레이션 기반 생산 실행 시스템을 개발하였으며, 시뮬레이션 기술을 생산 관리 단계 뿐만 아니라 생산 실행 단계에 접목 시키는 방법을 제안하였다. Song et al. (2010)은 기존의 연구 내용을 개선하여 시뮬레이션 기반 조선소 레이아웃 설계 시스템을 제안하였다. Lee et

al. (2014a)은 조선소에서 선박과 해양 플랜트를 가상 생산하기 위한 방법으로 공정 중심 모델링 방법을 제안하였으며, 이는 본 연구에서 물류 시뮬레이션 모델을 만드는데 활용되었다. 그리고 Lee et al. (2014b)는 DELMIA 사의 QUEST 를 이용하여 시뮬레이션 기반 조선소 생산 계획 검증 방법을 제안하였으며, 일부 작업장에 공간 배치 알고리즘을 적용하여 공간 배치를 고려한 시뮬레이션을 수행하고자 하였다.

국외에서도 다양한 연구가 수행되었는데, Brazier and Perry (1991)의 연구에서는 조선소 시뮬레이션 모델을 선박 건조 공정 단계와 공장 단계로 나누어 표현하는 방법을 제안하였다. 그리고 Aoyama et al. (1999)은 조선소 액티비티를 적치, 작업, 이송으로 구분하였으며, 전체 공정에 적용할 수 있는 시뮬레이터를 Petri net 을 이용하여 개발하였다. Krause et al. (2004)는 이산 사건 시뮬레이션 기술을 이용하여 조선소 생산 계획을 수립하고 설비 투자를 지원하는 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 패널 블록의 조립 공정에 이를 적용하였다. Lamb et al. (2006)은 시뮬레이션 기반 선박 건조 공정의 생산성 향상 방안을 제안하였으며, Caprace et al. (2011)는 탑재 공정을 최적화 하기 위하여 이산 사건 시뮬레이션 기술을 활용하였다.

전반적으로 초창기 연구에서는 조선 생산 공정에 시뮬레이션 기술을 적용하기 위한 사례 연구가 수행되었으며, 일부 연구에서 전체 선박 건조 공정에 적용할 수 있는 프레임워크를 제안하였다. 하지만 대부분 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하였기 때문에 조선 생산 시스템의 특징이 잘 반영되지 않았다. 또한 구축한 시스템을 조선소에서 지속적으로 활용하는 것을 고려하지 않았다. 일부 연구에서는 조선소에서 중요하게 고려해야할 공간 자원을 고려하였으나, 이를 물류 흐름이나 선박 건조 공정과 연계하여 시뮬레이션을 수행한 사례는 부족하였다. 조선 생산 공정 시뮬레이션과 관련된 연구의 분석 결과는 Table 1, Table 2 와 같다.

Table 1 조선 생산 공정 시뮬레이션 관련 연구 현황 (국내)

구분	주요 내용	저자	적용 대상	특징
국내	디지털 생산 기술의 선박 건조 공정의 적용	Kim et al. (2002)	탑재 공정	3 차원 제품 모델 활용
	선박 건조 공정 시뮬레이션 시스템을 이용한 설계, 생산 검증	Kim et al. (2003)	탑재 공정	IDEF0, UML 분석 수행
	UML 과 IDEF0 방법을 이용한 조선소 소조립 라인 모델링 및 시뮬레이션	Shin et al. (2004)	소조립 라인	IDEF0, UML 분석 수행, DELMIA QUEST 활용
	선박 건조 공정 시뮬레이션 모델 제안 및 탑재 공정 적용	Kim et al. (2005)	탑재 공정	3 차원 제품 모델 활용, IDEF0, UML 분석 수행
	디지털 조선소 구축을 위한 프레임워크 정의, 프로토타입 개발	Woo et al. (2006)	소조립 라인	웹 기반 시스템 제안
	중소형 조선소의 시뮬레이션 기반 시스템 제안	Song et al. (2009)	물류, 소조립, 계획 검증	시뮬레이션 시스템 활용 방안 제안
	시뮬레이션 기반 조선소 레이아웃 설계 방법 제안	Shin et al. (2009)	레이아웃 설계	시뮬레이션 기반 레이아웃 설계 방법 제안
	패널 블록 조립 공장의 시뮬레이션 기반 생산 실행 시스템 적용	Lee et al. (2009)	패널블록 조립	PPRS 정보 모델, 생산 실행 단계 접목
	시뮬레이션 기반 조선소 레이아웃 설계 시스템 개발	Song et al. (2010)	레이아웃 설계	시뮬레이션 기반 레이아웃 설계 시스템 제안
	선박, 해양플랜트 가상 생산을 위한 공정 중심 모델링 방법 제안	Lee at al. (2014a)	전체 공정	공정 중심 모델링 방법 제안
	시뮬레이션 기반 조선소 생산 계획 검증 방법 제안	Lee et al. (2014b)	전체 공정	일부 작업장 공간 배치 적용, DELMIA QUEST 활용

Table 2 조선 생산 공정 시뮬레이션 관련 연구 현황 (국외)

구분	주요 내용	저자	적용 대상	특징
국외	선박 건조 공정, 공장 단계로 나누어진 2 단계 모델링 방법 제안	Brazier and Perry (1991)	전체 공정	계층 구조 모델링 방법 제안
	Petri net 을 이용한 조선소 시뮬레이터 개발	Aoyama et al. (1999)	전체 공정	조선소 액티비티 분류: 적치, 작업, 이송
	이산 사건 시뮬레이션을 이용한 조선소 생산 계획 수립과 설비 투자 지원 시스템 개발	Krause et al. (2004)	패널블록 조립	공간 배치 고려, 설비 투자, 운영 계획 수립
	시뮬레이션 기반 선박 건조 공정의 생산성 향상 방안 제안	Lamb et al. (2006)	전체 공정	시뮬레이션 기반 조선소 생산성 비교
	이산사건 시뮬레이션을 이용한 탑재 공정 최적화	Caprace et al. (2011)	탑재 공정	탑재 공정 최적화

1.2.2 조선소 공급망 관리 관련 연구

다음으로 조선 산업의 특징과 이를 다른 관점에서 접근한 사례를 분석하기 위하여 조선소 공급망 관리와 관련된 연구 현황을 분석하였다. 조선소 공급망 관리와 관련된 연구들은 비즈니스 관점에서 접근한 사례가 대부분이었다. Fleischer et al. (1999)은 조선 산업의 공급망 통합 관리를 위한 구성 요소를 정의하고 전략을 수립하였으며, Jung (2013)은 조선소 사내 공급망 관리를 위한 ERP (Enterprise Resource Planning) 시스템 도입 성과와 성공 요인을 분석하였다. 그리고 Bolton (2001)은 조선소 통합 관리를 위한 조선소 공급망 가상화 시스템 연구를 수행하였으며, Jeong et al. (2009)의 연구에서는 공급망 관리 문제 해결을 위한 조선 산업의 업무 프로세스를 분석하고 이를 개선하기 위한 방안을 연구하였다.

그 밖에도 중소형 조선 기자재 업체 통합 관리를 위한 클라우드 컴퓨팅 기반 시스템 제안 연구(Jung et al., 2010), 조선 산업의 공급망 관리 수준 진단 프레임워크 제안 연구(Jeong, 2013), 제품 모듈화를 고려한 조선 산업의 공급망 통합 관리 방법 제안 연구(Pero et al., 2015), SCP-Matrix 를 이용한 조선 산업의 공급망 모델 정의 및 생산 계획 모듈 개발 연구(Nam et al., 2016) 등이 수행된 바 있다.

최근에는 조선 산업의 공급망을 프로젝트 관리 관점에서 접근한 연구가 일부 연구자에 의하여 시작되었다. Mello and Strandhagen (2011)은 조선 산업의 공급망을 분석하고 ICT (Information and Communication Technology) 기술을 이용하여 조선 산업 공급망 경쟁력을 향상시킬 수 있는 방안을 연구하였다. 그리고 이후의 후속 연구에서는 ETO 산업의 공급망 구성 요소를 분석하고 조선 산업의 공급망 관리 적용 사례를 분석하였다(Mello et al., 2015a). 그리고 ETO 산업의 프로젝트 일정 지연

을 방지하기 위한 공급망 관리 방법도 연구하였다(Mello et al., 2015b). Mello et al. (2017)는 최근의 연구에서 ETO 산업의 공급망 경쟁력 향상을 위한 구성 요소 별 대응 방안 연구 사례를 발표하기도 하였다. 그리고 Woo et al. (2016)은 조선소 공급망 관리 경쟁력 향상을 위한 시뮬레이션 프레임워크와 분석 방법을 제안하였다.

1.2.3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 관련 연구

다음으로 본 연구에서 대상으로 하고 있는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템과 관련된 연구를 분석하였다. 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 관련 연구는 물류 시뮬레이션 시스템에 관련된 연구와, 물류 시뮬레이션 시스템의 기능을 담당하는 알고리즘 관련 연구로 나눌 수 있다.

물류 시뮬레이션 시스템과 관련된 연구에는 이산 사건 시뮬레이션 방법을 이용하여 조선소 옥외 물류 시뮬레이션을 연구한 사례가 있으나 (Lee et al., 2007), 이 연구는 초창기 연구로 적치장 배치 알고리즘이나 최적 경로 탐색 알고리즘 반영하지 않았다. Song and Kang (2009)도 유사한 연구를 수행하였으며, 가상의 조선소를 구축하고 시나리오에 따른 영향을 분석하였다. Woo et al. (2010)의 연구에서는 적치장 배치 알고리즘을 단순화하여 고려하였으며, 이를 바탕으로 의사 결정을 지원할 수 있는 블록 물류 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 이후 Cho et al. (2011)의 연구에서는 조선소 블록 및 물류 계획 최적화와 부하 분석을 위한 관제 시스템을 개발하고 이와 관련된 시뮬레이션 기술을 연구하였다. 이 연구에서는 모바일 기기를 활용하기도 하였으나 물류 시뮬레이션 시스템보다는 조선소에서 발생하는 물류 흐름을 관제하기 위한 시스템에 가까운 결과를 도출하였다. Song et al. (2012)의 연구에서도 스마트 기기를 이용하여 조선소 블록 물류 관리를 수행할 수 있는 시스템을 개발하였고, Son and Ha (2014)의 연구에서는 공리적 방법을 이용한 조선소 블록 물류 운영 시스템을 설계하여 조선소 블록 물류 시뮬레이션 시스템에 필요한 기능과 요구사항을 분석하였다.

물류 시뮬레이션 시스템의 기능을 구현하기 위한 알고리즘과 관련된 사례는 대부분 트랜스포터의 배차 계획을 수립하는데 집중하고 있다. 대표적으로 Roh and Cha (2011), Kim and Joo (2012), Heo et al. (2013)의

연구에서는 물류 이동 설비인 트랜스포터의 최소 이동 경로를 탐색하고, 대기 시간, 공차 시간, 지연 시간 등을 고려하여 트랜스포터 배차 계획을 최적화하기 위한 방법을 제안하였다. Cha et al. (2016)은 조선소에서 관리하고 있는 지리 정보를 연동하여 트랜스포터 운영 계획을 수립하기 위한 계획 시스템을 개발하였으며, Moon et al. (2016)은 트랜스포터의 최적 경로를 탐색할 때 사용 가능한 알고리즘의 성능을 정량적으로 비교하였다. 이 연구에서는 트랜스포터가 최적 경로를 탐색하는 과정에서 회전하는 횟수를 고려하여 최적 경로를 탐색할 수 있도록 하는 방법도 제안하였다.

Table 3 은 조선소 물류 시뮬레이션 시스템과 알고리즘과 관련된 연구를 정리한 결과이다. 조선소 물류 시뮬레이션 시스템과 관련된 기존의 연구에서는 조선소에서 사용하고 있는 기간 시스템과의 연계를 고려하는 것이 부족하였으며, 중장기적인 생산 계획을 시뮬레이션 하기보다는 주로 트랜스포터의 배차 계획을 수립하기 위한 시스템과 알고리즘 위주로 연구가 진행되었음을 확인하였다.

Table 3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 및 알고리즘 관련 연구 현황

구분	주요 내용	저자	적용 대상	특징
물류 시뮬레이션	이산 사건 시뮬레이션 방법을 이용한 조선소 옥외 물류 시뮬레이션 수행	Lee et al. (2007)	조선소 옥외 물류	공간 배치, 최적 경로 탐색 고려하지 않음 DELMIA QUEST 사용 기간 시스템 연계성 부족
	이산 사건 시뮬레이션을 이용한 가상 조선소 구축 및 시나리오 영향 분석	Song and Kang (2009)	조선소 옥외 물류	공간 배치, 최적 경로 탐색 고려하지 않음 DELMIA QUEST 사용 기간 시스템 연계성 부족
	적치장 블록 점유 위치를 고려한 의사 결정 지원 블록 물류 시뮬레이션 시스템 개발	Woo et al. (2010)	조선소 옥외 물류	공간 배치 일부 고려 최적 경로 탐색 고려하지 않음 DELMIA QUEST 사용 설비 투자 전략 비교
	조선소 블록 물류 최적화와 부하 분석을 위한 관제 시스템 및 시뮬레이션 기술 연구	Cho et al. (2011)	트랜스포터 배차 계획 물류 관제 시스템	공간 배치 자동화 설계 정보 기반 블록 모델 공주행 시간 최소화 모바일 기기 활용
	스마트 기기를 이용한 조선소 블록 물류 관리 시스템 개발	Song et al. (2012)	물류 관제 시스템	모바일 기기 활용, GPS 보정
	공리적 방법을 이용한 조선소 블록 물류 운영 시스템 설계	Son and Ha (2014)	트랜스포터 배차 계획	시스템 기능 정의 요구사항 분석
기본 알고리즘	트랜스포터의 최소 이동 경로와 트랜스포터 간 간섭을 고려한 블록 이송 계획 수립 시스템 연구	Roh and Cha (2011)	트랜스포터 배차 계획	최소 이동 경로 탐색 교차 주행 고려
	Ant colony 알고리즘을 이용한 조선소 블록 이송 계획 최적화	Kim and Joo (2012)	트랜스포터 배차 계획	최소 공차 시간, 대기 시간 지연 시간 고려
	운송 경로 손상을 고려한 트랜스포터 최적 블록 이동 경로 탐색 연구	Heo et al. (2013)	트랜스포터 배차 계획	손상 경로 회피 전략 최소 이동 거리
	조선소 트랜스포터 운영 계획 수립을 위한 계획 시스템 개발	Cha et al. (2016)	트랜스포터 배차 계획	지리 정보 연동, 공주행 최소
	최적 경로 탐색 알고리즘 비교 및 트랜스포터 최적 경로 탐색 적용	Moon et al. (2016)	트랜스포터 배차 계획	경로 탐색 알고리즘 성능 비교, 회전 횟수 고려

1.2.4 조선소 공간 배치 문제 관련 연구

본 논문에서 물류 시뮬레이션 시스템에 통합하여 고려하고자 하는 조선소 공간 배치 문제와 관련된 연구는 적용 대상에 따라서 구분할 수 있다. 먼저 공간 배치 문제의 배치 대상이 되는 제품의 형상과 관련된 연구로는 Ruy (2014)의 연구가 있다. 이 연구에서는 설계 정보를 기반으로 배치 대상의 형상을 정의하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 다음으로 선박 건조 공정의 원재료인 철판을 효율적으로 활용하기 위한 방법인 네스팅 알고리즘과 관련된 연구도 많이 수행되었다. 그 중에서 Lee and Ruy (2013)의 연구에서는 수치 실험을 통하여 조선소에서 사용하는 강판 네스팅 문제에서 적합도 함수를 결정하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 다양한 적합도 함수를 비교 분석하였다.

조선소의 공간 배치 문제는 제품의 조립 단계나 공정의 진행 상황에 따라 구분할 수도 있다. 먼저 조립 블록을 대상으로 한 연구에는 블록 조립 구조를 고려하여 배치 계획 문제를 모델링하고 해결 방안을 연구한 사례(Part et al., 1996), 생산 계획 시스템과 연동하여 조선소 블록 배치 계획 시스템을 개발한 사례(Ryu et al., 2008), 배치 대상 투입 순서와 회전을 고려하여 조립 공장의 공간 배치 계획 전체 일정을 최소화하는 알고리즘에 관한 연구(Zheng et al., 2011), 생산 계획 시스템과 연계하여 배치 대상의 투입 순서 전략을 비교한 연구(Zhuo et al., 2012), 배치 대상의 3 차원 형상을 고려하여 공간 정보와 일정 정보를 연동하여 고려한 배치 계획 최적화 방법 연구(Caprace et al., 2013)등이 있다.

도장 공정에 투입되는 제품을 대상으로 공간 배치 계획을 연구한 사례는 부하 평준화를 목표로 연구를 수행하였으며(Chung et al., 2001; Park et al., 2002), 탑재 블록을 대상으로 연구한 사례에서는 배치할 위치와 배치 순서를 고려하여 최적화 알고리즘을 적용한 사례(Varghese

and Yoon, 2005), 메가 블록의 배치 계획 수립 연구(Koh et al., 2011)등이 조사 되었다. 적치장에 블록을 배치하는 문제와 관련된 연구에서는 최적화 알고리즘이나 수리 모델을 이용하여 재배치 작업을 최소화 하는 연구가 다수 수행되었다(Lee et al., 2011; Roh, 2012; Ha et al., 2013; Son et al., 2014).

이처럼 대부분의 관련 연구들은 조선소의 공간 배치 문제를 공간 배치 대상의 조립 단계나 공정의 진행 상황에 따라 구분하여 문제를 정의하고 그 문제의 특성에 맞는 알고리즘을 개발하는 것을 목표로 하고 있었다. 하지만, 단위 생산 공정과의 연계나 물류 흐름과의 관계를 고려하여 연구한 사례는 부족한 것을 확인하였다. Table 4 는 조선소 공간 배치 문제와 관련된 연구 현황을 분석한 결과를 나타낸다.

Table 4 조선소 공간 배치 문제 관련 연구 현황 (1)

구분	주요 내용	저자	적용 대상	특징
배치 대상	정반 배치 블록의 투영 형상을 획득하기 위한 선체 형상 정보 간략화 방법 연구	Ruy (2014)	형상 표현	설계 정보 기반 배치 대상 형상 정의
네스팅	수치 실험을 통한 조선소 강판 전용 네스팅 문제의 적합도 함수 결정 연구	Lee and Ruy (2013)	강판 네스팅	네스팅 문제 적합도 함수 비교
조립 블록	블록 조립 구조를 고려한 조선소 블록 배치 계획 문제 모델링 및 해결 방법 연구	Park et al. (1996)	조립 블록 배치	블록 배치 계획 수립
	생산 계획 시스템, ERP 시스템과 연동한 조선소 블록 배치 계획 시스템 개발	Ryu et al. (2008)	조립 블록 배치	ERP 시스템 연동 자동 배치 알고리즘 적용하지 않음
	Makespan 을 최소화하기 위한 조선소 조립 공장 공간 배치 계획 알고리즘 연구	Zheng et al. (2011)	조립 블록 배치	배치 대상 투입 순서, 회전을 고려함 전체 작업 기간 최소화
	생산 계획 시스템과 연동한 조선소 공간 배치 시뮬레이션 및 최적화 방법 연구	Zhuo et al. (2012)	조립 블록 배치	생산 계획 시스템 연동, 배치 대상 투입 순서 전략 비교
	공간 정보와 일정 정보를 고려한 조선소 공간 배치 계획 최적화 방법 연구	Caprace et al. (2013)	조립 블록 배치	3 차원 형상 고려 (높이 정보)
도장 블록	생산 계획을 고려한 조선소 공간 일정 계획 시스템 개발 및 활용 방안 연구	Chung et al. (2001)	도장 블록 배치	공간 이용율 부하 평준화 정도 전체 블록 수 비교 공간 일정 계획 수립
	조선소 생산 계획 시스템과 연동한 도장 블록 배치 계획 시스템 개발	Park et al. (2002)	도장 블록 배치	공간 이용율 부하 평준화 정도 전체 블록 수 비교 배치 계획 수립

Table 5 조선소 공간 배치 문제 관련 연구 현황 (2)

구분	주요 내용	저자	적용 대상	특징
탑재블록	GA 기반 동적 공간 배치 계획 방법 연구	Varghese and Yoon (2005)	탑재 블록 배치	BLF 알고리즘 유전 알고리즘 적용
	GA 기반 휴리스틱 방법을 적용한 조선소 메가 블록 배치 계획 수립 연구	Koh et al. (2011)	탑재 블록 배치	Packing 알고리즘 유전 알고리즘 적용
적치장	타부서치 알고리즘을 이용한 적치장 블록 반출 계획 수립	Lee et al. (2011)	적치장 반출	타부서치 알고리즘
	간섭 블록을 고려한 적치장 배치 최적화 연구	Roh (2012)	적치장 배치	간섭 블록 고려 재배치 최소화
	적치장 최적 운영 계획 수립을 위한 수리 모델 정의	Ha et al. (2013)	적치장 배치	수리 모델 제안, 재배치 최소화, 네트워크 표현법
	적치장 운영 계획 수립을 위한 휴리스틱 방법 제안	Son et al. (2014)	적치장 배치	수리 모델 제안 재배치 최소화

1.2.5 프로젝트 산업의 공급망, 물류 시뮬레이션 관련 연구

다음으로 조선 산업과 유사한 특징을 가지고 있는 프로젝트 산업의 공급망 관리, 물류 시뮬레이션 관련 연구 현황을 건설 산업과 항공기 제조업과 같은 대규모 프로젝트 산업을 중심으로 분석하였다. Tah (2005)의 연구에서는 에이전트 기반 시뮬레이션 방법을 이용하여 건설 산업 공급망을 모델링하고 시뮬레이션 플랫폼을 정의하였으며, Cizmeci (2005)는 항공 산업의 공급망 관리 방법 사례를 연구하였다. Fayez et al. (2006)의 연구에서는 우주 탐사 프로젝트의 공급망 모델링 방법 및 시뮬레이션 방법을 연구하였는데, 초대형 프로젝트인 우주 탐사 프로젝트의 공급망은 조선 산업의 공급망과 유사한 점을 가지고 있음을 확인하였다. Vidalakis et al. (2011), Ebrahimy et al. (2011), Irizarry et al. (2013)의 연구에서는 건설 산업의 공급망과 물류 관리를 위한 모델링 및 시뮬레이션 방법을 연구하였으며, 이를 가시화 하기 위하여 BIM (Building Information Modelling), GIS (Geographic Information System) 정보와 통합하는 방안을 연구하기도 하였다.

최근에는 초고층 빌딩 건설 프로젝트의 공급망의 특성을 분석하고 이를 관리하기 위한 에이전트 기반 시뮬레이션 방법이 연구되었다(Jung 2016). 이 연구에서는 초고층 빌딩 건설 프로젝트 공급망의 복잡성을 분석하고, 영향을 줄 수 있는 다양한 요인에 대한 결과를 에이전트 기반 시뮬레이션 방법을 이용하여 확인하였다. 초고층 빌딩 건설 프로젝트는 물류 흐름과 공간의 제약, 그리고 생산 시스템을 연동하여 시뮬레이션을 수행해야 한다는점이 조선 산업의 특징과 매우 유사한 점을 확인하였다.

이처럼 프로젝트 산업의 특징을 고려한 공급망, 물류 흐름 관리 연구가 사례를 중심으로 다양하게 연구되었음을 확인하였으며, 대규모 프로젝트 산업의 경우에는 조선 산업의 생산 환경과 유사한 점이 많이 있다

는 것을 확인할 수 있었다.

1.3 연구 목적

본 논문은 조선 산업과 조선 생산 시스템의 특징을 반영한 물류 시뮬레이션 시스템을 정의하는 것을 목적으로 한다. 기존의 조선소 선박 건조 공정 시뮬레이션 시스템과는 달리 물류 흐름과 공간 배치를 통합하여 시뮬레이션 할 수 있도록 시스템을 구성하고자 하며, 시뮬레이션 결과는 중장기 생산 계획을 검증하거나 실행 계획을 수립하는 용도로 활용할 수 있다.

앞서 분석한 조선소 시뮬레이션 시스템이나 알고리즘 관련 연구에서는 조선소 선박 건조 공정과 생산 관리 수준의 한계로 인하여 정밀도가 낮고 대상으로 하는 문제가 구분되어 있는 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 시뮬레이션 시스템과 방법은 단기적인 관점에서 문제를 해결하고 의사 결정을 수립하는데 도움을 줄 수 있지만, 조선소에서 지속적으로 문제를 해결하는데 시뮬레이션 시스템을 활용할 수 없다는 한계점을 가지고 있다. 또한 시뮬레이션 시스템 구축 시 전사적인 환경을 고려하지 않고 시뮬레이션을 수행하는 경우에는 오히려 정확하지 않은 결과가 도출 될 수 있는 위험 요소를 가지고 있다.

특히, 조선 산업과 조선 생산 시스템의 특성상 물류 흐름과 공간 배치는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 기존의 연구에서는 이를 통합하여 고려하지 않은 경우가 대부분이었다. 시뮬레이션을 적용할 때에는 물리적인 제약 조건과 환경이 시뮬레이션 모델에 정교하게 반영이 되어야 정확도가 높은 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 물류 흐름과 공간 배치를 통합하여 고려한 물류 시뮬레이션 시스템과 모델링 방법을 정의하고자 한다.

그리고 본 연구에서 제안한 시스템과 방법을 조선소에서 지속적으로 활용할 수 있도록 시스템 구성 요소와 구축 방법을 상세히 제안하고자

한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 시스템은 특정한 문제를 해결하기 위한 방법으로 시뮬레이션 시스템을 활용하는 것에 그치지 않고, 이를 지속적으로 활용하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 사용자화, 모듈화가 강조되어 있는 시스템을 구축하고자 하며, 시뮬레이션 수행과 결과 분석 시 필요한 다양한 방법을 제안하고자 한다.

마지막으로 선박 건조 공정과 물류 흐름, 공간 배치를 고려한 시뮬레이션 시스템이 사용자에게 제공할 수 있는 효용을 확인할 수 있도록 다양한 활용 사례를 제공하고자 한다. 이를 위하여 시뮬레이션 결과 검증에 그치지 않고, 시뮬레이션 시스템을 활용할 수 있는 다양한 시나리오를 제공하고자 하며, 예제 데이터뿐만 아니라 실제 조선소 데이터를 입력하여 결과의 유효성도 검증하는 것을 목적으로 한다.

1.4 논문의 구성

본 논문은 크게 세 부분으로 나누어져 있다. 2 장에서는 통합 물류 시뮬레이션을 수행하기 위한 조선 산업의 다중 계층 공급망 모델을 제안한다. 이를 위하여 다른 산업의 공급망 모델을 분석하고, 조선 산업, 선박 건조 공정, 조선 생산 시스템의 특징을 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 다중 계층 공급망 모델을 정의하였다.

그리고 3 장에서는 조선소 시뮬레이션 프레임워크를 바탕으로 공간 배치와 물류 흐름을 통합하여 고려할 수 있는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 정의한다. 이때, 시스템을 구성하는 요소의 구축 방법과 활용 절차를 상세히 서술하였으며, 물류 시뮬레이션 시스템의 작동 유효성과 도출된 결과의 유효성을 검증하는 내용도 포함하고 있다.

마지막으로 4 장에서는 본 논문에서 제시하고 있는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템의 운영 방법과 활용 시나리오를 자세히 설명한다. 이때 트랜스포터 운영 전략에 따른 운행 거리와 비용을 비교하였으며, 선행 탑재장 배치 문제에 대하여 본 논문에서 제안한 배치 알고리즘의 효과를 분석하였다. 그리고 공간 배치를 고려하여 물류 시뮬레이션을 수행하였을 때 일정이나 물류 흐름에 영향을 줄 수 있음을 분석하였다.

제 2 장

조선 산업 다중 계층 공급망 모델

2.1 조선 산업의 공급망 분석

2.1.1 공급망, 공급망 관리, 물류 관리의 정의

일반적으로 제조업에서 공급망은 원재료를 최종 제품으로 변화하기 위한 다양한 활동과 제품 개발과 관련된 모든 구성 요소와 구성 요소 간 연결 관계로 정의할 수 있다(Chandra and Grabis, 2007). 공급망을 구성하는 구성 요소에는 원재료를 공급하는 공급 업체, 원재료를 이용하여 최종 제품을 제조하는 제조 업체, 최종 제품이 고객에게 인도되기 전 보관하는 유통 업체, 최종 제품을 고객에게 판매 하는 소매 업체 등이 있다. 공급망의 형태와 구성 요소는 유일하게 정해진 것이 아니며, 산업의 특성에 따라 형태와 구성 요소에 차이가 있을 수 있다. 그리고 공급망을 고객에게 가치를 더해주기 위하여 제품, 서비스, 정보 등을 공급하는 통합 비즈니스 프로세스 관점에서 바라보는 방법을 공급망 관리(Supply Chain Management, SCM)로 정의할 수 있다(Cooper et al., 1997).

공급망은 구성 요소뿐만 아니라 구성 요소 간의 연결 관계도 포함하고 있다. 따라서 공급망에서는 필연적으로 공급망을 구성하는 요소 사이의 제품 물리적 이동이 발생한다. 이때 제품은 원재료가 될 수도 있고, 공정 중간에 발생하는 중간 제품이나 고객에게 인도되기 전의 최종 제품이 될 수도 있다. Lambert (2008)는 고객의 요구사항을 만족시키기 위하여 원재료가 원산지부터 최종 제품으로 바뀌어 최종 제품 형태로 소비자에게 전달되는 제품의 물리적 흐름과 정보의 흐름을 공급망의 물류로 정의하였다.

공급망 관리와 공급망의 물류 관리는 모두 공급망에서 발생하는 제품이나 정보의 흐름을 다루고 있으나, 관점의 차이가 있다. 공급망 관리는

공급망의 거동을 비즈니스 프로세스 관점에서 분석하는 방법이고, 공급망의 물류 관리는 공급망의 거동을 제품의 물리적 이동이나 정보의 흐름 관점에서 분석하는 방법이다(Figure 6). 본 연구에서는 조선 산업의 공급망 모델을 정의하고 공급망 내 물류 흐름을 시뮬레이션 기반 시스템을 이용하여 관리하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 일반 제조업과 조선 산업의 공급망 구조와 특징을 분석하였다.

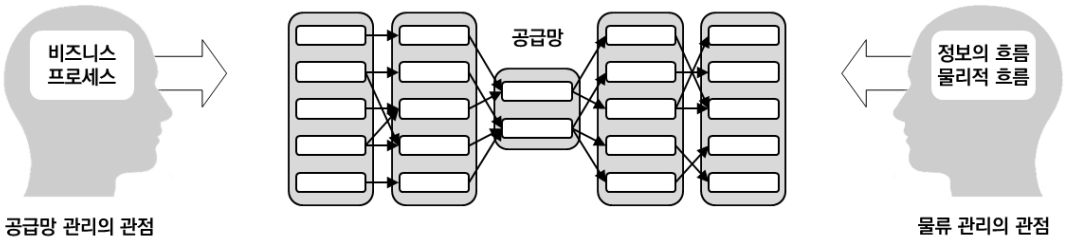


Figure 6 공급망 분석 관점에 따른 공급망 관리와 물류 관리의 차이

2.1.2 일반 제조업의 공급망 특징 분석

공급망은 대상으로 하는 산업의 특징에 따라 구조와 구성 요소가 다르게 정의될 수 있다. 하지만, 일반적으로 소매품을 생산하는 산업의 공급망은 네 개의 계층을 가지는 것으로 정의할 수 있다(Chandra and Grabis, 2007). 이때, 가장 상위 계층은 공급 계층(supply tier)이며, 다음으로 제조 계층(manufacturing tier), 분배 계층(distribution tier), 그리고 최하위 계층인 고객 계층(customer tier)이 있다. 일반적으로 소매품의 수요는 최하위 계층인 고객 계층에서 발생하여 상위 계층으로 전달된다. 그리고 최상위 계층에서는 고객의 수요에 알맞은 제품을 생산하기 위하여 원재료를 제조 계층에 공급한다. 제조 계층에는 원재료를 이용하여 최종 제품을 생산하는 제조 공정이 수행되는 공장 등이 포함되며, 수요에 맞게 제품을 생산하고 이를 분배 계층으로 전달하는 역할을 수행한다. 분배 계층에는 창고(warehouse), 물류 센터(logistics center, distribution center) 등이 구성 요소로 있으며, 창고나 물류 센터는 공급망 내에서 제품이 효율적으로 운반될 수 있도록 도와준다.

Figure 7 은 일반적인 소매품 제조업의 공급망 구조를 간단하게 표현한 것이며, 제품의 물리적 흐름과 정보의 흐름이 서로 반대 방향인 것을 확인할 수 있다. 소매품을 제조하는 산업에서는 일반적으로 과거의 수요량을 바탕으로 미래의 수요량을 예측하고, 생산량을 결정한다. 이러한 산업에서는 수요량 변화에 대응 가능하며, 재고 비용이 낮은 재고품 수준을 유지하는 것이 매우 중요하다.

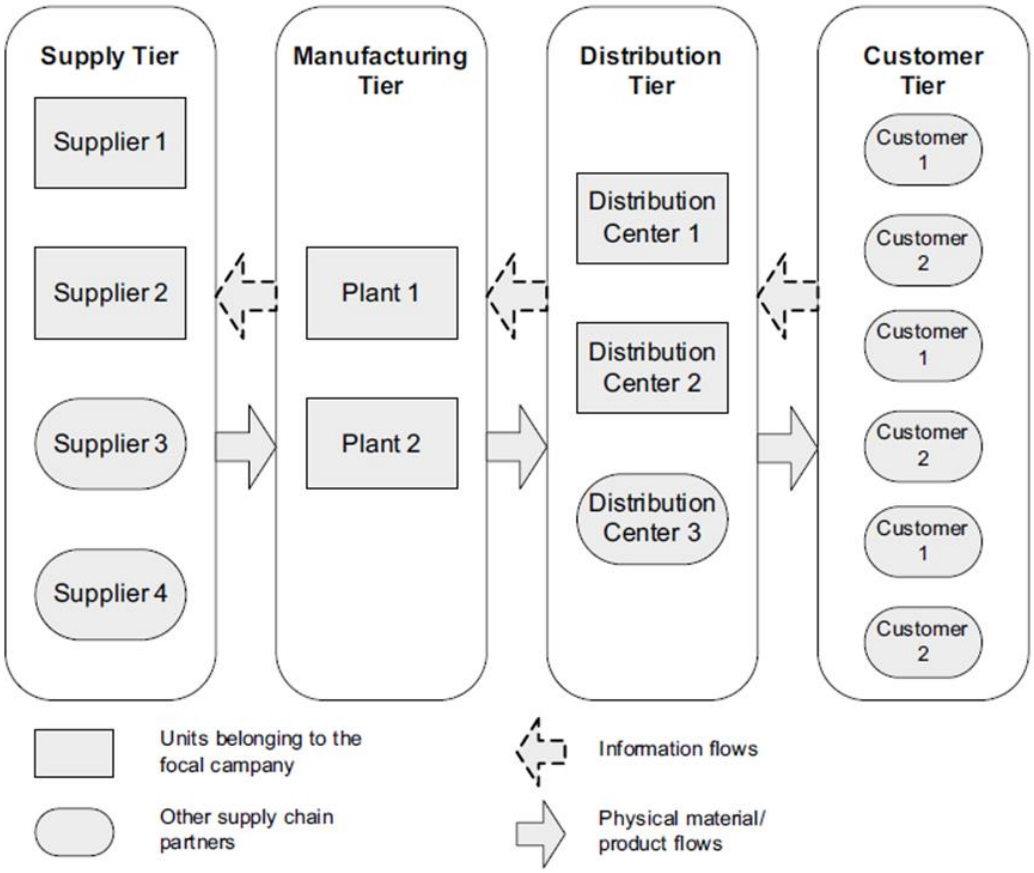


Figure 7 일반적인 소매품 제조업의 공급망 구조 개념도
(Chandra and Grabis, 2007)

자동차 산업의 공급망은 일반적인 소매품을 생산하는 제조업에 비하여 복잡한 공급 계층을 가지고 있다(Chandra and Grabis, 2007). 규모가 큰 자동차 제조사는 복수의 공급 계층을 가지고 있는 경우가 많이 있으며, 자동차를 여러 시스템으로 나누어 중간 제품을 형성한다. 그리고 시스템 단위로 만들어진 중간 제품을 제조자 설계 생산 방식(Original Equipment Manufacturing, OEM)으로 조립하여 최종 제품을 생산하며, 최종 제품은 판매 전용 법인이나 중개자(dealer)에 의하여 소비자에게 판매된다.

Figure 8 은 자동차 산업의 공급망 구조를 간단하게 표현한 것이다. 이처럼, 생산하는 제품이나 산업의 특성에 따라 공급망은 다양한 구조를 가지고 있음을 알 수 있으며, 공급망을 정의하기 위해서는 대상으로 하는 산업의 전반적인 특성뿐만 아니라 다양한 이해 당사자 간의 관계도 명확히 식별해야한다.

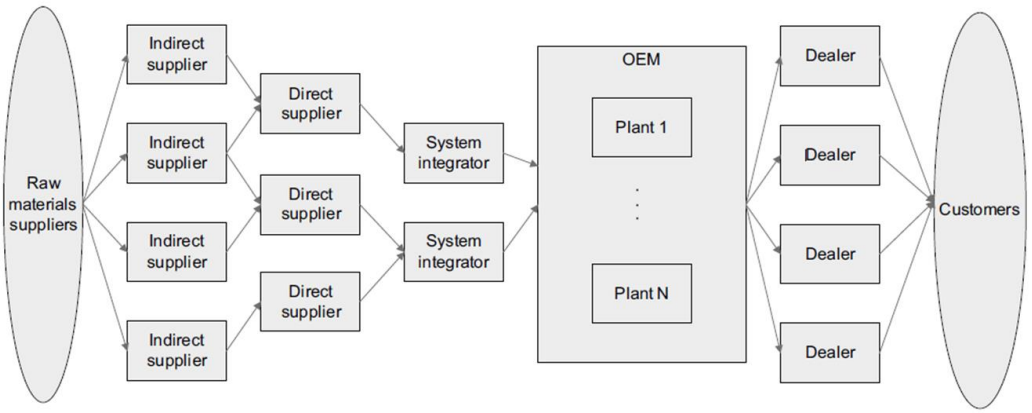


Figure 8 자동차 산업의 공급망 구조 개념도 (Chandra and Grabis, 2007)

그 밖에도 다양한 산업에서 공급망을 구성하는 이해 당사자가 증가하고, 이해 당사자간의 관계가 복잡해짐에 따라, 효과적으로 공급망을 관리하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. Stewart (1997)는 공급망을 구성하는 요소를 체계적으로 구성하는 방법을 정의하고 공급망의 성과를 측정할 수 있도록 표준 참조 모델인 SCOR (Supply Chain Operations Reference) 모델을 제안하였다. 이 모델에서는 공급망을 계획(plan), 조달(source), 생산(make), 납품(deliver)의 공통 프로세스로 분류하여 정의하였다. SCOR 모델에서는 공급망 관리 목표를 제품의 납기 신뢰성 향상, 대응 능력 향상, 공급망의 유연성 향상, 비용 최적화, 자산 관리 효율성 향상으로 제시하고 있다. 그리고 Beamon (1998)은 공급망 관리의 목표로 고객 만족도 및 고객 대응력 향상, 유연성 및 리스크 관리 능력 향상, 정보와 원재료 흐름의 통합 관리 능력 향상, 비용 최적화, 공급업체의 성과 최적화를 제시하고 있다.

2.1.3 조선 산업의 공급망 특징 분석

조선 산업의 공급망은 물리적으로 조선소 사업장 내부의 영역과 원재료 공급업체, 다양한 종류의 협력 업체가 분포되어 있는 조선소 사업장 외부의 영역으로 구분할 수 있다. 조선소 사업장 내부에는 조선 생산 시스템의 구성 요소가 물리적으로 구현되어 있다. 이 영역에서는 원재료인 철판을 공급 업체로부터 공급 받아 선체 블록 조립 공정이 진행된다. 이에 따라 중간 제품인 블록이 만들어지고, 블록을 조립하고 다양한 의장품을 추가하여 최종적으로 선박이 완성된다.

선박 건조 공정은 부가가치 공정(value added process)과 비부가가치 공정(non-value added process)으로 나눌 수 있다. 이때 부가가치 공정은 블록 건조 공법에 따라 원재료를 가공하여 최종 제품인 선박을 만드는데 직접 기여하는 공정을 의미하며, 원재료나 중간 제품의 가공, 조립 공정이 여기에 해당된다. 비부가가치 공정은 부가가치 공정이 원활하게 진행될 수 있도록 간접적으로 선박 건조 공정에 기여하는 공정을 의미하며, 원재료나 중간 제품의 운송, 대기 공정이 해당된다. 정리하면, 부가가치 공정은 조선 생산 시스템의 단위 생산 공정(unit production system)에 해당하며, 비부가가치 공정은 물류 흐름(logistics flow)에 해당한다. 그리고 물류 흐름은 실제 제품의 이동이 발생하는 이송 활동(transportation activity)와 적치 활동(stock activity)로 구분할 수 있다.

선박 건조 공정의 단위 생산 공정 사이에는 원재료나 중간 제품의 이동에 따른 물류 흐름이 필연적으로 발생하며, 이때 중간 제품의 조립 상태에 따라 다양한 종류의 이동 설비가 사용된다. 블록 이전의 중간 제품은 크기가 작고 상대적으로 가볍기 때문에 지게차 등을 사용하며, 블록 이후의 중간 제품은 트랜스포터라는 특수 이송 설비를 이용하여 운반한다. 그리고 도크(dock)나 선대(skid berth)에 위치한 탑재 단계의 블록은

크레인을 이용한다.

조선소에서는 일반적으로 복수의 프로젝트가 동시에 단일 사업장에서 진행된다. 하지만, 설비, 공간, 작업자와 같은 자원은 물리적으로 제약 사항이 있기 때문에 모든 프로젝트를 동시에 진행할 수 없다. 따라서 일부 블록 형태의 중간 제품은 외주 협력 업체에서 제작을 하여 조선소 내부로 투입되기도 한다. 조선소 외부에서 제작하거나 구매하여 조선소 내부로 투입되는 제품은 중간 제품은 블록 이외에도 소형 의장품, 대형 구매품, 배관재 등이 있다. Figure 9 는 조선 산업의 공급망 구성 요소를 분석한 결과를 나타낸다.

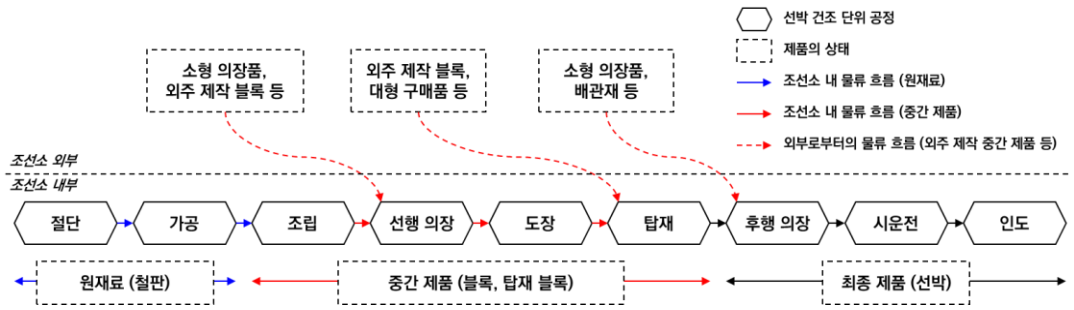


Figure 9 조선 산업의 공급망 구성 요소 분석

Held (2010)는 조선소의 역할을 공급망 관리 관점에서 분석하였다. 과거의 조선소는 선박을 건조하는 공정에 필요한 모든 공정을 사업장 내부에서 처리하였다(full shipyard). 하지만 점차 선박의 종류가 다양해지고, 선박의 기능이 복잡해짐에 따라 공금망 관리의 효율성이 강조되었다. 이에 따라 조선소는 외주 업체에서 제작한 중간 제품이나 공급자로부터 구매한 구매품을 조립하는 공간으로 변화하였다(assembly shipyard). 그리고 향후에는 조선소가 조선 산업 공급망의 시스템 통합자(system integrator)로 역할이 변경될 것으로 주장하였다.

조선 산업의 대표적인 ETO 산업으로 공급망 역시 주문형 공급망 특징을 가지고 있다. 주문형 설계 방식의 산업은 주문 시점부터 고객의 요구사항에 맞추어 제품을 설계하고 생산하기 때문에 최종 제품을 고객에게 인도하는 과정이 중요하지 않다. 따라서 주문형 공급망은 최종 제품에 대한 재고 관리를 고려하지 않는 특징을 가지고 있다. 일반 제조업의 공급망이 대칭적인 구조를 가진 반면, 조선 산업의 공급망은 최종 제품이 만들어 짐에 따라 공급망이 수렴하는 구조를 가지고 있다.

Table 6 은 조선 산업, 일반 제조업, 프로젝트 산업의 공급망 특징, 유사점, 차이점을 분석한 결과이다. 일반 제조업의 공급망은 앞서 2.1.2 절에서 분석한 것과 같이 공급망 구성 요소의 역할에 따라 계층이 명확하게 구분되어 있다는 특징을 가지고 있다. 그리고 조선 산업의 공급망이 수렴형 구조를 가지고 있는 것과 달리, 제품 제작 전후를 기준으로 공급망 관리의 중요도가 비슷한 균형적 공급망 특징을 가지고 있다.

Table 6 조선 산업의 공급망 특징 분석

구분	특징	유사점	차이점
조선 산업	주문형,수렴형 공급망 고정형 장기 사업장 복수의 프로젝트가 동시에 수행됨 최종 제품에 대한 재고 관리 중요도 낮음	-	-
일반 제조업	공급망 구성 요소의 역할에 따라 계층으로 구분됨 명확한 계층 별 역할 (공급, 제조, 분배, 고객)	-	균형적 공급망 제품 제작 전후를 기준으로 공급망 관리 중요도가 비슷함
프로젝트 산업: 건설 산업	주문형, 수렴형 공급망 비고정 임시 사업장	공급망 관리 목적: 최종 제품을 제작하기 위한 자재, 부품의 발주/구매/조달 최종 제품에 대한 재고 관리 중요도 낮음	단일 프로젝트 프로젝트를 기준으로 임시 사업장을 운영함
프로젝트 산업: 항공기 제조업	공급자의 영향력이 매우 큼 → 글로벌 SCM	크고 복잡한 구성요소 조립 → 최종 제품 주문 후 고객 인도 기간이 김	부품이 표준화되어 있음 동일 제품을 대량으로 생산함

건설 산업, 항공기 제조업과 같은 프로젝트 산업은 조선 산업과 유사한 특징을 가지고 있다. 특히 건설 산업의 조선 산업과 마찬가지로 고객의 주문에 맞추어 설계하고 건설하는 대표적인 ETO 산업이다. 따라서 조선 산업의 공급망과 마찬가지로 주문형, 수렴형 공급망 특징을 가지고 있다. 하지만 건설 생산 시스템은 조선 생산 시스템과 달리 비고정 임시 사업장에서 일회성 프로젝트가 진행된다는 차이를 가지고 있다. 따라서 건설 산업에서 공급망을 관리하는 목적은 조선 산업과 마찬가지로 최종 제품을 제작하기 위한 자재, 부품의 발주, 구매 조달에 초점을 맞추고 있으며, 최종 제품에 대한 재고 관리는 고려하지 않고 있다. 하지만 앞서 언급한 것과 같이 비고정 임시 사업장에서 단일 프로젝트가 진행되기 때문에 공급망도 프로젝트에 따라 임시적인 특성을 가지고 있다 (Jung, 2016).

항공기 제조업의 선체를 구성하는 블록과 같이 크고 복잡한 구성 요소를 조립하여 최종 제품을 생산하는 특징이 조선 산업과 유사하며, 고객이 주문 후 최종 제품을 인도 받는 데까지 걸리는 시간이 길다는 특징도 유사하다. 하지만, 항공기 제조업은 생산하는 제품이나 부품이 어느 정도 표준화 되어 있으며, 동일 제품을 대량으로 생산한다는 특징을 가지고 있다. 따라서 최종 제품 완성 후 고객에게 인도되는 과정을 중요하게 고려하지 않는 조선 산업이나 건설 산업의 공급망과는 달리, 재고 관리도 중요하게 고려해야한다. 또한, 항공기 제조업의 공급망은 공급자의 영향력이 매우 큰 특징을 가지고 있으며, 이에 따라 글로벌 공급망 관리를 수행해야한다는 특징도 가지고 있다(Cizmeci, 2005).

2.2 다중 계층 공급망 모델 정의

앞서 분석한 결과와 같이 조선 산업의 공급망은 일반적인 제조업이나 다른 프로젝트 산업의 공급망과 다른 특징을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 조선 산업의 공급망 특징을 반영하고, 이를 바탕으로 선박 건조 공정, 공간 배치, 물류 흐름을 연동하여 시뮬레이션하기 위한 다중 계층 공급망 모델을 제안한다. 조선 산업의 공급망 모델은 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층과 단위 조선소 내부 공급망 계층, 그리고 내부 공급망 계층을 구성하는 단위 구성 요소로 정의할 수 있다.

2.2.1 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층

단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층에는 조선소에 철판과 같은 원재료를 공급하는 원재료 공급자, 다양한 종류의 의장품을 공급하는 의장품 공급자, 외주 제작 업체에서 제작한 블록 형태의 중간 제품을 공급하는 중간 제품 공급자, 그리고 단위 조선소가 구성 요소로 정의되어 있다. 외부 공급망 계층의 구성 요소는 단위 조선소를 중심으로 연결되어 있으며, 원재료 공급자, 의장품 공급자, 중간 제품 공급자와 조선소 사업장은 내부 공급망과 연결할 수 있는 연결 노드를 통하여 연결되어 있다. 이 연결 노드는 조선소에 물리적으로 정의되어 있는 설비일 수도 있으며, 개념적으로 정의한 구성 요소 일 수도 있다. 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층은 Figure 10 와 같이 표현할 수 있으며, 구성 요소의 지리적 위치와 거리를 고려한 GIS 기반 이산 사건 시스템 (Discrete Event System, DES) 시뮬레이션 방법으로 발생하는 문제를 식별하고 관리할 수 있다.

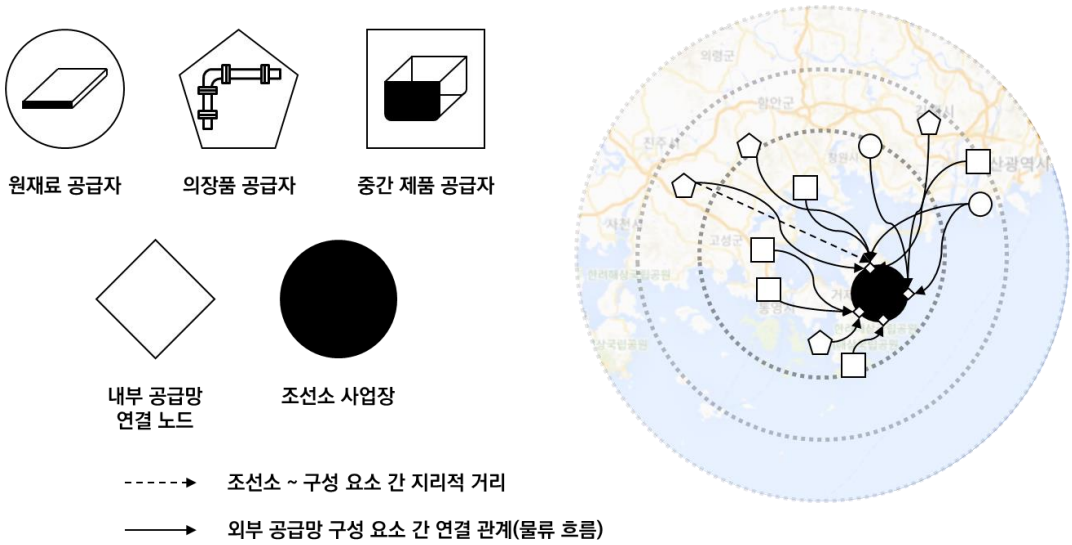


Figure 10 단위 조선소의 다중 계층 공급망 구성 요소 (사업장 외부 영역)

2.2.2 단위 조선소 내부 공급망 계층

외부 공급망 계층의 단위 조선소는 외부 공급망을 구성하고 있는 다른 구성 요소와 제품이나 정보 교환과 같은 상호 작용을 한다. 그뿐만 아니라, 단위 조선소 내부에서도 선박을 건조하기 위한 내부 공급망을 정의할 수 있다. 내부 공급망의 구성요소는 선박 건조 공정을 기준으로 정의할 수 있다. 선박 건조 공정은 실제로 원재료가 가공되고 조립되는 단위 생산 공정과 물류 흐름으로 구분할 수 있으며, 물류 흐름은 다시 이송 활동과 적치 활동으로 구분할 수 있다. 내부 공급망에서는 이러한 일련의 과정이 선박 건조 공정에 따라 Figure 11 과 같이 정의된다.

앞서 언급한 것과 같이 절단, 가공, 조립, 도장, 선행 의장, 탑재, 후행 의장 공정이 단위 생산 공정으로 정의되어 있으며, 단위 생산 공정 사이에는 물류 흐름이 정의되어 있다. 선박 건조 중에는 설비나 공간의 물리적인 제약으로 인하여 다음 공정으로 제품을 이송할 수 없는 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 해당 제품을 별도로 마련되어 있는 적치장으로 이송한다. 이를 표현하기 위하여 내부 공급망에 적치 활동을 정의하였다. 내부 공급망 원활하게 진행하기 위해서는 외부 공급망과의 연결 노드가 정의되어 있어야한다. 외부 공급망과의 연결 노드에서는 원재료인 철판을 입고하기도 하며, 외부 공급망을 구성하는 다른 공급 업체에서 공급 받은 블록이나 탑재 블록 등을 입고하기도 한다. 또한 선체를 구성하는 블록뿐만 아니라 선박의 기능을 수행하는데 필요한 각종 의장품을 외부 공급망과의 연결 노드를 통하여 입고 받는다.

앞서정의한 것과 같이 조선소 내부 공급망은 선박 건조 공정과 물류 흐름을 중심으로 정의하였다. 이를 바탕으로 조선소에서 발생하는 다양한 현상을 물리적인 제약을 고려하여 시스템의 거동을 분석하기 위해서는 적절한 시뮬레이션 방법이 필요하다. 일반적으로 제조 시스템의 생산

공정 시뮬레이션은 이산 사건 시스템으로 표현할 수 있으며, 이때 내부 공급망 모델을 공정 중심 모델링 방법으로 표현된 시뮬레이션 모델로 활용할 수 있다.

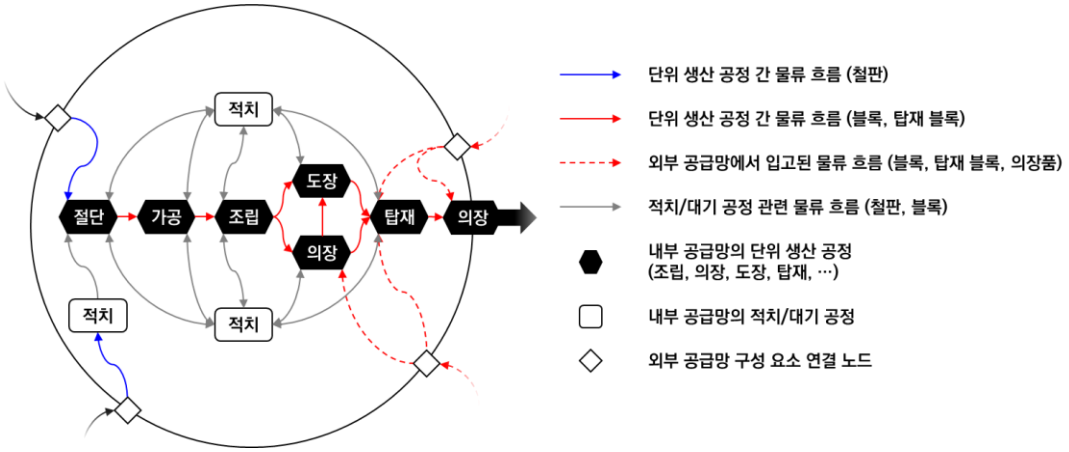


Figure 11 단위 조선소의 다중 계층 공급망 구성 요소 (사업장 내부 영역)

2.2.3 내부 공급망 단위 구성 요소

조선소 다중 계층 공급망 모델을 구성하는 가장 작은 단위는 조선소 6 대 요소 정보 모델을 이용하여 정의할 수 있다. 조선소 6 대 요소 정보 모델은 조선 생산 시스템을 구성하는 정보를 제품, 공정, 일정, 설비, 작업자, 공간으로 상세화 한 모델이다(Lee et al., 2014b). 이 모델을 이용하여 내부 공급망을 구성하는 단위 구성 요소(이하 공급망 단위 구성 요소)의 입출력 정보와 상세한 정보를 표현할 수 있다.

공급망 단위 구성 요소는 각 요소가 수행하는 공정을 이용하여 나머지 정보를 정의할 수 있다. 이때 공정은 선박 건조 공정의 단위 생산 공정이나 이송 활동, 적치 활동과 같은 물류 흐름이 될 수 있다. 공정이 결정된 공급망 단위 구성 요소는 사전에 정해진 생산 계획 정보나 후행 공정으로부터 전달 받은 주문 정보를 일정한 형태로 입력 받는다. 그리고 해당 공정이 수행되면 생산한 제품이나 공정 정보는 후행 공정에 전달된다. 제품 정보 관점에서는 투입 원재료나 선행 공정, 혹은 외부 공급망에서 전달 받은 제품을 입력 제품으로 가지며, 해당 공정에서 만들어진 산출물을 출고 제품으로 내보낸다. 그리고 사용하는 공정을 수행하는데 필요한 설비, 작업자, 공간 정보는 물리적 제약 조건으로 적용된다. Figure 12 은 내부 공급망 단위 구성 요소를 조선소 6 대 요소 정보 모델로 정의한 예시를 나타내며, Table 7 는 공급망 단위 구성 요소의 상세한 정보를 설명한다.

Table 7 공급망 단위 구성 요소 기본 정보

조선소 6 대 요소 정보 모델 구분	단위 구성 요소 정보
제품	투입 원자재, 입고 제품, 출고 제품
공정	수행 공정
일정	주문 정보 (납기 요청일, 주문량 등) 생산 정보 (납기 예정일, 진도율 등)
설비	공정 설비, 물류 설비
작업자	투입 인력 (필요 시수, 활용 가능 시수 등)
공간	사용 공간 (작업장, 적치장, 공장 등)

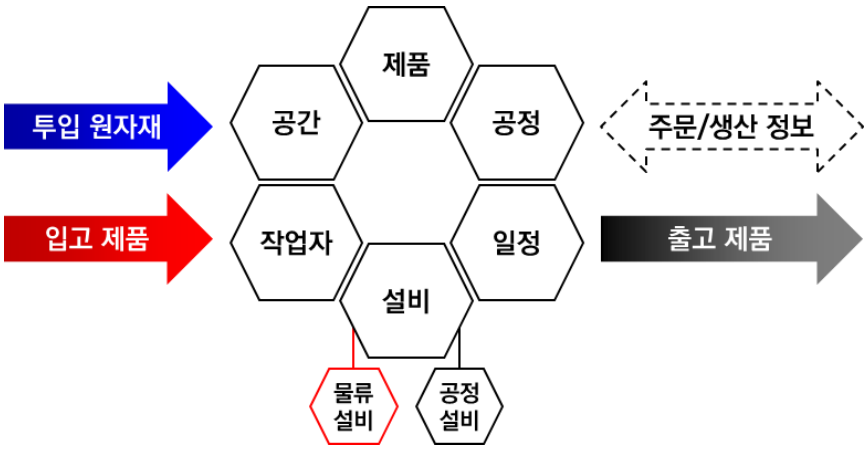


Figure 12 조선소 6 대 요소 정보 모델을 이용한 공급망 단위 구성 요소 정의

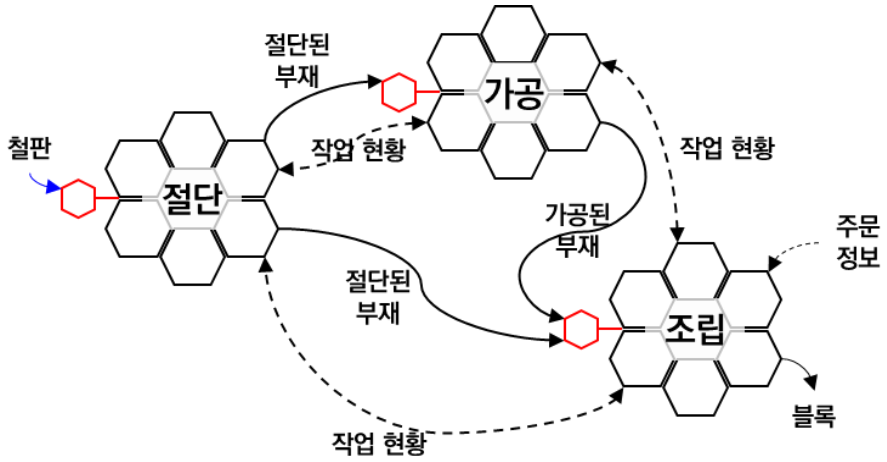


Figure 13 공급망 단위 구성 요소를 이용한 연결 관계 정의

앞서 정의한 공급망 단위 구성 요소를 이용하여 내부 공급망 계층의 구성 요소 간 연결 관계를 상세히 표현하면 Figure 13 과 같이 나타낼 수 있다. 이 모델은 조선소의 단위 생산 공정 중 절단, 가공, 조립 공정을 포함하고 있다. 절단 공정은 외부 공급망과 연결 된 노드를 통하여 원재료인 철판을 입고 받는다. 그리고 공정을 수행하는데 필요한 작업자, 공간, 설비를 이용하여 절단 공정을 수행한다. 이때 절단할 철판의 수량과 일정은 생산 계획 단계에서 결정하며, 절단 공정은 후행 공정인 가공 공정과 조립 공정에 작업 현황 정보를 전달한다. 정해진 일정에 맞추어 절단된 철판은 후행 공정으로 출고 된다. 가공 공정과 조립 공정도 유사한 형태로 진행되며, 최종적으로 조립 공정의 출고 제품으로 블록이 출고된다.

2.2.4 다중 계층 공급망 모델 계층 구조와 확장

본 연구에서는 조선 산업과 조선 생산 시스템의 특징을 고려하여 다중 계층 구조를 가진 공급망 모델을 제안하였다. 이 모델은 Figure 14와 같이 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층, 단위 조선소 내부 공급망 계층, 그리고 조선소 6 대 요소 정보 모델을 이용한 공급망 단위 구성 요소로 정의할 수 있다.

이때 공급망을 구성하는 단위 구성 요소를 상세화하여 계층을 추가할 수 있다. 이러한 방향으로 공급망 모델이 확장되는 것을 수직 방향 확장으로 정의하였으며, 수직 방향 확장 시에는 조선소 6 대 요소 정보 모델을 기반으로 상세화를 수행한다. 그리고 공급망에 참여하는 이해 당사자를 추가하는 것을 수평 방향 확장으로 정의하였다. 이를 외부 공급망 계층에 적용하면, 외부 공급망 계층에서 다루고자 하는 구성 요소의 범위를 확장하여 더 많은 이해 당사자를 해당 조선소의 공급망 구성 요소로 추가할 수 있다.

이처럼 다중 계층 구조를 가진 형태로 정의한 조선소 공급망 모델은 조선소 6 대 요소 정보 모델을 기반으로 수직 방향 확장이 용이하며, 이해 당사자가 증가한 경우에는 수평 방향으로 확장을 하여 모델에 반영할 수 있다.

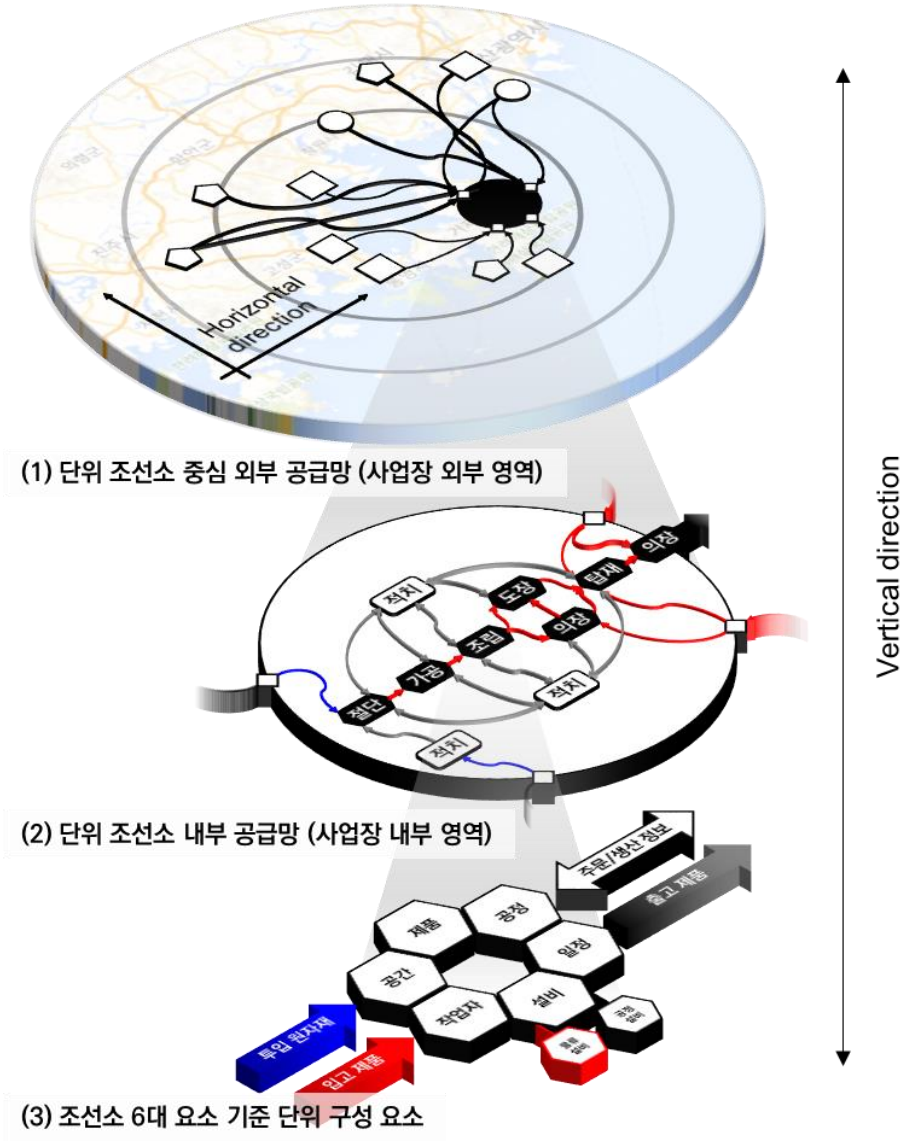


Figure 14 조선소 다중 계층 공급망 모델의 계층 구조와 확장

제 3 장

조선소 특성을 고려한
물류 시뮬레이션 시스템

3.1 시스템 구성 요소 정의

3.1.1 조선소 시뮬레이션 프레임워크

조선 생산 시스템과 같이 복잡한 시스템을 모사하고 다양한 전략에 따른 시스템의 거동을 시뮬레이션 하기 위해서는 체계적인 절차와 일관된 방법을 포함하는 프레임워크가 필요하다. 이를 위하여 시뮬레이션 수행 목표, 시뮬레이션 평가 지표, 시뮬레이션 플랫폼, 조선소 6 대 요소 정보 모델로 구성된 조선소 시뮬레이션 프레임워크가 제안된 바 있다 (Woo et al., 2016).

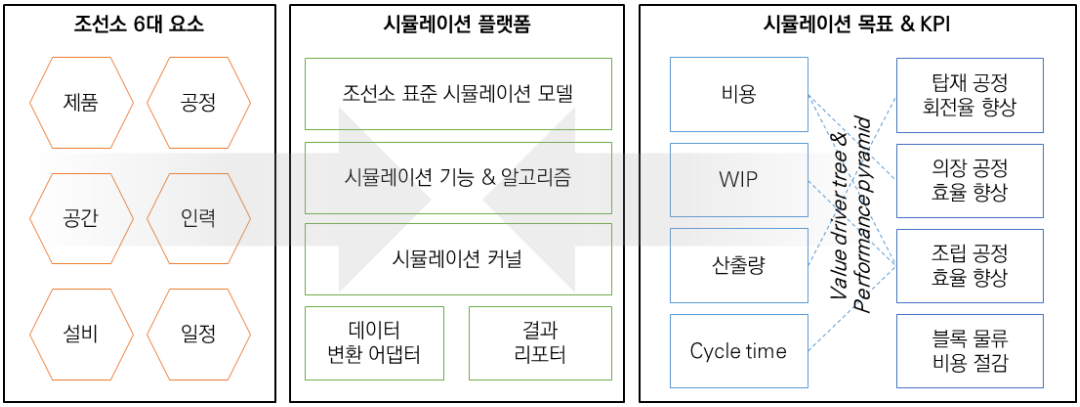


Figure 15 조선소 시뮬레이션 프레임워크 기본 구조 (Woo et al., 2016)

조선소 시뮬레이션 프레임워크는 Figure 15 과 같은 구조를 가지고 있다. 시뮬레이션을 통하여 개선하고자하는 목표를 정하고 나면 가치 동인 나무(Value Drive Tree, VDT)와 성과 피라미드(Performance Pyramid)를 이용하여 목표를 정량적으로 표현할 수 있는 평가 지표로 구체화 한다. 이때 사용되는 평가 지표는 생산 관리 시스템이나 현장에서 사용하는 평가 지표를 사용할 수도 있다. 그리고 시뮬레이션 시스템을 구축하고 프로젝트를 진행하는데 필요한 다양한 정보는 조선소의 다양한 정보를 제품, 공정, 공간, 인력, 설비, 일정 정보로 구분한 조선소 6 대 요소 정보 모델을 이용하여 정의한다.

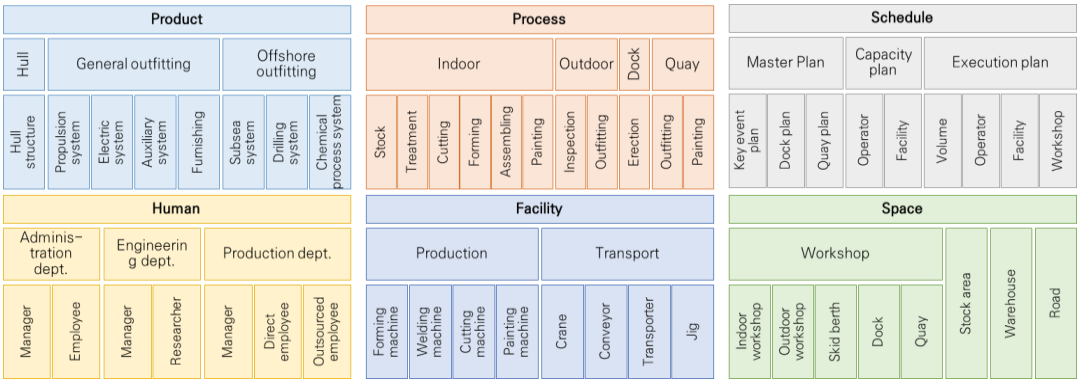


Figure 16 조선소 6 대 요소 정보 모델 상세 구성 요소 (Woo et al., 2016)

조선소 6 대 요소 정보 모델은 기존의 제조 시스템 시뮬레이션에서 사용하던 정보 모델을 개선한 것이다. 일반적인 제조 시스템의 시뮬레이션 시스템을 구축할 때에는 시스템을 구성하고 있는 제품(product), 공정(process), 자원(resource) 정보를 PPR 정보 모델로 표현하였다. 그리고 이 정보 모델은 시뮬레이션 시스템에서 일정(schedule) 정보를 고려할 수 있도록 일정 정보가 추가되어 PPR-S 정보 모델로 개선되었다. 조선

소 6 대 요소 정보 모델에서는 조선 산업과 선박 건조 공정, 조선 생산 시스템의 특성을 고려하여 자원 정보를 인력, 설비, 공간으로 상세화하였으며, 각각의 구성 요소는 Figure 16 과 같이 상세화 할 수 있다.

조선소 시뮬레이션 프레임워크를 구성하는 요소 중 시뮬레이션 플랫폼은 조선소 표준 시뮬레이션 모델 라이브러리, 시뮬레이션 기능과 알고리즘 라이브러리, 시뮬레이션 커널, 데이터 변환 어댑터, 결과 리포터를 포함하고 있다. 시뮬레이션 플랫폼은 구축하고자 하는 시스템을 알맞게 구축할 수 있도록 지원한다. 이때 조선소 표준 시뮬레이션 모델 라이브러리에는 조선 생산 시스템의 전형적인 구성 요소가 공정 중심 시뮬레이션 모델 형태로 구축되어 있다. 공정 중심 시뮬레이션 모델은 대상 시스템을 공정, 공정 간 연결 관계, 제약 조건으로 표현한 모델이며, 자세한 내용은 이후 내용에서 서술하도록 한다.

시뮬레이션 시스템의 기능은 시스템에서 정량적인 값으로 표현해야 할 지표를 도출하기 위한 일련의 방법을 의미하며, 시뮬레이션 시스템의 알고리즘은 시뮬레이션 수행 시 발생하는 의사 결정 규칙이나 절차를 의미한다. 일반적으로 시뮬레이션 시스템의 기능은 조선소 시뮬레이션 프레임워크에서 선정한 지표를 계산하기 위한 일련의 방법이 되며, 알고리즘은 공간 활용 전략, 제품 분배 규칙, 이송 설비 할당 규칙 등이 해당된다. 조선소 시뮬레이션 프레임워크에서는 이산 사건 시스템 시뮬레이션을 기반으로 한 커널을 활용하고 있으며, 조선소 기간 시스템과 연계하여 필요한 정보를 유연하게 변환할 수 있도록 데이터 변환 어댑터를 포함하고 있다. 마지막으로 결과 리포터는 대상 조선소의 특징에 맞게 시뮬레이션 결과를 가공하는 역할을 맡는다.

조선소 시뮬레이션 프레임워크를 이용하여 시뮬레이션 시스템을 구축하는 절차는 Figure 17 과 같이 간단하게 표현할 수 있다. 먼저 시뮬레

이션 프로젝트를 수행할 대상과 목표를 설정하고, 이와 관련된 평가 지표를 정의한다. 다음으로 조선소 표준 시뮬레이션 모델 라이브러리에서 대상 시스템을 모사할 수 있는 모델을 선정하고 평가 지표를 산출하기 위한 기능과 알고리즘을 구현한다. 마지막으로 시뮬레이션 시스템에서 필요한 정보는 6 대 요소 정보 모델을 이용하여 표현할 수 있다.

Figure 17 조선소 시뮬레이션 시스템 구축 절차 (Woo et al., 2016)

3.1.2 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 분석

조선소 시뮬레이션 프레임워크를 이용하여 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 정의하기 앞서 조선소 물류 시뮬레이션 시스템의 특징을 분석하였다. 조선소에서는 생산 계획을 수립할 때 대상으로 하는 제품과 기간을 고려하여 계층 구조를 가진 생산 계획을 수립한다. 대부분의 조선소에서는 하나의 프로젝트를 기준으로 가장 높은 단계의 생산 계획을 수립하며, 이를 선표 계획이라 한다. 선표 계획 단계에서는 선박 건조 공정의 주요 절점과 조선 생산 시스템의 주요 설비인 도크나 선대의 일정만 고려하는 것이 일반적이다. 이때 선박 건조 공정의 주요 절점은 절단 공정이 시작하는 시점(Steel Cutting, SC), 최초의 탑재 블록이 도크나 선대에 탑재되는 시점(Keel Laying, KL), 선박이 진수되는 시점(Launching, LC), 최종 제품인 선박이 고객에게 인도되는 시점(Delivery, DL)으로 구분하여 정의한다(Figure 18).

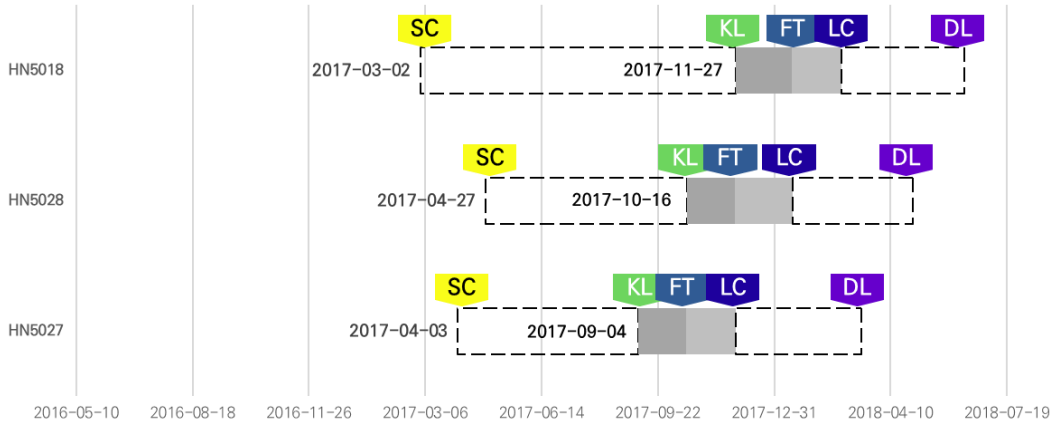


Figure 18 선표 계획과 선박 건조 공정의 주요 절점

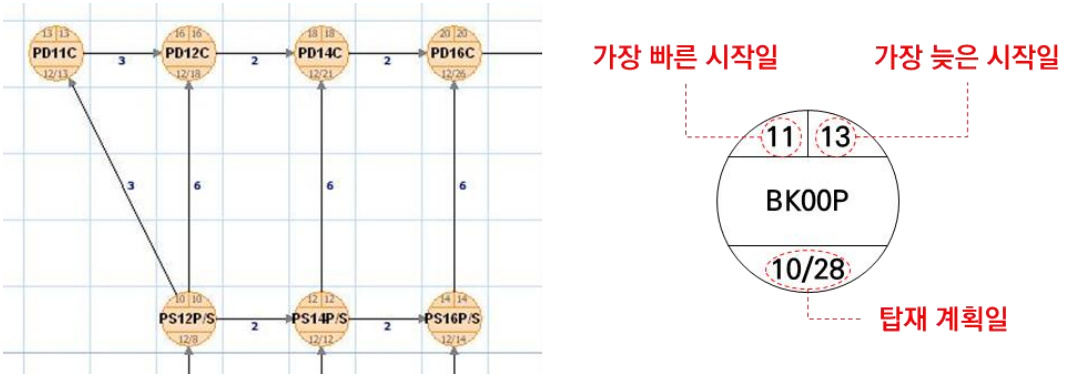


Figure 19 탑재 네트워크 계획 사례와 탑재 이벤트 기본 구성 요소

탑재 공정은 탑재 블록을 도크나 선대에서 최종적으로 조립하는 공정을 의미하는데, 이는 선박 건조 공정에만 존재하는 특수한 공정이며(Tokola et al., 2013), 선박 건조 공정의 주요 병목 공정이다(Yoon et al., 2006). 조선소에서는 탑재 공정을 관리하기 위하여 탑재 공정을 네트워크 형태로 연결한 탑재 네트워크 계획을 활용한다(Figure 19).

탑재 네트워크 계획에서는 선표 계획 단계에서 결정된 선박의 주요 절점을 제약 조건으로 하여 탑재 공정 계획을 수립한다. 이때 과거의 실적 정보, 탑재 공법 등을 고려하여 탑재 순서와 간격을 결정한다. 하지만, 실제로 탑재 네트워크 계획을 실행할 때에는 자원의 물리적 제약이나 후행 공정의 준비 상황에 따라 일정이 지연되거나 계획이 수정되는 경우가 다수 발생하고 있다(Lim et al., 2016). 탑재 공정은 이와 같이 여러가지 상황에 따라 변동성이 높으며, 다양한 상황 별 결과 분석이 필요하다. 이때, 선박 건조 공정을 관리하는 생산 계획이 계층 구조를 가지고 있고, 상위 생산 계획이 하위 생산 계획의 제약 조건으로 작용하는 형태를 가지고 있기 때문에 계층 구조를 가진 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 유리하다.

또한 조선 산업과 선박 건조 공정에는 다양한 원인에 의하여 불확실성과 변동성이 내재되어 있다. 조선 산업은 대표적인 ETO 산업으로 설계와 생산 공정이 동시에 진행된다는 특성을 가지고 있다. 이로 인하여 설계 변경으로 인한 예측하지 못한 추가 작업 물량이 발생할 수 있고, 추가 작업 물량 발생 시, 다른 생산 공정과 물류 흐름에도 영향을 미칠 수 있다. 그리고 앞서 살펴 본 것과 같이 통합 생산 계획이 아닌 계층 구조를 가진 단계적 생산 계획을 수립하여 생산 공정을 관리하고 있기 때문에 상위 단계의 생산 계획은 실제 생산 현장의 상황을 반영하지 못하고 개략적인 계획이 수립된다. 따라서 생산 계획과 실제 생산 공정의 실적 간 차이가 발생한다. 특히 넓은 범위의 상위 단계의 생산 계획을 수립할 때에는 상세한 단계의 단위 생산 공정이나 물류 흐름까지 통합하여 관리할 수 없다. 그 밖에도 조선 산업은 대표적인 노동 집약적 산업으로 인적 요소의 영향에 따른 불확실성과 변동성이 존재한다.

본 연구에서 중점적으로 다루고 있는 물류 흐름 관점에서 불확실성과 변동성의 원인을 분석해보면, 조선 생산 시스템의 물리적 특성으로 인한 불확실성과 변동성을 고려해볼 수 있다. 조선 산업은 대표적인 대규모 프로젝트 산업으로 생산하는 제품의 크기가 크고, 작업 공간이 매우 넓은 특성을 가지고 있다. 이러한 특성 때문에 생산 단계에서 고려하지 못했던 다양한 종류의 물리적인 제약 조건을 실제 생산 공정을 실행할 때 고려해야한다. 하지만 생산 현장에서는 모든 상황을 고려하여 최적의 해를 도출할 수 없기 때문에 주로 합의된 규칙이나 작업자의 경험을 바탕으로 문제를 해결한다. 이러한 점은 공간의 물리적 제약에 따른 대표적인 내재된 불확실성과 변동성으로 볼 수 있다.

탑재 네트워크 계획과 탑재 공정에 대하여 공간의 물리적 제약 관점에서 분석하면 다음과 같다. 탑재 네트워크 계획을 수립하고 이를 실행할 때에는 네트워크 상에서 여유 일정이 존재하지 않는 주 경로(critical path)를 파악하여 탑재 공정을 관리한다(Varghese and Yoon, 2005). 주 경로에 해당하는 공정이 지연되는 경우에는 전체 일정이 지연될 수 있으며, 이러한 일이 발생하지 않도록 생산 현장에서는 탑재 블록 준비율, 사외 탑재 블록의 물류 현황, 탑재 블록의 적치장 배치 현황 등을 고려하여 탑재 공정을 관리해야한다.

블록 코드	선행 공정	제작처
B1	-	사내
B2	B1	사내
B3	B1	사내
B4	B1, B3	사외 A
B5	B2, B4	사내
B6	B3	사외 A
B7	B3, B4, B6	사내
B8	B5, B7	사외 B
B9	B6	사내
B10	B7, B8, B9	사내

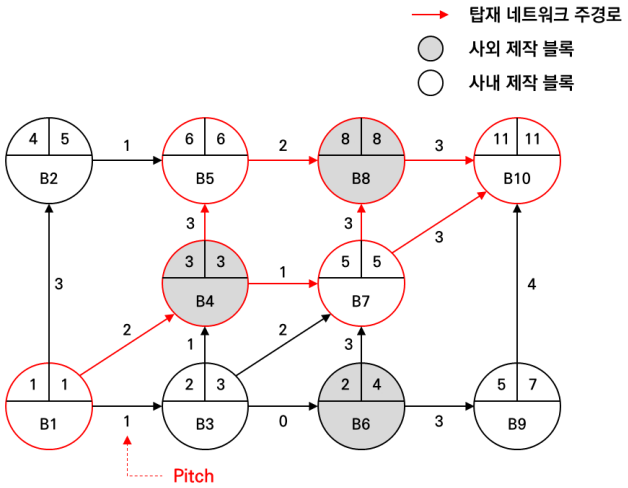


Figure 20 탑재 네트워크 계획 입력 정보와 주 경로 식별 결과

Figure 20 은 탑재 네트워크 계획에서 공간의 물리적 제약을 고려한 시뮬레이션의 필요성을 강조하기 위하여 가정한 예제의 입력 정보와 주 경로 식별 결과를 나타낸다. 탑재 네트워크 계획을 수립하기 위해서는 선행 공정 정보와 탑재 공정 사이의 최소 작업 기간 정보가 필요하며, 이를 바탕으로 탑재 네트워크를 생성하고 여유 일정이 존재하지 않는

주 경로를 식별할 수 있다. 이 예제에서는 사외에서 제작되는 탑재 블록을 별도로 표시하였다.

블록 코드	제작처	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Day 8	Day 9	Day 10	Day 11
B1	사내	탑재 계획일										
B2	사내				탑재 가능일							
B3	사내		탑재 가능일									
B4	사외			탑재 계획일								
B5	사내						탑재 계획일					
B6	사외		탑재 가능일									
B7	사내					탑재 계획일						
B8	사외								탑재 계획일			
B9	사내					탑재 가능일						
B10	사내											탑재 계획일

Figure 21 탑재 블록 별 탑재 가능일 식별 결과

앞서 가정한 입력 정보에 따라 만들어진 탑재 네트워크 계획 정보를 이용하여 날짜 별 탑재 계획일과 탑재 가능일을 표시하면 Figure 21 과 같이 나타낼 수 있다. 주 경로에 위치하는 탑재 블록은 일정에 여유가 없기 때문에 탑재 가능일이 하루로 표시되어 있으며, 나머지 탑재 블록은 여유 일정이 있는 것을 확인할 수 있다. 이때, 탑재 네트워크가 계획이 지연되지 않기 위해서는 주 경로에 위치한 탑재 블록이 계획 당일에 작업이 가능한 지를 고려해야하며, 주 경로에 위치하지 않은 탑재 블록에 대해서도 탑재 가능일 기간 내에 작업이 가능한 지를 고려해야한다.

블록 코드	제작처	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Day 8	Day 9	Day 10	Day 11
B1	사내	탑재 계획일										
B2	사내	사내 적치 기간			탑재 가능일							
B3	사내	공정 완료일	탑재 가능일									
B4	사외		사내 입고일	탑재 계획일								
B5	사내	공정 완료일	사내 적치 기간				탑재 계획일					
B6	사외	사내 입고일	탑재 가능일									
B7	사내		공정 완료일	사내 적치 기간		탑재 계획일						
B8	사외				사내 입고일	사내 적치 기간			탑재 계획일			
B9	사내	공정 완료일	사내 적치 기간			탑재 가능일						
B10	사내							공정 완료일	사내 적치 기간			탑재 계획일

Figure 22 물리적인 제약 조건을 고려한 탑재 블록 별 탑재 가능일 식별 결과

하지만, 실제로 탑재 공정을 실행할 때에는 물리적인 제약 조건을 고려한 이송 설비나 공간 활용 상황을 고려해야한다. Figure 22 에 나타낸 것과 같이 사외 입고 블록의 사내 입고 후 적치 기간 내 적치 공간 활용 가능 여부를 고려해야 하며, 적치 공간이 물리적으로 부족하여 생산 계획에 수립한 일정대로 공정을 진행하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 본 예제는 탑재 공정과 관련된 공간의 물리적 제약만 고려하였지만, 선박 건조 공정 중에는 다양한 물리적 제약이 발생할 수 있다. 따라서 조선 생산 시스템의 정교한 분석을 위해서는 공간의 물리적 제약까지 고려한 물류 시뮬레이션 시스템이 필요하다.

3.1.3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 정의

본 연구에서는 앞서 분석한 특징들을 반영하여 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 정의하였다. 이 시스템은 조선소 시뮬레이션 프레임워크를 기반으로 하고 있다. 본 연구에서 제안하는 시스템에서는 선박 건조 공정의 특징을 고려하여 공정 중심 모델링 방법을 적용하고, 단위 생산 공정과 물류 흐름을 모두 표현할 수 있도록 물류 토큰 개념을 추가하였다. 그리고 2 장에서 정의한 다중 계층 공급망 모델을 이용하여 하나의 모델로 다양한 문제를 해결할 수 있도록 하였으며, 입력 정보에 따라 시뮬레이션 수행 경로가 달라지는 동적 해상도 시뮬레이션 방법을 적용하였다. 마지막으로 공간의 물리적 제약을 고려한 효율적인 공간 활용 방법을 정의하기 위하여 조선소 공간 배치 문제를 분류하고 공간 배치 문제에 따른 세부적인 구성 요소를 정의하였다.

본 연구에서 제안하는 시스템은 조선 산업의 공급망 특징을 고려한 물류 시뮬레이션 시스템을 구축하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 달성하기 위한 지표와 시뮬레이션 시스템을 Figure 23와 같이 정의하였다. 단위 생산 공정 뿐만 아니라 물류 흐름까지 통합하여 전사적으로 비용을 줄이는 것과 효율적인 공간 활용 방법을 적용하여 공간 활용도를 높이는 것, 물류 설비나 흐름의 부하를 평준화하는 것을 주요 목표로 선정하였다. 시뮬레이션 시스템은 다중 계층 공급망 모델을 시뮬레이션 모델로 활용하며, 동적 해상도 시뮬레이션 방법, 공정 중심 모델링 방법, 공간 활용 방법 등을 주요 알고리즘으로 정의하였다. 각 요소에 대한 설명은 다음 절에서 다루도록 한다.

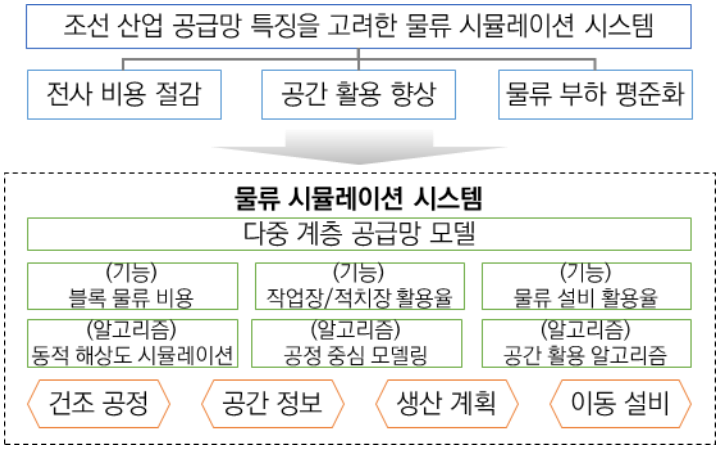


Figure 23 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 목표 및 구조도

3.1.3.1 시뮬레이션 모델링 방법: 공정 중심 모델링 방법

선박 건조 공정은 단위 생산 공정과 물류 흐름으로 구분할 수 있으며, 물류 흐름은 이송 활동과 적치 활동으로 구분할 수 있다. 선박 건조 공정은 일부 공정을 제외하고 특정 공정에 사용하는 설비가 정해져 있지 않다. 예를 들면, 조립 공정이 진행되는 조립 공장에서는 크레인이 다양한 용도로 활용되며, 용접 설비 역시 특정 공정에 지정하여 사용하는 것이 아니라 다른 생산 공정과 설비를 공유하여 사용하는 특징을 가지고 있다. 또한 각각의 단위 생산 공정은 특정 작업장에서 작업을 수행하는 것이 아니라, 범용적으로 활용할 수 있는 공간에서 작업을 수행한다. 따라서 이러한 특성으로 인하여 기존의 대부분의 상용 시뮬레이션 소프트웨어에서 지원하는 설비 중심 모델링 방법으로 선박 건조 공정을 모델링하기에는 어려운 점이 있다. 이러한 점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 공정 중심 모델링 방법을 제안하였다.

공정 중심 모델링 방법은 선박 건조 공정을 선행 공정과 후행 공정의 관계로 표현하고, 각 공정에 상세한 로직을 입력하여 시뮬레이션 모델을 정의하는 방법이다. Figure 24 과 같이 상세 로직은 승인, 입고, 작업, 출고, 이송으로 구분되어 있으며, 제품과 작업 시 사용하는 설비를 제약조건으로 고려할 수 있다. 이와 같은 모델링 방법은 Figure 25 과 같이 공정을 중심으로 관리되는 선박 건조 계획과 공정 정보를 표현하는데 용이하다.

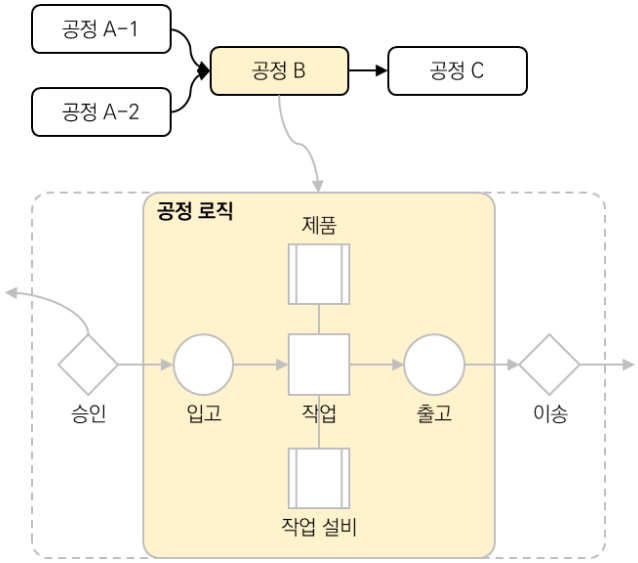
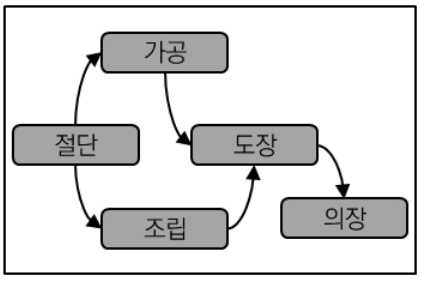


Figure 24 조선소 시뮬레이션 시스템을 위한 공정 중심 모델링 방법

액티비티	제품	시작일	종료일	Shop
P0010	101	2016-06-01	2016-06-06	#P01
B0011	10A	2016-06-15	2016-06-21	#B01
P0012	102	2016-06-03	2016-06-06	#P02
A0012	11A	2016-06-01	2016-06-06	#A01

선박 건조 계획

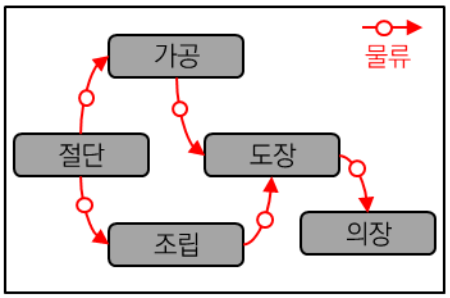


선박 건조 공정

Figure 25 선박 건조 계획 및 선박 건조 공정 기본 구조

액티비티	제품	시작일	종료일	Shop
P0010	101	2016-06-01	2016-06-06	#P01
B0011	10A	2016-06-15	2016-06-21	#B01
P0012	102	2016-06-03	2016-06-06	#P02
A0012	11A	2016-06-01	2016-06-06	#A01

선박 건조 계획



선박 건조 공정과 물류 흐름

Figure 26 선박 건조 계획 및 물류 흐름을 고려한 선박 건조 공정 기본 구조

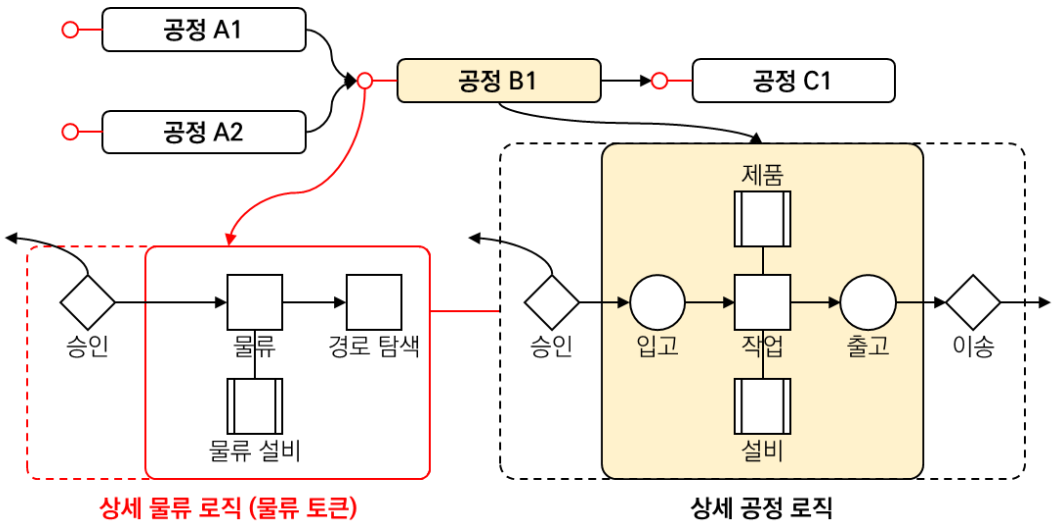


Figure 27 물류 토큰을 이용한 공정 중심 모델링 방법 개선

하지만, 실제 선박 건조 공정을 진행할 때에는 Figure 26 와 같이 공정과 공정 사이에 물류 흐름이 존재하며, 이는 단위 생산 공정의 네트워크 만으로는 표현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 Figure 27 과 같이 공정 중심 모델링 방법에 물류 토큰을 추가하여 물류 흐름을 식별하고 모델링할 수 있도록 하였다. 물류 토큰은 단위 생산 공정의 앞에 위치하며, 상세 로직이 승인, 물류, 경로 탐색으로 구분된다.

3.1.3.2 시뮬레이션 수행 방법: 동적 해상도 시뮬레이션 방법

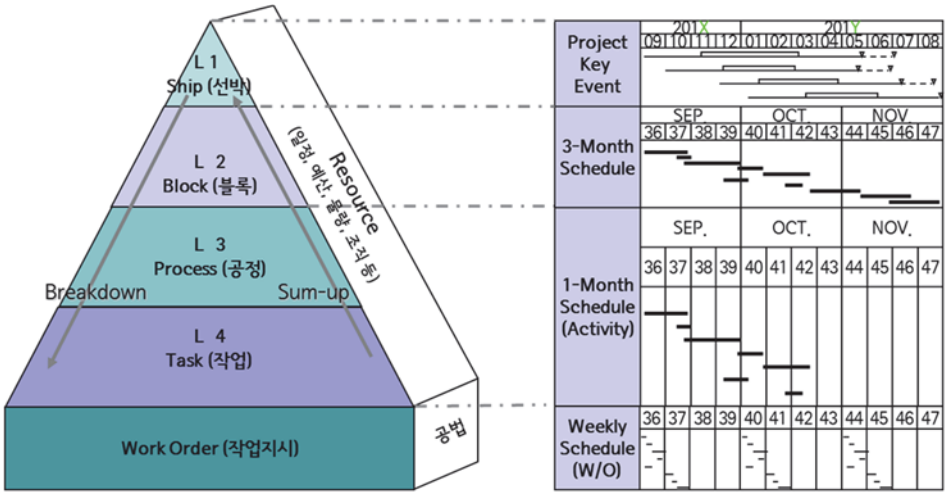


Figure 28 계층 구조를 가진 조선소 작업 분류 체계 (Lee, 2013)

선박 공정의 작업 분류 체계와 생산 계획은 앞서 언급한 것과 같이 계획 대상과 기간에 따라 계층 구조를 가지고 있다(Figure 28). 따라서 생산 계획을 검증하고 확인하기 위한 시뮬레이션 모델도 계층 구조를 가진 네트워크 모델로 구성하는 것이 유리하다. 이때 하나의 네트워크 모델에서도 특정 부분에 대해서는 시뮬레이션을 수행하기에 확보한 데이터가 충분하지 않을 수 있다. 이러한 상황에서도 시뮬레이션이 중단되지 않고 수행할 수 있도록 본 연구에서는 입력 데이터의 상세한 정도에 따라 시뮬레이션 경로가 동적으로 변경될 수 있도록 하였고, 이를 동적 해상도 시뮬레이션 방법으로 정의하였다. 이 방법을 이용하면 계층 구조를 가진 하나의 모델을 여러가지 문제를 해결하는데 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

예를 들어, Figure 29 와 같이 정의되어 있는 선표 계획과 기준 계획을 시뮬레이션하기 위하여 기존에는 별도의 시뮬레이션 모델을 만들어서 결과를 도출하였다. 하지만 본 연구에서 제안한 동적 해상도 시뮬레이션 방법을 이용하면, Figure 30 과 같이 시뮬레이션 입력 데이터의 수준에 따라 동일한 시뮬레이션 모델을 이용하여 사용자가 원하는 단계의 결과를 확인할 수 있다.

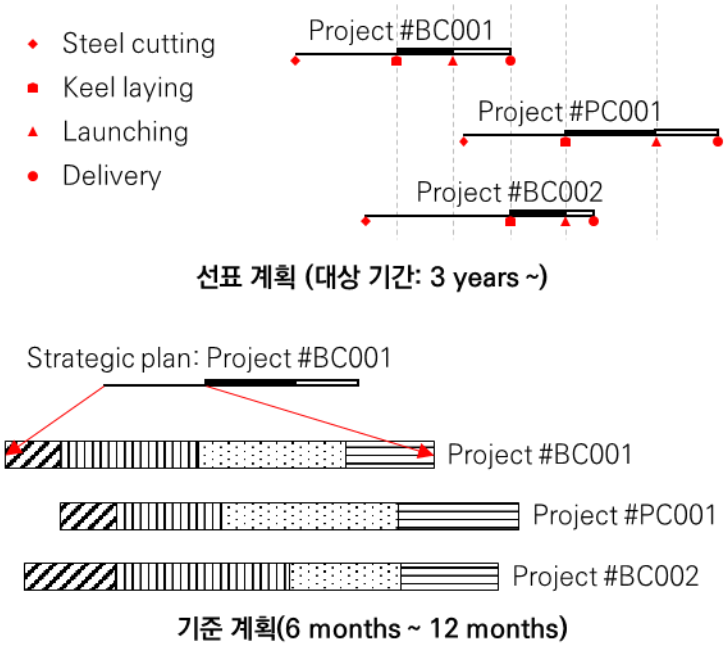


Figure 29 계층 구조를 가진 조선소 생산 계획 데이터

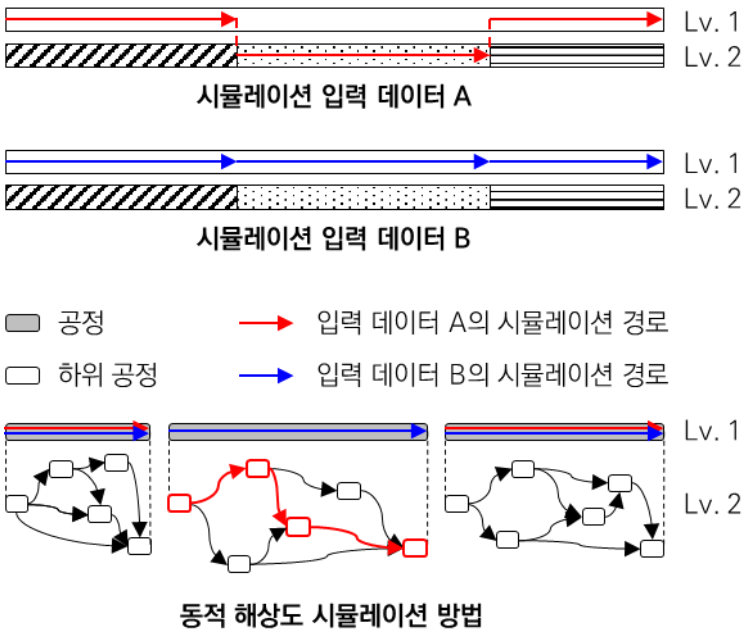


Figure 30 시뮬레이션 입력 데이터 상황에 따른 동적 해상도 시뮬레이션 방법

3.1.3.3 효율적 공간 활용 방법[1]

본 연구에서는 선박 건조 공정 중 나타나는 다양한 공간 배치 문제에 대하여 효율적인 공간 활용 방법을 정의하기 위하여 조선소 공간 배치 문제를 조선소 6 대 요소 정보 모델을 기준으로 분류하였다(Figure 31). 조선소 공간 배치 문제는 배치 대상(제품), 배치 영역(공정, 공간), 배치 알고리즘, 평가 지표를 기본 요소로 가진다. 이때 배치 대상은 제품의 조립 단계에 따라 부재, 조립 블록, 선행탑재 블록, 선박 등으로 정의할 수 있으며, 배치 영역은 크게 적치장과 작업장으로 구분할 수 있다. 그리고 작업장은 수행하는 공정에 따라 다시 상세화 할 수 있다.

공간 배치 문제를 해결하기 위한 알고리즘은 배치 순서를 결정하는 알고리즘과 배치 위치를 결정하는 알고리즘으로 구분할 수 있는데, BLF(Bottom-Left-Fill) 알고리즘을 비롯한 휴리스틱 알고리즘은 배치 위치를 결정하는 알고리즘으로 분류할 수 있다. 그리고 탐욕 알고리즘(greedy algorithm)이나 다양한 종류의 조합 최적화 알고리즘 등은 배치 순서와 위치를 모두 고려할 수 있다. 마지막으로 배치 결과를 평가하는 지표는 특정 시점의 배치 현황을 평가하기 위한 평가 지표와 전체 시뮬레이션 기간 동안 공간을 활용한 정도를 평가하기 위한 평가 지표로 구분할 수 있다.

[1] 이 절의 내용은 Jeong et al. (2018) 논문의 내용을 요약하여 다시 정리하였음.

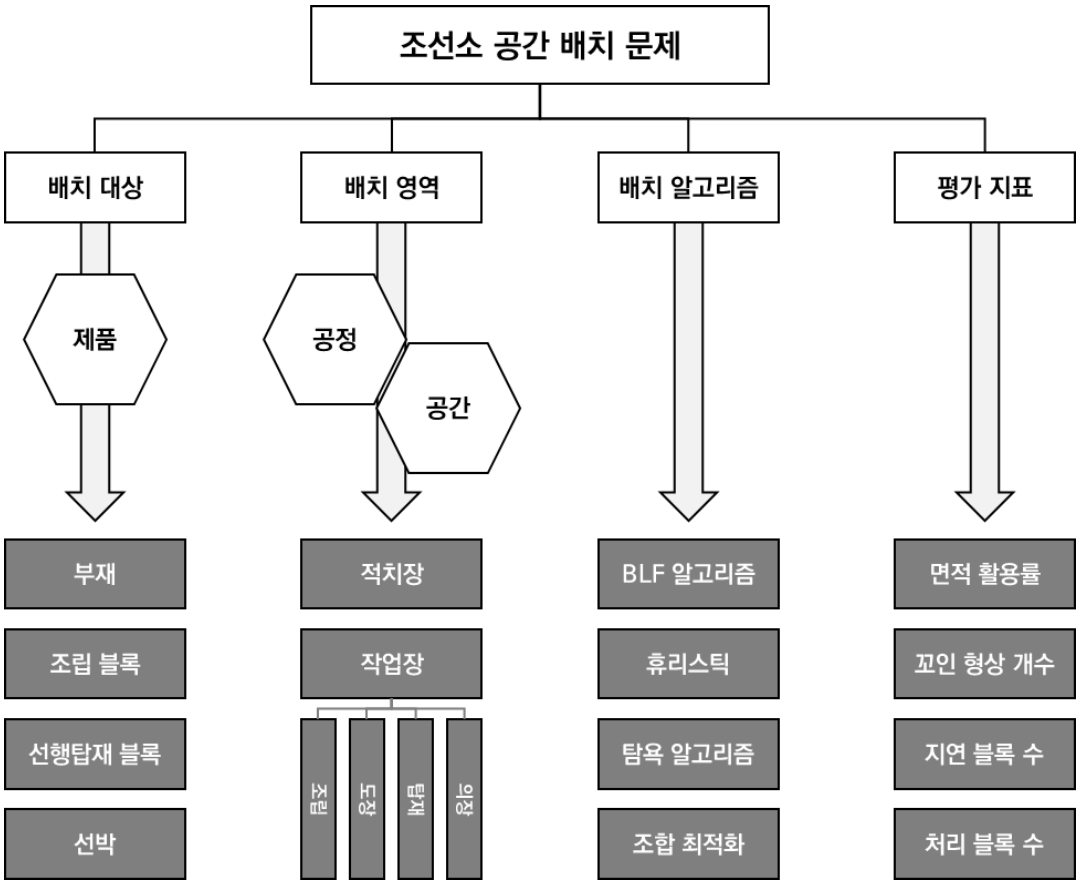


Figure 31 조선소 공간 배치 문제의 속성 분석

앞서 정의한 분류 방법을 이용하여 선박 건조 공정 중 나타내는 다양한 공간 배치 문제를 분석하였다(Figure 32). 공정, 공간, 제품을 기준으로 조선소 공간 배치 문제를 분류할 수 있으며, 공정은 절단, 조립, 탑재, 의장, 적치로 한정하였다. 그리고 공간은 작업장과 적치장으로 구분하였으며, 공간 배치 문제에 투입되는 제품은 강재, 부재, 조립 블록, 선행탑재 블록, 선박으로 구분하였다. 이러한 요소의 조합을 통하여 네스팅 문제(강재, 절단 작업장), 부재 배치 문제(부재, 조립 작업장), 블록 배치 문제(조립 블록, 조립/의장 작업장), 도크 배치 문제(선행탑재/선박, 탑재 작업장), 선행 탑재장 배치 문제(선행탑재 블록, 의장 작업장), 안벽 배치 문제(선박, 의장 작업장) 등을 정의할 수 있으며, 각각의 문제의 특성에 맞는 배치 알고리즘과 평가 지표를 상세화하여 분석할 수 있다. 본 연구에서는 주요 병목 공정인 탑재 공정에 영향을 주는 선행 탑재장 배치 문제를 중점적으로 분석하였다.

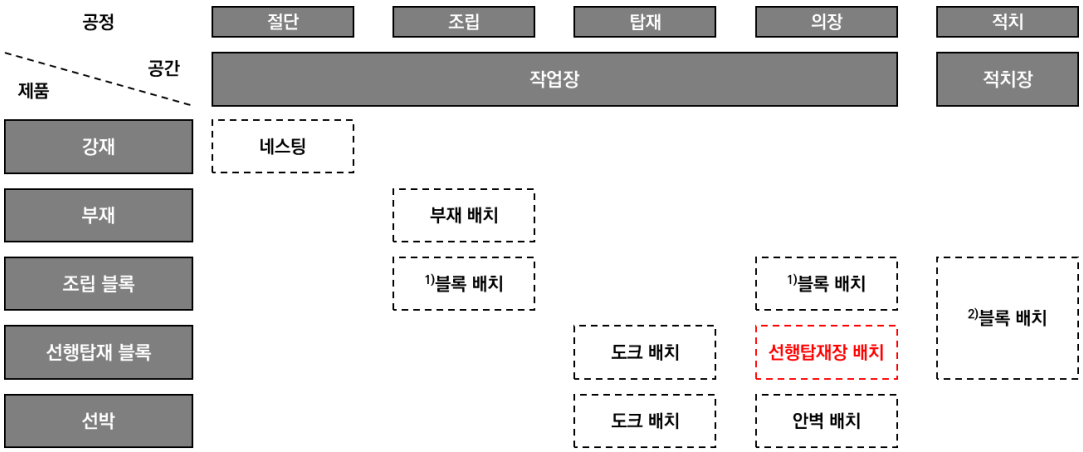


Figure 32 조선소 공간 배치 문제 정의 결과

선행 탑재장 배치 문제는 다른 공간 배치 문제에 비하여 배치 영역 대비 배치 대상의 면적이 넓은 특징을 가지고 있다. 이러한 경우에는 배치 대상의 위치에 따라 공간 배치 결과가 크게 개선될 수 있다는 특징을 가지고 있다. 공간 배치 결과를 개선하기 위해서는 새로 투입되는 배치 대상을 배치할 영역을 확보해야하기 때문에, 배치 대상이 점유하지 않은 영역의 형상을 최대한 단순하게 유지하는 방법을 적용해야한다. 본 연구에서는 이를 위하여 꼬인 형상(twist shape)의 개수를 평가 지표로 활용하였다. 꼬인 형상의 개수는 Figure 33 와 같이 배치 대상이 점유하지 않은 영역을 나눌 수 있는 최소한의 직사각형 수를 의미하며, 꼬인 형상의 개수가 작을수록 배치 대상이 점유하지 않은 영역이 최대한 단순한 형상으로 유지된다는 특징이 연구된 바 있다(Flack, 2011).

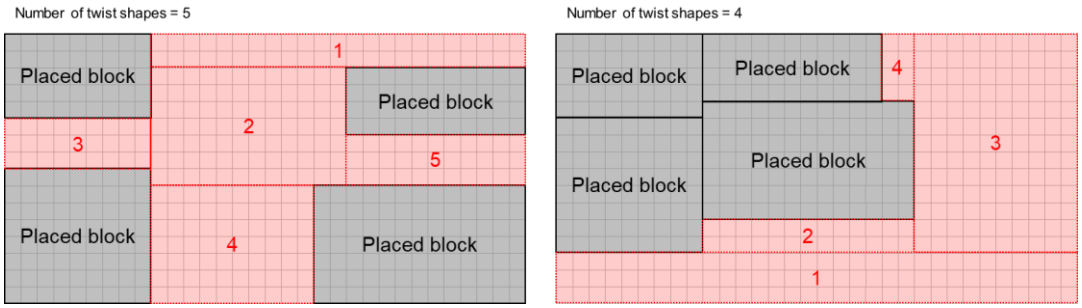


Figure 33 미배치 공간의 형상에 따른 꼬인 형상의 개수 비교 결과

그리고 본 연구에서는 선행 탑재장 배치 문제의 배치 위치를 결정하기 위한 방법으로 탐욕 알고리즘을 기반으로 한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 대상으로 하고 있는 공간 배치 시뮬레이션에서는 배치 영역에 배치 대상이 투입되고 출고되는 과정이 반복되기 때문에 시간이 흐름에 따라 배치 현황이 지속적으로 변경된다. 이처럼 시간

에 따라 배치 현황이 변경되는 경우에는 최적의 공간 배치 해를 찾기 위하여 고려해야할 변수가 매우 많고, 모든 변수를 고려한 최적해를 도출하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 배치 대상과 영역의 형상을 단순화하고, 고려하는 변수를 제한하여 문제를 단순화 하였다. 또한 엄밀한 최적해를 찾는 알고리즘이 아니라 현 시점에서 가장 우수한 대안을 선택하는 탐욕 알고리즘을 이용하여 공간 배치를 수행하였다. 알고리즘의 성능을 향상시키기 위하여 합리적인 가정을 통해 배치 가능한 후보 위치를 선별하였으며, 각 후보 위치에 대하여 목적 함수 값을 계산하였다. 복수의 후보 위치 중 가장 평가 결과가 우수한 위치에 배치 대상을 배치하였으며, 이러한 과정을 모든 배치 대상이 배치 될 때까지 반복하였다.

본 논문에서 제안하는 탐욕 알고리즘 기반의 배치 알고리즘은 시간의 흐름을 고려하고 있으며, Figure 34 과 같이 크게 두 단계로 이루어진다. 모든 계획 기간에 대하여 해당 날짜에 출고되는 배치 대상을 탐색하여 배치 영역에서 제거하는 단계와 해당 날짜에 입고되는 대상을 탐색하여 위치를 결정하는 단계로 나누어진다. 제안하는 알고리즘을 탐욕 알고리즘을 기반으로 하고 있기 때문에, 전체 계획 기간에 대하여 최적해를 찾는 것이 아니라, 의사 결정이 필요한 상황에서 평가 결과가 가장 좋은 해를 선택한다. 만약 배치 가능한 위치가 없는 경우에는 계획 입고일을 다음 날짜로 변경하여 다음 날짜에 다시 탐색하도록 한다.

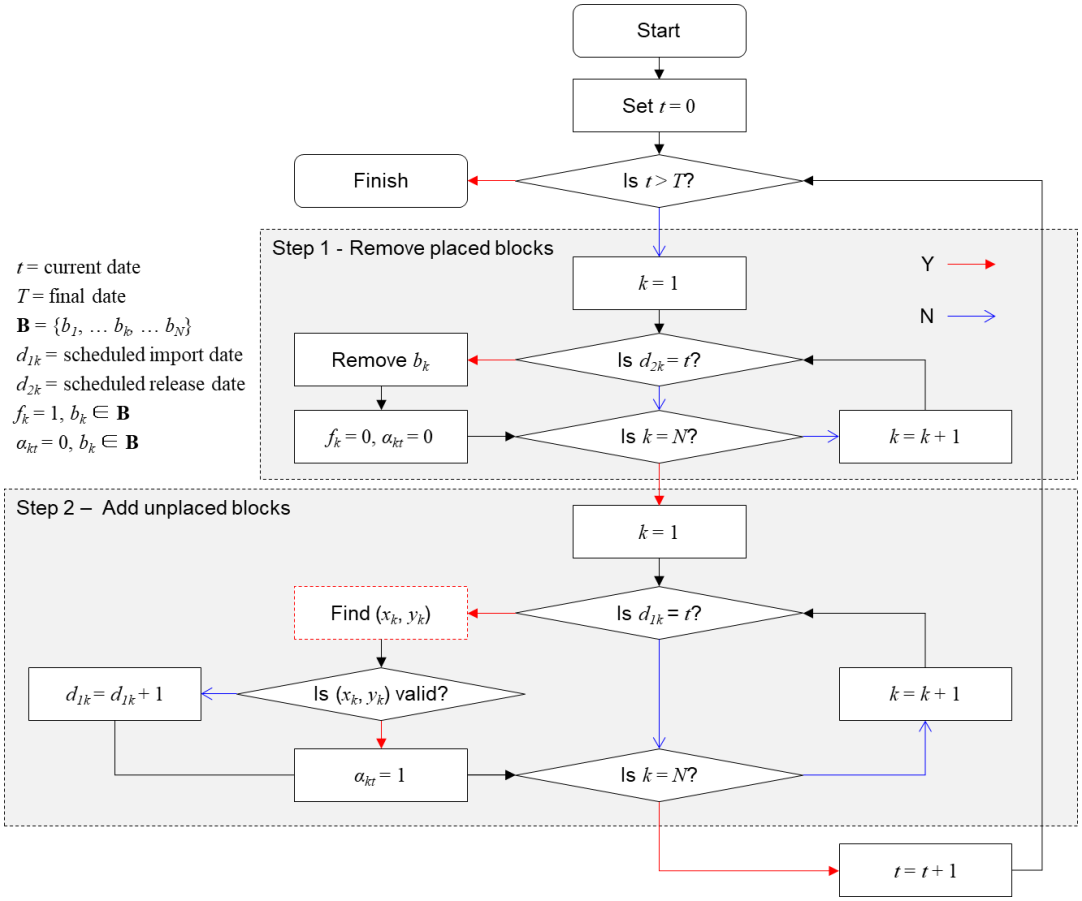


Figure 34 선행 탑재장의 효율적 활용을 위한 Greedy-Twist 알고리즘

두 번째 단계에서 배치 대상의 후보 위치를 탐색할 때에는 꼭지점-모서리 기반 탐색 방법을 적용하였다. 조선소의 대형 블록과 같은 직각 다각형 형태의 대상을 배치하는 기본적인 휴리스틱 알고리즘으로는 BL(Bottom-Left) 알고리즘이 있다(Baker et al., 1980). 이 알고리즘은 배치할 대상을 배치 공간의 왼쪽 하단에 밀집하여 배치하는 알고리즘이다. 이후 배치 대상으로 둘러싸인 공간을 고려할 수 없는 단점을 보완한 BLF 알고리즘이 제안되기도 하였다(Chazelle, 1983). 하지만 이와 같은 알고리즘은 합리적인 결과를 도출하는 반면, 작업 현장의 상황을 제대로 반영하지 못한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 작업 현장의 상황을 합리적으로 반영하면서, 비점유 공간의 형상을 단순하게 유지할 수 있도록 꼭지점-모서리 기반 탐색 방법을 제안하였다. 새롭게 배치되는 대상이 기존의 배치되어 있는 대상과 꼭지점이나 모서리를 맞추어 배치될 수 있도록 하였다.

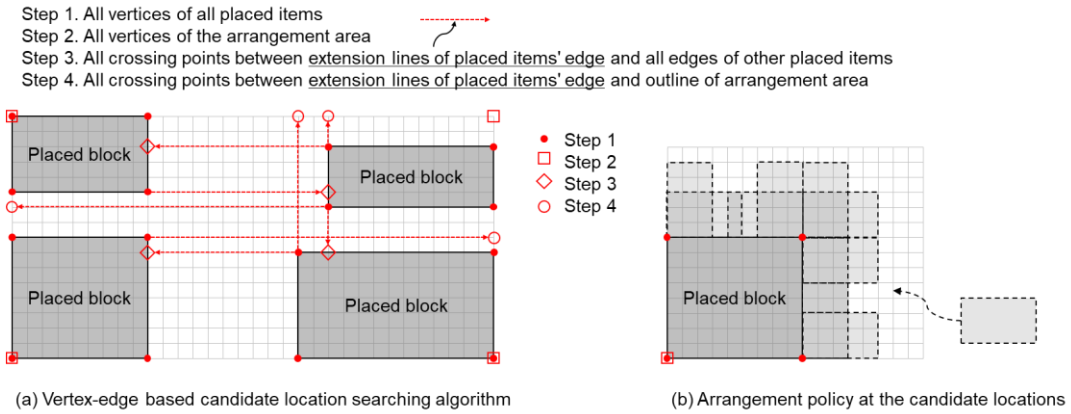


Figure 35 모서리-꼭지점 기반 배치 후보점 탐색 방법

배치 후보 위치는 Figure 35 과 같이 네 가지 단계에 걸쳐 선정된다. 우선 기존에 배치되어 있는 대상의 꼭지점이 후보 위치로 선정되며, 다음으로 배치 영역의 꼭지점이 후보 위치로 선정된다. 다음으로 기존에 배치되어 있는 대상의 모서리의 연장선이 다른 대상과 만나는 교차점을 후보 위치로 선정하며, 마지막으로 이 연장선이 배치 영역의 외곽선과 교차하는 점을 후보 위치로 선정한다. 후보 위치가 중복되는 경우에는 하나의 후보 위치로 통합하며, 모든 후보 위치에 대해서는 기존에 배치되어 있는 대상과 겹치지 않고, 배치 영역 내부에 배치되는 경우에 대하여 목적 함수를 계산하도록 한다. 이와 같이 기존에 배치되어 있는 대상의 꼭지점과 모서리를 기준으로 선정된 배치 후보 위치에 새로운 대상을 배치하면, 비점유 공간의 형상이 단순화 되어 새로운 대상을 배치할 때 유리하다. 복수의 배치 후보 위치에 대해서 목적 함수 값을 계산하고 값이 가장 큰 위치를 선택한다.

꼬인 형상의 개수 만으로 공간 배치 결과를 평가하면, 다양한 배치 결과에 대하여 동일한 값이 계산되는 경우가 많다. 따라서 꼬인 형상의 개수 만으로 공간 배치 결과를 평가하는 것은 다양한 배치 대안 중 정량적인 평가 결과가 가장 우수한 대안을 찾기 위한 방법에 적합하지 않다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 기존의 공간 배치 문제에서 사용한 평가 요소를 보조적인 평가 요소로 활용하였다. Lee et al. (2013)은 레저보트 생산 공장의 레이아웃을 설계하는 과정에서 직각 다각형 형태의 모듈을 배치하는 알고리즘과 평가 요소를 연구하였다. 이 연구에서는 모듈이 밀집되어 배치되는 레이아웃을 도출하기 위하여 새로운 모듈의 위치를 결정할 때 기존의 모듈과의 접하는 변의 개수와 길이, 그리고 도심의 위치를 고려하였다. 모듈이 밀집되어 배치되기 위해서는 기존의 모듈과 접하는 변의 개수가 많고 길이가 길어야 하며, 새롭게 만들어진 도심의 위치가 원점과 같은 특정 위치에서 가까워야 한다. 본 연구에서도

이러한 개념을 활용하여 Figure 36 와 같이 배치 대상 간 접하는 변의 길이와 개수, 그리고 원점과 도심 간 거리를 평가 요소로 사용하였다. 기존에 배치되어 있는 대상과 접하는 변의 길이와 개수가 많을수록 좋은 평가를 받도록 하였다. 그리고 원점과 도심 간 거리가 짧아질수록 밀집된 배치 결과가 도출된 다는 점에 착안하여 원점과 도심 간의 거리는 짧아질수록 좋은 평가를 받도록 하였다. 이러한 개념은 조선소 공간 배치 문제에서 적치장이나 작업장의 입출구 위치를 고려한 배치 결과를 도출하는데 도움을 줄 수 있다. 현재는 원점을 기준으로 하였지만, 입출구 위치를 기준으로 하는 경우 입출구 근처에 밀집된 배치 결과를 도출할 수 있다.

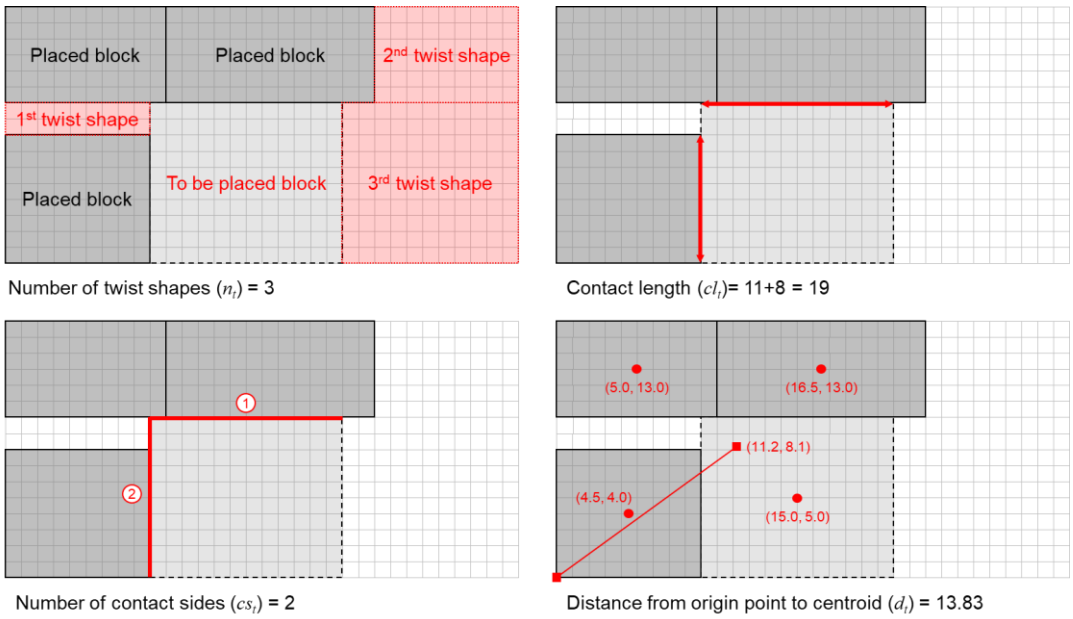


Figure 36 Greedy-Twist 알고리즘의 주요 평가 요소

3.1.3.4 공간 활용을 고려한 물류 시뮬레이션 방법

물류 시뮬레이션 수행 시 공간 활용 수준을 고려하기 위한 방법은 배치 영역의 부하를 어떠한 기준으로 평가할 것인지에 따라 달라질 수 있다. 배치 영역의 부하를 실제 생산 현장에 가깝게 평가하는 경우, 시뮬레이션 결과의 정확도가 높아질 수 있지만, 문제의 복잡도가 급격히 증가할 수 있기 때문에 적절한 수준에서 기준을 선택해야한다.

일반적으로 중장기 생산 계획을 시뮬레이션 할 때에는 배치 영역에 투입된 배치 대상의 면적이나 수량으로 공간 활용 수준을 분석한다. 이러한 경우에는 실제 배치 대상이 배치되는 위치는 고려하지 않기 때문에 정확도는 낮지만 처리 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다. 배치 대상의 위치를 고려하는 방법에는 두 가지 방법이 있는데, 배치 대상을 포함하는 직사각형을 정의하여 직사각형 형태의 배치 대상을 배치하는 방법과 실제 배치 대상의 투영 형상을 배치하는 방법이 있다. 직사각형 형상을 고려하는 경우에는 배치 영역의 점유 정보를 행렬로 나타낼 수 있기 때문에 배치 대상의 겹침 여부 판단에 용이하다. 그리고 배치 대상의 투영 형상을 고려하는 경우에는 정확한 위치와 점유 정보를 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, NFP(No-Fit Polygon)과 같이 임의 형상 다각형의 겹침 여부를 판단하기 위한 별도의 방법(Bennell et al., 2001)을 이용하여 겹침 여부를 판단 해야하고, 처리 속도가 매우 느릴 수 있다는 단점을 가지고 있다. Table 8 은 배치 영역 부하 판단 기준에 따른 특징을 정리한 결과이고, Figure 37 은 판단 기준에 따른 공간 활용 수준 판단 방법의 예시를 나타낸다.

Table 8 배치 기준에 따른 특징 분석

배치 기준		최대 배치 한계	배치 대상 위치	특징		
				정확도	처리 속도	활용 정보
수량		배치 가능 수량 (정확한 산출 불가능)	알 수 없음	낮음	빠름	배치 수량
면적		배치 영역 면적	알 수 없음	낮음	빠름	배치 면적
위치	직사각형	배치 영역 면적, 점유 정보	개략적 위치 파악 가능	보통	보통	배치 위치
	투영 형상		정확한 위치, 점유 정보 파악 가능	높음	느림	배치 형상 배치 위치

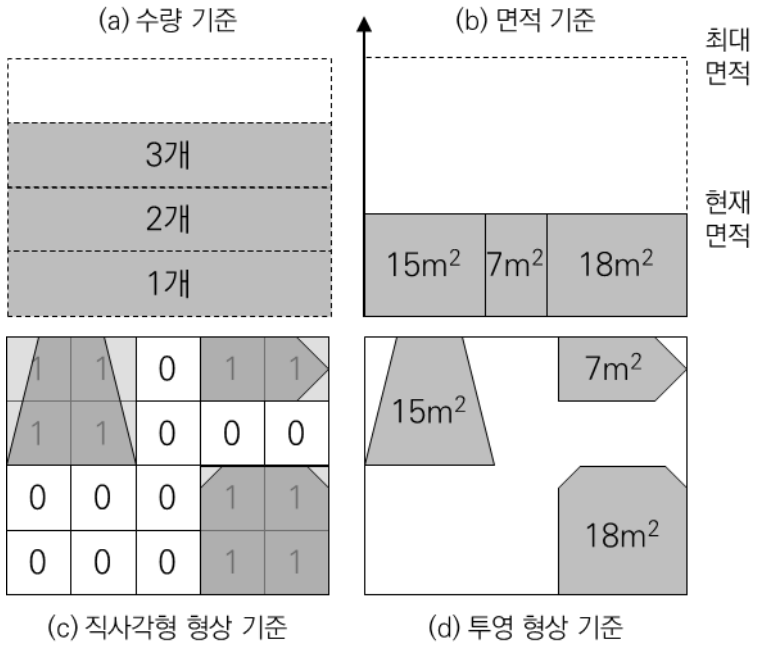


Figure 37 배치 기준에 따른 공간 활용 수준 판단 방법

공간 활용을 고려한 물류 시뮬레이션 수행 시 공간의 활용 수준을 판단하는 기준에 따라서 상대적 처리 속도와 정확도에 차이가 있다 (Figure 38). 앞서 언급한 것과 같이 수량이나 면적으로 공간 활용 수준을 평가하는 경우에는 상대적으로 처리 속도가 빠르지만 결과가 부정확하며, 형상을 고려한 경우에는 상대적으로 처 속도가 느리지만, 결과가 정확하다. 특히 실제 형상에 가까운 수준으로 배치 영역의 활용 수준을 평가하는 경우에는 문제의 복잡도가 급격히 증가하여 처리 속도가 매우 느려질 수 있다. 본 연구에서 제안하는 물류 시뮬레이션 시스템에서는 시뮬레이션을 수행하는 목적에 따라서 배치 기준을 선택할 수 있도록 하였으며, 기본적으로는 직사각형 형상을 기준으로 개략적 위치를 파악할 수 있도록 하였다.

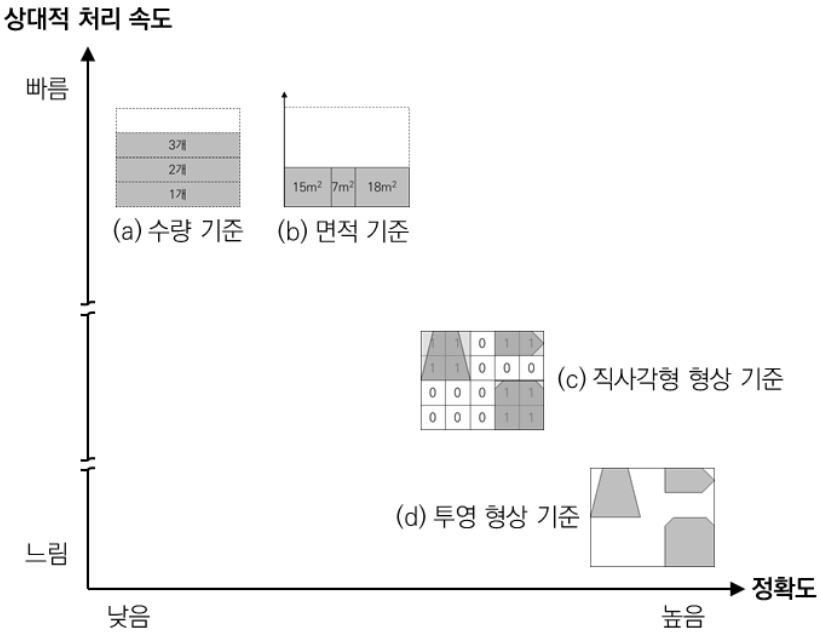


Figure 38 배치 기준에 따른 상대적 처리 속도 및 정확도 비교

3.2 시스템 구축 절차[2]

3.2.1 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 기본 구조

본 연구에서 제안하는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템은 데이터 어댑터, 시뮬레이션 엔진, 시뮬레이션 결과 리포터로 분류할 수 있다(Figure 39). 데이터 어댑터는 시뮬레이션 모델을 만들기 위해서 필요한 데이터를 변환하는 기능을 수행한다. 조선소의 기간 시스템(legacy system)이나 생산 현장에서 보유하고 있는 데이터를 변환하여 단위 생산 공정과 물류 흐름을 식별하고 정의하는데 활용되며, 지리 정보를 변환하여 시뮬레이션 시스템 내 지리 정보 모델을 정의할 때도 활용된다. 시뮬레이션 엔진은 이산 사건 시스템 시뮬레이션 커널을 기반으로 경로 탐색 모듈과 블록 배치 모듈이 탑재되어 있다. 마지막으로 시뮬레이션 결과 리포터는 사전에 정의한 시뮬레이션 수행 목표에 해당하는 KPI 를 결과로 출력하는 기능을 수행한다.

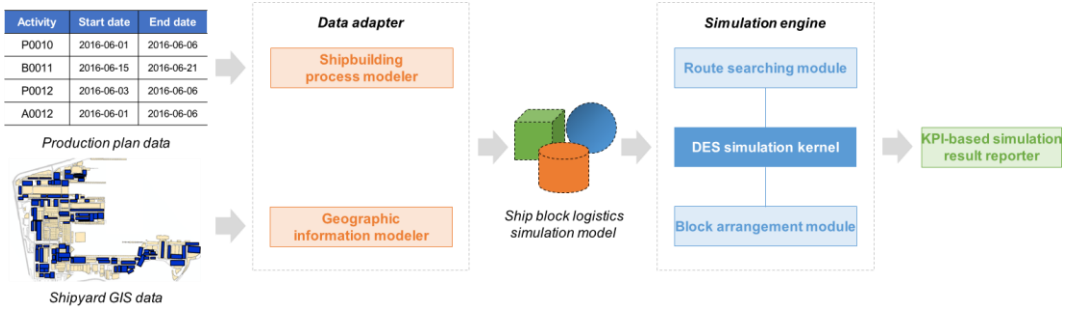


Figure 39 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 기본 구조

[2] 이 절의 내용은 Jeong et al. (2017) 논문의 내용을 요약하여 다시 정리하였음.

3.2.2 조선소 생산 계획, 공간 정보 연동 방법

3.2.2.1 조선소 생산 계획 정보 연동 방법

본 연구에서는 조선소의 중장기 생산 계획인 기준 계획 정보를 바탕으로 물류 시뮬레이션에 필요한 제품 정보와 일정 정보를 정의하였다. 조선소의 생산 계획 정보는 Table 9 과 같이 공정을 기준으로 제품, 작업장, 시작일, 종료일 정보가 입력되어 있다. 이러한 데이터를 Table 10 과 같이 제품을 기준으로 변환하였으며, 공정과 공정 사이에 실제로 물류가 발생하는 경우만 식별하여 제품 별 물류 프로세스 체인을 정의하였다. 물류 프로세스 체인은 각 제품이 조립되는 과정에서 실제로 물류가 발생하는 공정만 식별하여 정의한 것을 의미한다. 이때 제품이 다르더라도 동일한 공정을 포함하는 경우가 발생하는 물류 프로세스를 식별하여 병합하면 물류 시뮬레이션에 필요한 통합 물류 프로세스 체인을 정의할 수 있다(Figure 40).

Table 9 공정 기준 조선소 기준 계획 데이터

조선소 기준계획 데이터

공정 코드	제품	시작일	종료일	…
AACC01	B01	2016-05-05	2016-05-10	…
AACC02	B02	2016-05-05	2016-05-10	…
…	…	…	…	

Table 10 제품 기준 조선소 기준 계획 데이터 변환 결과

제품 기준 공정 흐름

제품	공정 1				공정 2				···
	공정 코드	작업장	시작일	종료일	공정 코드	작업장	시작일	종료일	···
B001	AACC01	S01	2016-02-01	2016-02-10	AAACCC002	S02	2016-02-13	2016-02-20	···
B002	BBDD01	S02	2016-03-01	2016-03-05	EEEDDD002	S04	2016-03-05	2016-03-15	···
···	···		···	···	···		···	···	

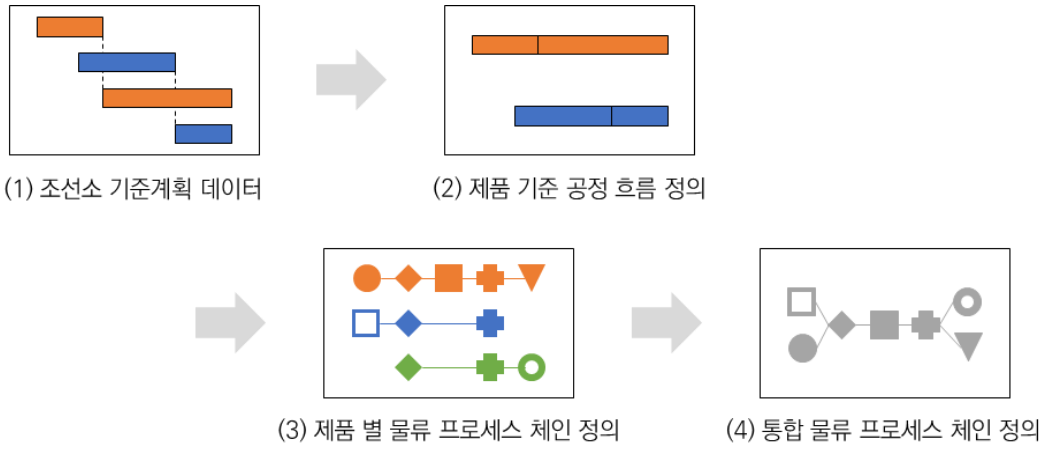


Figure 40 조선소 기준 계획 데이터를 이용한 통합 물류 프로세스 체인 정의 방법

3.2.2.2 조선소 공간 정보 연동 방법

조선소는 다른 산업에 비하여 단일 사업장이 차지하는 면적이 매우 넓다. 따라서 물리적인 공간을 효율적으로 관리하기 위하여 지번, 권역 등을 정의하여 관리하고 있다. 일반적으로 가장 작은 단위의 지번을 소지번으로 정의하고 있으며, 복수의 소지번을 묶어서 중지번으로 관리한다. 지번의 크기는 해당하는 공간의 용도나 형상의 특징에 따라서 다르게 정의될 수 있다. 그리고 지번은 작업 유형 지번(work, W), 적치 유형 지번(stock, S), 운용 유형 지번(alternative, A)으로 구분할 수 있다. 작업 유형 지번은 선박 건조 공정이 진행되는 작업장 지번을 의미하며, 적치 유형 지번은 선박 건조 공정 사이에 제품을 적치 활동에 해당하는 적치장 지번을 의미한다. 마지막으로 운용 유형 지번은 기본적으로 선박 건조 공정이 진행되는 작업장 지번이지만, 적치 공간으로도 활용할 수 있는 지번을 의미한다. Figure 41 는 조선소에서 물리적인 공간을 나누어 관리하는 사례를 나타낸다.

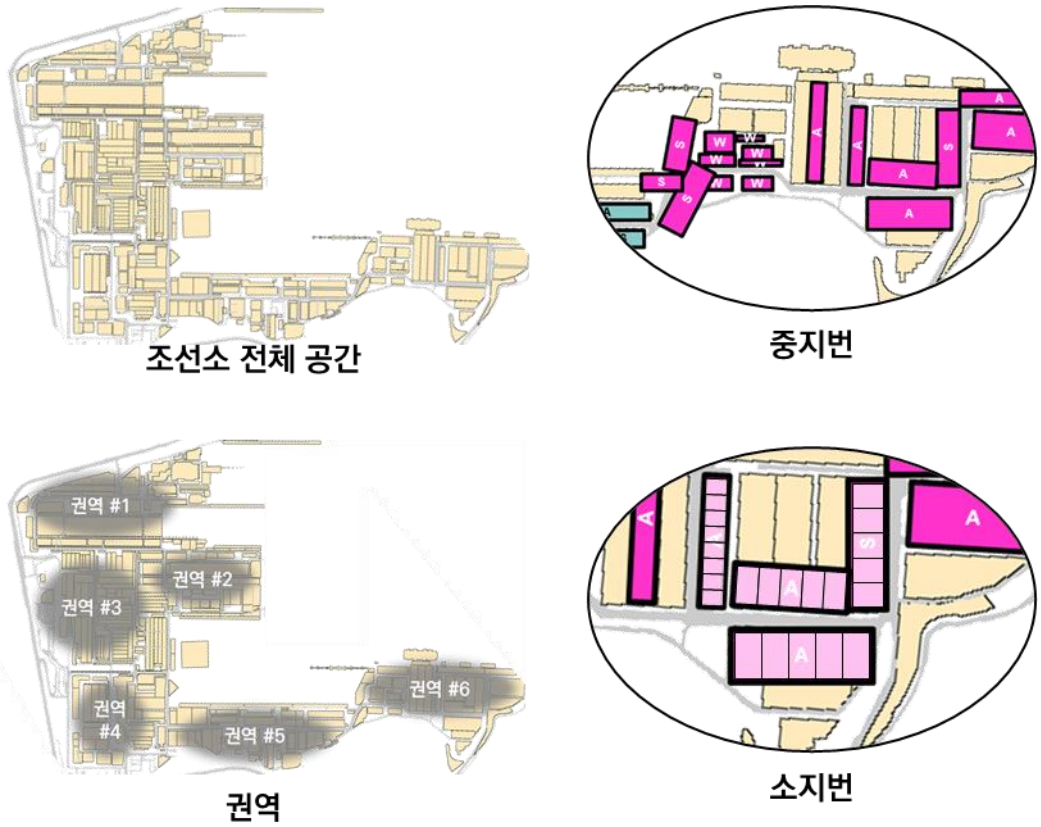


Figure 41 조선소 공간 정보 관리 체계

하지만, 조선소에서 관리하고 있는 지번 정보만으로는 물류 시뮬레이션 모델의 지리 정보 모델을 구축할 수 없다. 조선소의 물리적인 공간은 작업장과 적치장으로 구분할 수 있는데, 작업장은 일반적으로 해당 작업장의 역할이 정해져 있다. 하지만 적치장은 특정 공정을 대상으로 하고 있지 않으며, 일부 대형 적치장은 다른 적치장에 더 이상 적치할 수 없을 때 공통적으로 사용하는 속성을 가지고 있는 경우도 있다. 하지만, 물류 비용 관점에서는 선행 공정을 수행한 작업장과 가까운 적치장이나

후행 공정을 수행한 작업장과 가까운 적치장을 선택하는 것이 유리하다. 따라서 본 연구에서는 작업장과 적치장의 연관 관계를 정의하기 위하여 작업장 속성을 가진 지번과 적치장 속성을 가진 지번을 하나의 속성으로 연결하였고, 이를 물류 그룹(logistics group)으로 정의하였다.

이러한 속성을 이용하여 작업장과 적치장의 연결 관계를 정의할 수 있다. 모든 작업 유형 지번은 동일한 물류 그룹에 포함되어 있는 적치 지번을 우선 적치장으로 정의하고 있으며, 적치장 선정 시 우선 적치장을 먼저 탐색한다. 만약 우선 적치장에 적치를 할 수 없는 경우에는 가장 가까운 적치 지번(혹은 운용 지번)을 목적지로 설정하여 탐색한다. Figure 42 은 물류 그룹과 우선 적치장 속성을 이용한 적치장 선정 방법을 나타낸다.

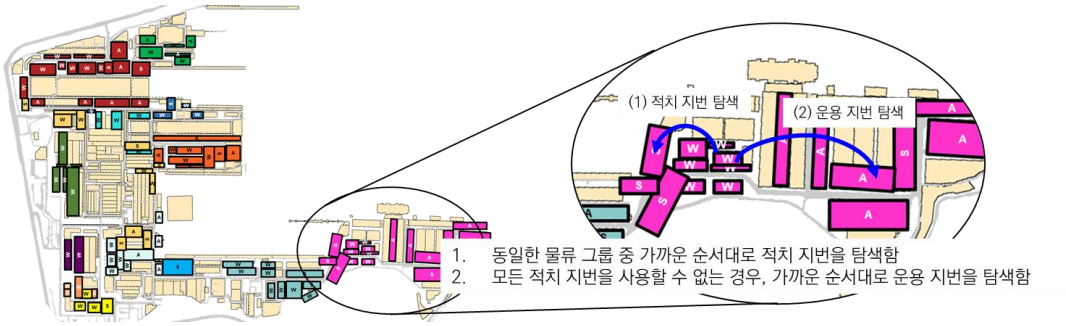


Figure 42 물류 그룹과 우선 적치장 속성을 이용한 적치장 선정 방법

3.2.2.3 조선소 생산 계획 정보, 공간 정보 간 연동 방법

조선소에서 생산 계획을 수립할 때에는 해당 공정이 진행되는 물리적인 위치를 고려하여 물량을 배분할 수 없다. 따라서 과거의 실적이나 공장과 공정을 기준으로 개략적인 부하 평준화를 고려하여 물량을 배분한다. 하지만 물류 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 실제 생산 현장에서 공정이 진행되는 것과 같이 해당하는 공정이 진행되는 물리적인 위치를 지정해야한다. 본 연구에서는 물류 그룹 코드와 생산 계획 단계에서 물량 배분 시 활용하는 공장 코드, 공정 코드 간 연관 관계를 정의하여 문제를 해결하였다(Figure 43). 물류 시뮬레이션 모델의 지번은 물류 그룹 코드를 속성으로 가지고 있기 때문에 이와 같은 방법으로 물류 시뮬레이션 시스템에서도 작업장의 물리적인 위치를 고려할 수 있다.

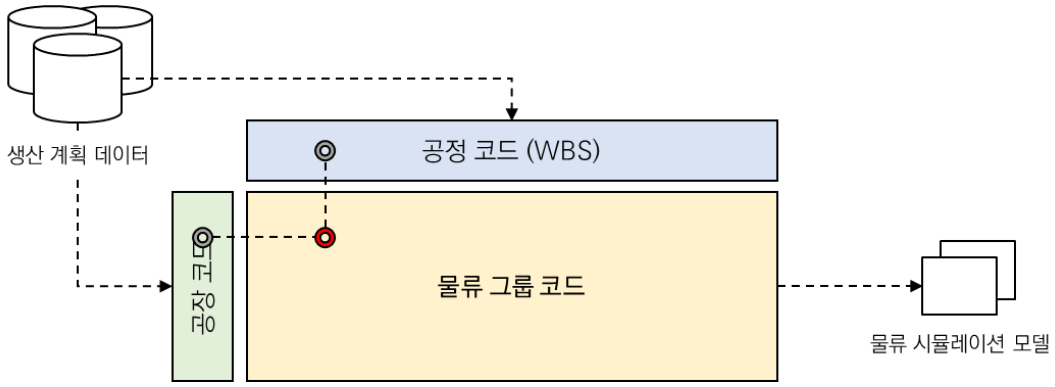


Figure 43 조선소 생산 계획-지리 정보 연동 방법 개념도

3.2.2.4 이동 설비 경로 탐색 방법과 공간 활용 유형 구분

본 연구에서 제안한 조선소 물류 시뮬레이션 시스템에서는 물류 흐름에 의하여 생성되는 트랜스포터 이송 활동의 경로를 다양한 알고리즘을 사용할 수 있도록 모듈화 하였다. 기본적으로는 Moon et al. (2016)의 연구 내용을 기반으로 가상 우수한 최단 경로 탐색 알고리즘을 적용하였다. 이를 위하여 야드 공간 정보를 그래프 형식으로 변환하여 임의의 두 지점간 최단 경로를 연산할 수 있도록 하였다. 하지만 본 연구에서는 트랜스포터 이동시 특정 위치가 통행 불가가 됨으로써 다른 경로를 탐색해야 하는 경우에 대해서는 고려하지 않고, 항상 최단 경로로만 이동하는 것으로 간략화 하여 시뮬레이션에 반영하였다.

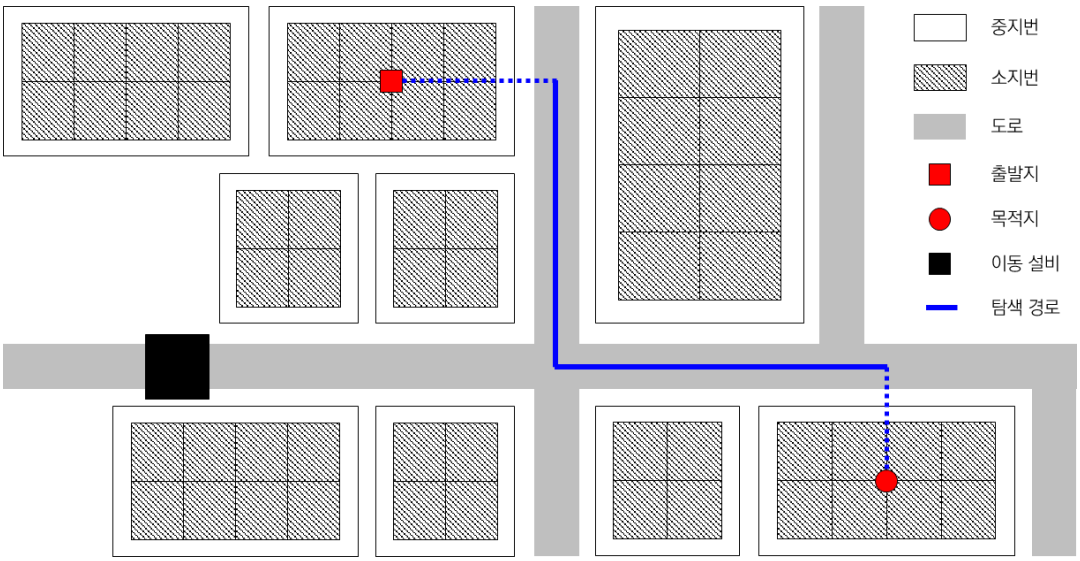


Figure 44 이동 설비 경로 탐색 방법 개념도

출발지와 목적지는 Figure 44 와 같이 중지번의 중심 위치로 지정하였으며, 출발지, 목적지에서 가장 가까운 도로를 기준으로 트랜스포터의 최적 경로를 탐색하도록 하였다.

마지막으로 공간 활용 유형을 구분하여 이에 따른 공간 배치 유형을 구분하였다. 외벽이 있는 작업장이나 경계가 명확한 적치장은 다중 열 배치 유형으로 정의하였으며, 도로 근처에 위치하여 경계가 명확하지 않은 적치장은 단일 열 배치 유형으로 정의하였다. 다중 열 배치 유형을 가진 공간에는 기본 정반배치 알고리즘이 적용되며, 제품 입출고 시 발생하는 재배치 작업을 고려해야하는 특성을 가진다. 단일 열 배치 유형을 가진 공간에서는 폭방향으로만 기하학적 간섭을 고려하며, 배치 대상은 도로의 폭과 이송 설비의 폭을 고려하여 배치 영역의 경계를 벗어날 수도 있도록 하였다. 이러한 배치 유형이 적용된 공간은 트랜스포터 상하차 작업 시 입출구의 위치나 다른 배치 블록과의 간섭을 고려하지 않아도 되기 때문에 유리한 특성이 있다. Table 11 는 배치 유형에 따른 특징을 정리한 결과를 나타낸다.

Table 11 배치 유형 구분에 따른 특성 분석 결과

배치 유형 구분	특징
다중 열 배치 유형	공통 적치장 등에 적용되어 있는 속성 기본 정반배치 알고리즘 적용 배치 영역의 경계가 명확함 제품 입고/출고 시 발생하는 재배치 작업을 고려해야함
단일 열 배치 유형	도로 근처에 있는 적치장 등에 적용되어 있는 속성 폭방향으로만 기하학적 간섭을 고려함 배치 영역의 경계가 도로와 인접한 영역에 대하여 명확하지 않음 배치 대상은 **도로의 폭과 이송 설비의 폭을 고려**하여 배치 영역의 경계를 벗어날 수 있음 트랜스포터 상하차 시 유리함

3.2.3 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과

Figure 45 은 조선소 물류 시뮬레이션 시스템의 데이터 어댑터 구현 결과를 나타낸다. 데이터 어댑터는 조선소 기간 시스템 정보나 데이터 파일, 그리고 시뮬레이션 모델의 매개 변수와의 연관 관계를 정의하여 데이터를 쉽게 변환할 수 있도록 도와준다.

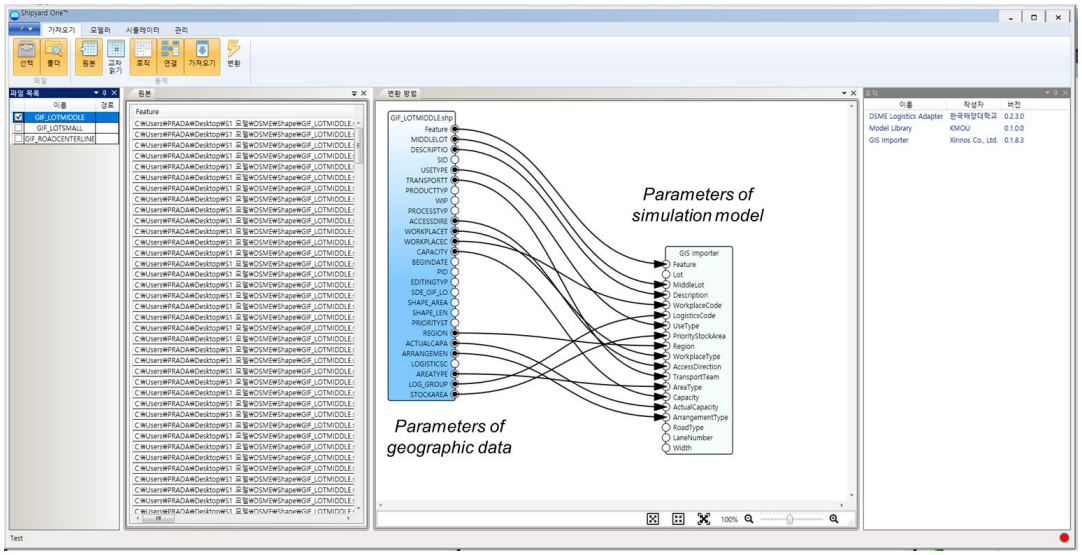


Figure 45 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 데이터 어댑터

Figure 46 는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템에서 물류 프로세스 체인을 나타낸 결과이다. 물류 프로세스 체인은 데이터 어댑터를 통하여 변환한 계획 데이터를 이용하여 자동 생성 되며, 물류 프로세스 체인 선택 시, 해당하는 제품 정보를 확인할 수 있다.

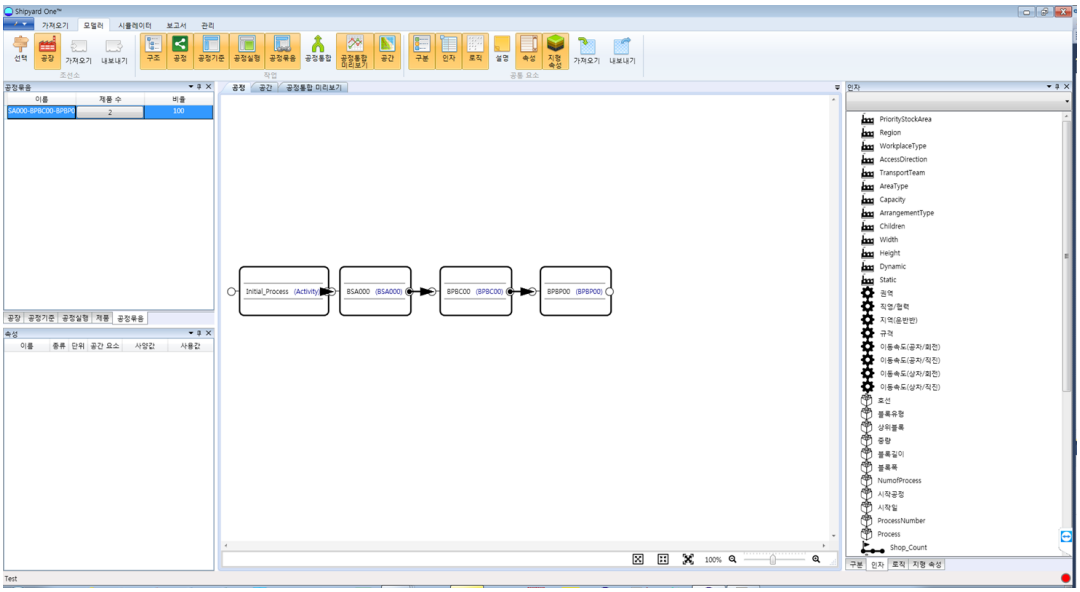


Figure 46 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 물류 프로세스 체인

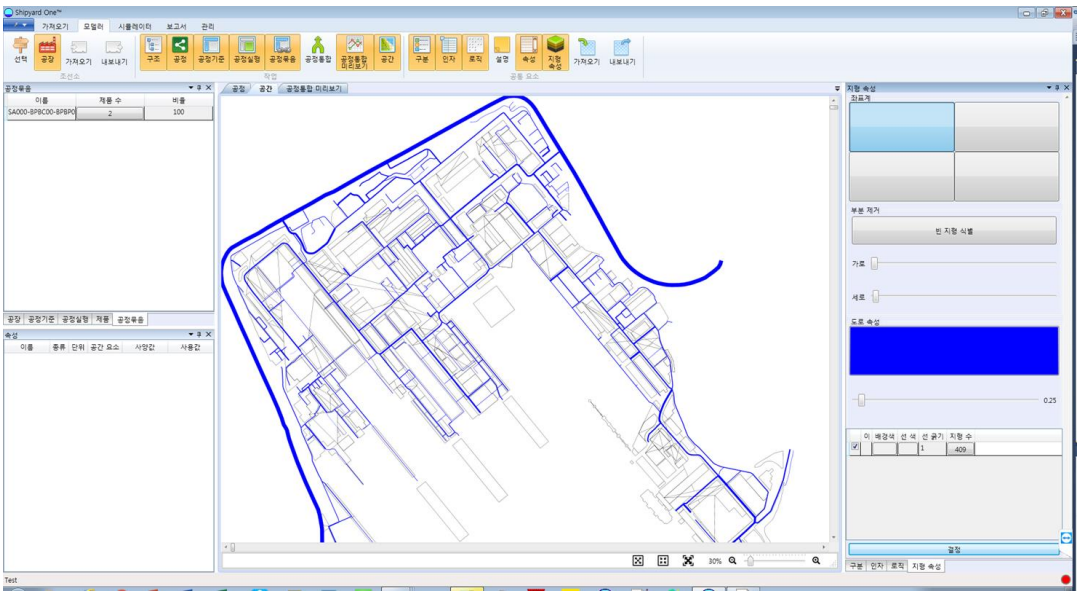


Figure 47 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 공간 정보 모델

Figure 47 는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템에서 조선소 공간 정보를 변환한 결과를 나타낸다. 조선소 기간 시스템에서 정의하고 있는 조선소 사업장 내 도로 정보와 지번 정보와 같은 공간 정보를 확인할 수 있으며, 추후 물류 시뮬레이션 수행 시 변환한 공간 정보 모델을 활용하여 시뮬레이션 결과를 출력할 수 있다.

Figure 48 은 조선소 물류 시뮬레이션 시스템에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 수행 결과는 이산 사건 시스템 시뮬레이션 엔진에서 저장한 결과를 사용자가 정의한 양식에 맞추어 일정, 설비, 제품, 공장 등을 기준으로 출력할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 시스템 내에서 XML (Extensible Markup Language) 문서 형식으로 관리되고 있기 때문에 추후 사용자가 원하는 양식에 맞추어 결과 리포트를 작성할 수 있다.

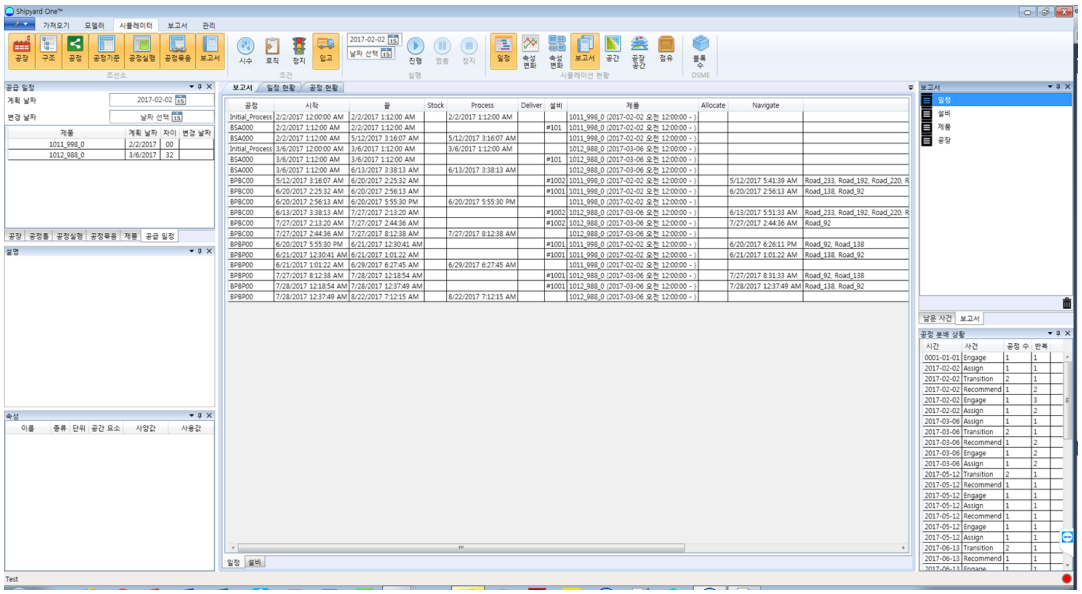


Figure 48 조선소 물류 시뮬레이션 시스템 구축 결과 – 시뮬레이션 수행 결과

3.3 시뮬레이션 시스템 검증

이 절에서는 본 연구에서 제안한 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 검증하는 내용을 다루고 있다. 시스템을 검증하는 절차는 시스템이 오류 없이 작동하는지 검증하는 작동 유효성 검증 단계(verification)와 시뮬레이션의 결과가 실제 조선소의 생산 환경을 알맞게 반영하고 있는지를 검증하는 결과 유효성 검증 단계(validation)로 나누어서 진행하였다.

작동 유효성 검증 단계에서는 물류 시뮬레이션을 수행하기 위한 간단한 예제를 가정하고, 제품의 공정, 물류 시뮬레이션 결과를 추적하여 결과를 검증하였다. 그리고 결과 유효성 검증 단계에서는 조선소에서 집계하고 있는 생산 계획 시스템 내 부하 분석 결과와 시뮬레이션 시스템에서 도출된 결과를 비교하여 결과를 검증하였다.

3.3.1 작동 유효성 검증 (Verification)

본 연구를 통하여 개발한 조선소 물류 시뮬레이션 시스템의 작동 유효성을 검증하기 위하여 3 개의 공정으로 구성되어 있는 물류 프로세스를 정의하고 2 개의 제품을 정해진 일정에 맞게 투입하여 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 물류 프로세스는 조립, 전처리, 도장으로 구성되어 있으며(Figure 49), 제품 1, 제품 2 의 공정 별 작업장, 시작일, 종료일 정보는 Table 12 과 같다.

Figure 49 작동 유효성 검증을 위한 물류 프로세스 체인 예제

Table 12 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 입력 데이터

제품	공정	작업장	시작일	종료일
제품 1	조립	OOS-20	2017-02-02	2017-05-12
	전처리	1DP-W0	2017-06-20	2017-06-20
	도장	1DP-W0	2017-06-21	2017-06-29
제품 2	조립	OOS-W0	2017-03-06	2017-06-13
	전처리	1DP-W0	2017-07-27	2017-07-27
	도장	1DP-W0	2017-07-28	2017-08-22

본 연구에서 제안한 시스템을 이용하여 물류 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 지번과 도로가 정의되어 있는 공간 정보가 추가로 필요하며, 제품을 이송하기 위한 트랜스포터의 속성 정보와 트랜스포터 배차 기준 규칙이 필요하다. 공간 정보와 트랜스포터 속성 정보는 국내 대형 조선소의 정보를 활용하였으며, 트랜스포터 배차 기준은 임의로 정한 기준에 따라 트랜스포터가 배차되도록 상세 로직을 입력하였다.

추가로 물류 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 본 연구에서 정의한 물류 토큰을 포함한 공정 중심 모델링 방법에 따라 시뮬레이션에 필요한 상세 로직을 정의해야한다. 시뮬레이션 수행 로직은 Figure 50 과 같이 물류 로직과 공정 로직으로 구분할 수 있으며, 상세 로직은 Table 13, Table 14 와 같이 입력하였다.

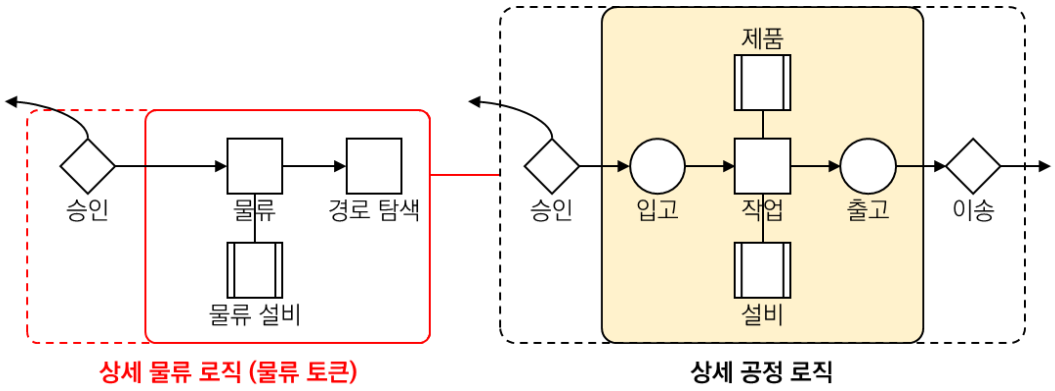


Figure 50 공정 중심 모델링 방법을 이용한 상세 물류 로직 및 공정 로직 정의

Table 13 작동 유효성 검증을 위한 상세 물류 로직 내용

물류/공정 로직	상세 로직 단계	상세 로직 내용
물류 로직	승인	제품이 물류 로직에 할당 가능한지 판단하는 로직 기준 계획 정보에 맞추어 제품을 공정에 투입함
	물류	1. 현재 시뮬레이션 시각 – 계획 일 비교 2. 다음 공정 시작일까지 기간이 남아 있는 경우 적치장으로 목적지 설정 3. 다음 공정 시작일까지 기간이 남아 있지 않은 경우 작업장으로 목적지 설정
	물류 설비	1. 사용 가능한 물류 설비 확인 2. 사용 가능한 물류 설비가 있는 경우, 제품의 무게 – 물류 설비 용량 확인 3. 물류 설비 용량이 작은 것에 높은 우선 순위를 부여함 4. 우선 순위가 가장 높은 물류 설비를 사용함 (복수인 경우 임의로 선택함)
	경로 탐색	1. 현재 위치에서 다음 목적지까지 최적 경로 탐색 2. 경로 탐색 하는 동안 걸린 시간 반환

Table 14 작동 유효성 검증을 위한 상세 공정 로직 내용

물류/공정 로직	상세 로직 단계	상세 로직 내용
공정 로직	승인	현재 공정에 투입이 가능한지 판단
	입고	공정에 할당된 작업장에 제품 투입 제품 정보를 고려하여 위치 점유
	작업	현재 공정 정보 확인 제품이 해당 공정에서 소요되는 공기 확인 조회된 공기만큼 작업시간 진행
	출고	후행 공정이 복수인 경우 후행 공정 결정
	이송	후행 공정으로 이송이 가능한지 판단

Table 15 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과

Type	Process	Planned start date	Process start time	Planned end date	Process end time	Transportation facility	Product	Road	Workshop
Work	Assembly	2017-02-02	2017-02-02 AM 12:00:00	2017-05-12	2017-05-12 AM 12:10:40		P #1		
Wait	-	-	2017-05-12 AM 12:10:40	-	2017-06-20 AM 12:00:00		P #1		1DW5
Transport	-	-	2017-06-20 AM 12:00:00	-	2017-06-20 AM 12:30:41	#1001	P #1	Road_138, Road_92	
Work	Pretreatment	2017-06-20	2017-06-20 AM 12:30:41	2017-06-20	2017-06-20 PM 4:15:50		P #1		1DW2
Transport		-	2017-06-20 PM 4:15:50	-	2017-06-21 AM 12:49:35	#1001	P #1	Road_138, Road_92	
Work	Painting	2017-06-21	2017-06-21 AM 12:49:35	2017-06-29	2017-06-29 AM 3:47:21		P #1		1BP1
Work	Assembly	2017-03-06	2017-03-06 AM 12:00:00	2017-06-13	2017-06-13 AM 3:00:03		P #2		
Wait	-	-	2017-06-13 AM 3:00:03	-	2017-07-27 AM 12:00:00		P #2		1DW5
Transport	-	-	2017-07-27 AM 12:00:00	-	2017-07-27 AM 12:31:18	#1002	P #2	Road_138, Road_92	
Work	Pretreatment	2017-07-27	2017-07-27 AM 12:31:18	2017-07-27	2017-07-27 PM 2:41:25		P #2		1BB3
Transport		-	2017-07-27 PM 2:41:25	-	2017-07-28 AM 12:54:10	#1002	P #2	Road_138, Road_92	
Work	Painting	2017-07-28	2017-07-28 AM 12:54:10	2017-08-22	2017-08-22 AM 10:34:36		P #2		1BP1

위와 같은 조건에서 물류 시뮬레이션을 수행하여 Table 15 와 같이 결과가 도출되었다. 시뮬레이션 수행 결과, 입력한 계획에 맞게 공정이 진행된 것을 확인할 수 있었으며, 물류 시뮬레이션에서는 계획에서 확인할 수 없었던 상세한 시간 단위의 결과도 확인할 수 있었다. 또한 이송 활동에 대한 결과에는 사용한 설비와 이동한 도로 정보를 추가로 확인할 수 있었으며, 적치 활동에 대한 결과에는 사용한 적치장의 물리적인 위치 정보를 추가로 확인할 수 있었다. Figure 51 는 도출된 결과를 간트 차트 형태로 변환한 결과이다.

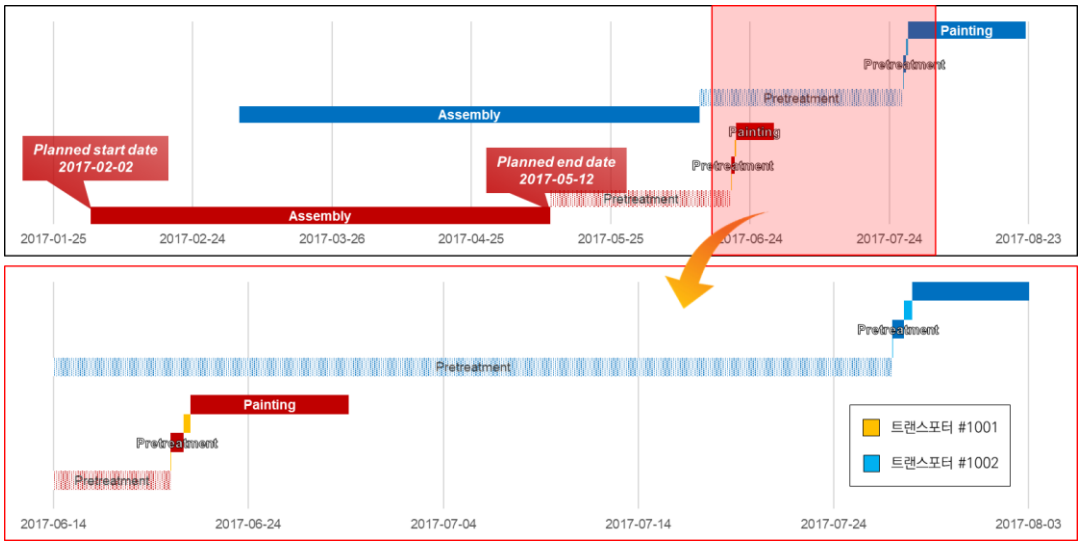
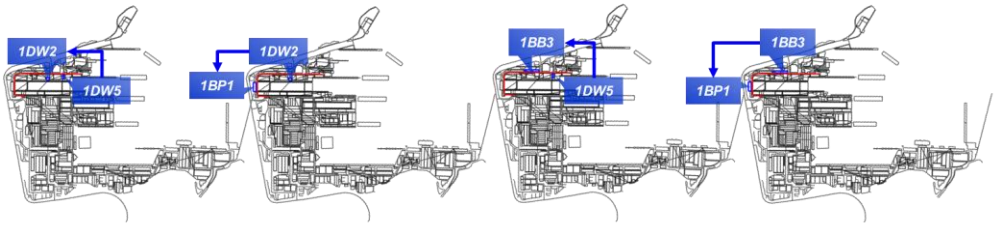


Figure 51 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과 (Gantt chart)

그리고 보다 상세한 결과 검증을 위하여 사용된 트랜스포터 정보와 작업장 정보, 이동한 도로 정보를 가시화하여 확인하였다(Figure 52). 총 두 대의 트랜스포터가 사용되었으며, 시작 위치와 종료 위치에 따라 최단 경로로 트랜스포터가 움직인 것을 확인할 수 있다.



(a) Path of facility #1001 *(b) Path of facility #1002*

Figure 52 작동 유효성 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과 (이송 설비)

3.3.2 결과 유효성 검증 (Validation)

물류 시뮬레이션 결과의 결과 유효성은 조선소 사업장 내 분포되어 있는 블록 수를 집계하여 비교하였다. 다만, 실제 조선소의 사업장 내 분포되어 있는 블록의 수량이 정확하게 집계되고 있지 않기 때문에, 생산 계획 시스템에서 물류를 고려하지 않고 산출한 사업장 내 분포되어 있는 블록의 수량과 물류 시뮬레이션 수행 결과를 비교하는 것으로 결과 유효성을 검증하였다(Figure 53).

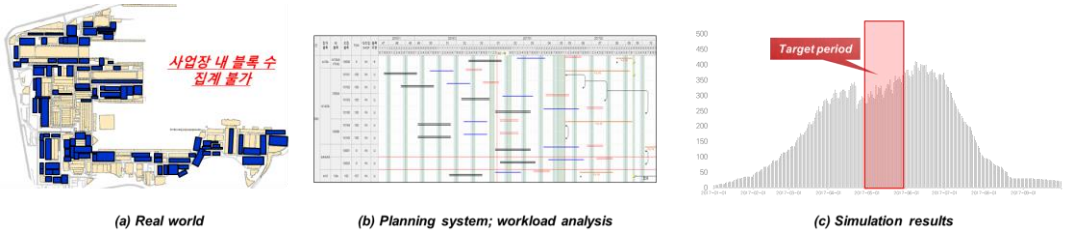


Figure 53 조선소 물류 시뮬레이션 시스템의 결과 유효성 검증 방법

Figure 54 는 동일한 기간에 대하여 물류 시뮬레이션을 수행한 결과와 생산 계획 시스템에 산출한 부하를 비교한 결과이다. 물류 시뮬레이션에서 도출된 결과에 따르면 사업장 내 분포되어 있는 블록의 수량은 300 개 내외로 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 연휴와 주말이 있는 경우에는 수량이 일시적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 생산 계획 시스템에서 산출된 부하 역시 유사한 경향으로 결과가 도출되었으며, 이를 통하여 물류 시뮬레이션 결과가 유효한 결과를 도출함을 확인하였다.

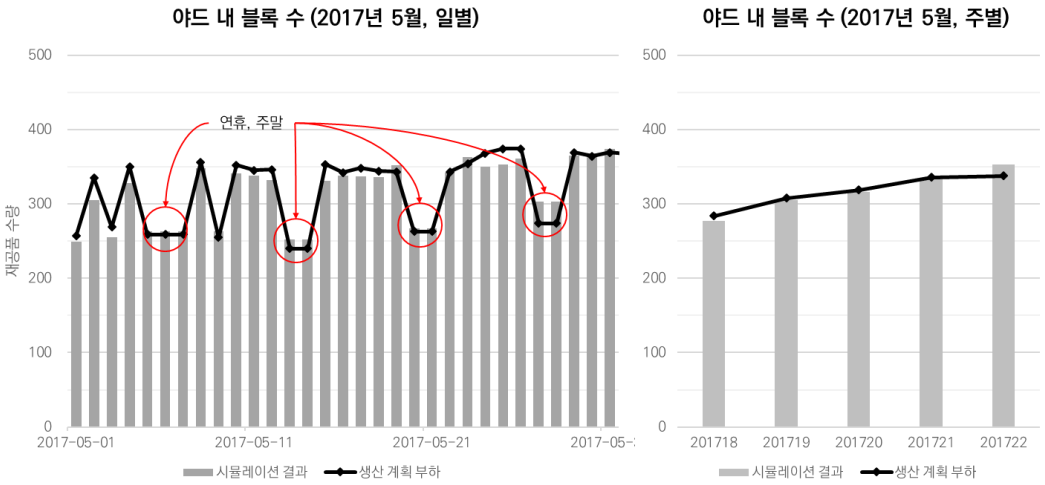


Figure 54 결과 유효성 검증을 위한 야드 내 블록 수 비교 결과
(시뮬레이션 결과 vs. 생산 계획 시스템 산출 결과)

제 4 장

조선소 물류 시뮬레이션 시스템 활용 방법 및 적용 사례

4.1 시스템 활용 방법

4.1.1 물류 흐름 식별 및 물류 부하 산출

선박 건조 공정은 앞서 언급한 것과 같이 단위 생산 공정과 물류 흐름으로 구분할 수 있다. 하지만, 중장기 생산 계획을 수립할 때에는 대부분 물류 흐름을 고려하지 않고 생산 계획을 수립하고 있다. 조선소의 생산 계획 시스템은 생산 계획을 수립하는데 필요한 기준 정보를 저장하고 있는 기간 시스템과 연동이 되어 있다. 이때, 생산 계획 시스템은 기간 시스템으로부터 제품 정보에 해당하는 블록 정보를 가져온다. 그리고 계획을 수립해야 할 대상이 되는 공정 목록과 공정 간의 연결 관계 정보를 가져온다. 공정 간의 연결 관계 정보는 추후 생산 계획 수립 시 제약 조건으로 작용한다. 그리고 부하를 산출하기 위하여 필요한 표준 시수 정보도 조선소 기간 시스템으로부터 가져오며, 과거 실적선 데이터를 바탕으로 생산 계획을 수립한다(Figure 55).

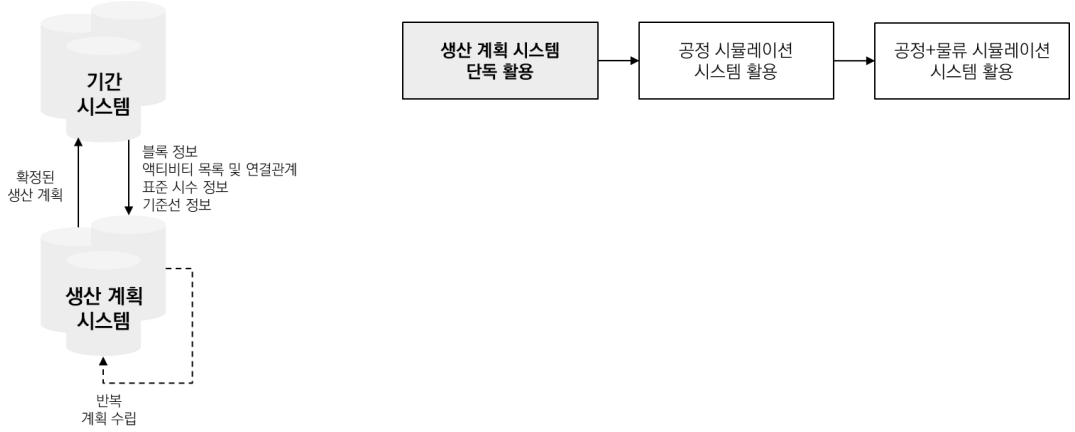


Figure 55 생산 계획 단독 활용 단계

조선소의 생산 계획은 계층 구조를 가지고 있기 때문에, 상위 단계의 생산 계획은 하위 단계의 생산 계획에 제약 조건으로 작용한다. 이를 고려하여 기존의 실적선 정보를 변경하여 신규 선박의 생산 계획을 수립한다. 생산 계획 시스템만 단독으로 활용했을 때에는 생산 계획 시스템에서 제공하는 부하 분석 기능을 이용하여 생산 계획을 평가한다. 다만, 생산 계획 시스템에서는 물리적인 제약 조건 등을 고려하지 않고, 단순히 표준 시수와 가중치 등을 고려하여 부하를 산출하기 때문에 정확한 부하를 산출할 수 없다. 생산 계획 담당자는 이러한 과정을 반복하여 생산 계획을 확정하고, 확정된 생산 계획을 기간 시스템에 입력하여 전사적으로 공유한다.

생산 계획 수립 시 공정 시뮬레이션 시스템을 활용하면 생산 계획 시스템 단독 활용 시 고려하지 못하였던 설비나 작업장의 물리적인 제약을 고려한 공정 부하 분석 결과를 바탕으로 보다 정교한 생산 계획을 수립할 수 있다. 이때에는 공정 시뮬레이션 시스템이 생산 계획 시스템과 연동되어 상세한 부하를 산출할 수 있도록 한다(Figure 56). 다만, 선박 건조 공정을 구성하고 있는 요소 중 물류 흐름을 고려하지 못한 상황에서 부하를 산출하기 때문에 트랜스포터의 사용량이나 도로 사용량과 같은 물류와 관련된 부하는 확인할 수 없는 한계가 있다.

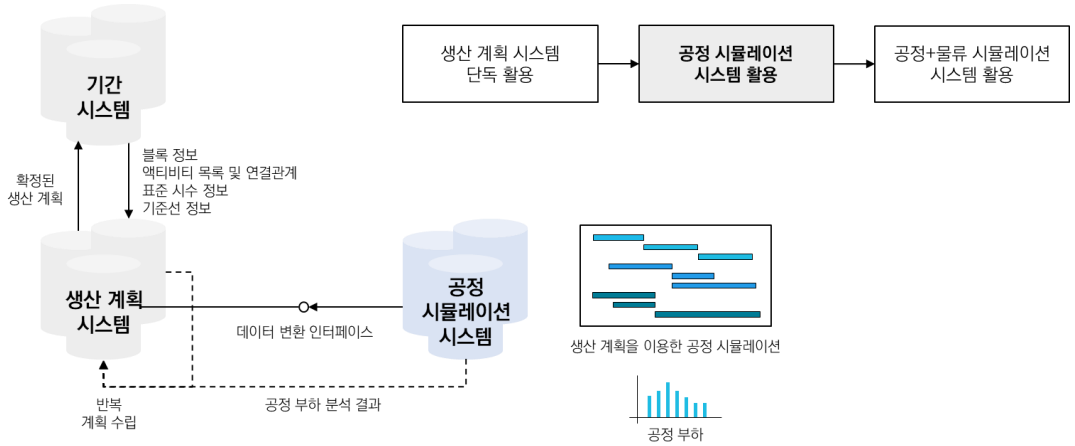


Figure 56 공정 시뮬레이션 시스템 활용 단계

이러한 한계점은 본 논문에서 제안하는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 이용하여 극복할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 물류 시뮬레이션 시스템은 기존의 공정 시뮬레이션 시스템에 지리 정보와 같은 공간 정보를 연동하여 정교한 공정 부하뿐만 아니라 정교한 물류 식별하고 산출할 수 있도록 한다(Figure 57). 기존의 생산 계획 시스템이나 공정 시뮬레이션 시스템에서는 선박 건조 공정을 구성하고 있는 물류 흐름을 식별할 수도 없었던 반면, 본 연구에서 제안하는 시스템은 단위 생산 공정뿐만 아니라 물류 프로세스에 따른 부하도 확인할 수 있도록 한다. 물론 기존의 공정 시뮬레이션 시스템에 비하여 고려해야할 대상이 많아지고 시뮬레이션 모델이 복잡해지기 때문에 결과를 도출하기 위하여 필요한 정보가 많아지고, 시뮬레이션 수행 시간이 증가할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 합리적인 결과를 도출할 수 있도록 공간 배치 로직을 사용자가 원하는 수준에 맞게 변경할 수 있도록 하였다.

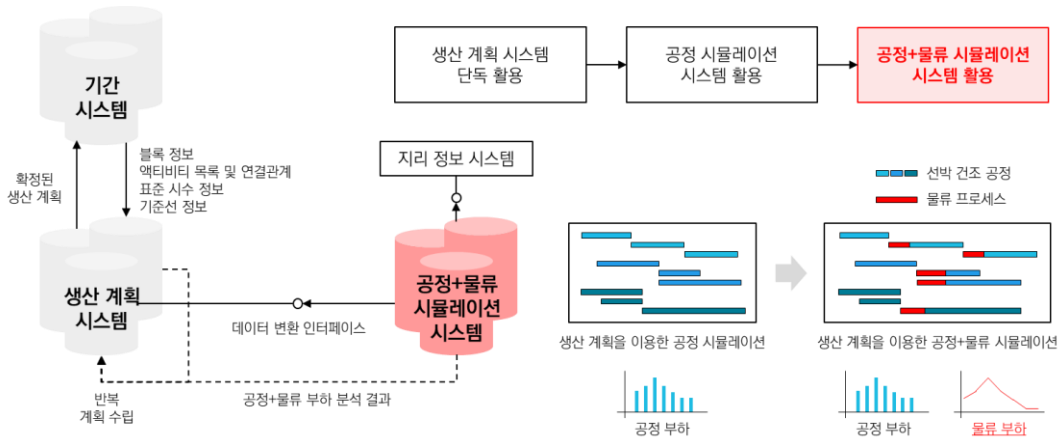


Figure 57 통합 물류 시뮬레이션 시스템 활용 단계

4.1.2 공간 배치 계획 수립

앞서 살펴본 바와 같이 조선소에서 공간은 매우 중요한 자원이다. 공간 활용 수준에 따라 동시에 작업할 수 있는 공정의 수가 증가될 수도 있으며, 단위 시간당 처리할 수 있는 제품의 수량도 증가할 수 있다. 하지만 기존의 생산 계획 시스템에서는 단위 생산 공정에 대해서만 계획을 수립하고 있다. 일부 개선된 시스템에서는 생산 계획 일정에 맞추어 자동으로 공간 배치 계획을 만들어주는 기능을 제공하기도 하지만, 물류 흐름과의 연계, 물리적인 제약 등이 고려되어 있지 않기 때문에 활용도가 매우 낮다. 일반적으로 조선소 생산 현장에서는 실행 계획에 맞추어 작업자가 경험을 바탕으로 입고된 제품의 위치를 결정하고 있다. 이러한 업무 프로세스는 현재의 시스템과 상황에서 효율적으로 운영되고 있지만, 의사 결정에 대한 근거가 부족하다는 한계가 있다.

본 연구에서 제안하고 있는 물류 시뮬레이션 시스템은 단위 생산 공정뿐만 아니라 적치 활동과 이송 활동에 대한 부하를 산출하는 기능을 제공한다. 기존의 생산 계획 시스템이나 공정 시뮬레이션 시스템에서는 단위 생산 공정 사이에서 나타나는 물류 흐름과 적치 활동을 식별할 수 없었다. 하지만 물류 흐름과 공간 배치를 고려한 물류 시뮬레이션 시스템에서 도출된 결과를 바탕으로 해당 제품이 투입될 작업장이나 적치장의 공간 배치 계획을 수립할 수 있다.

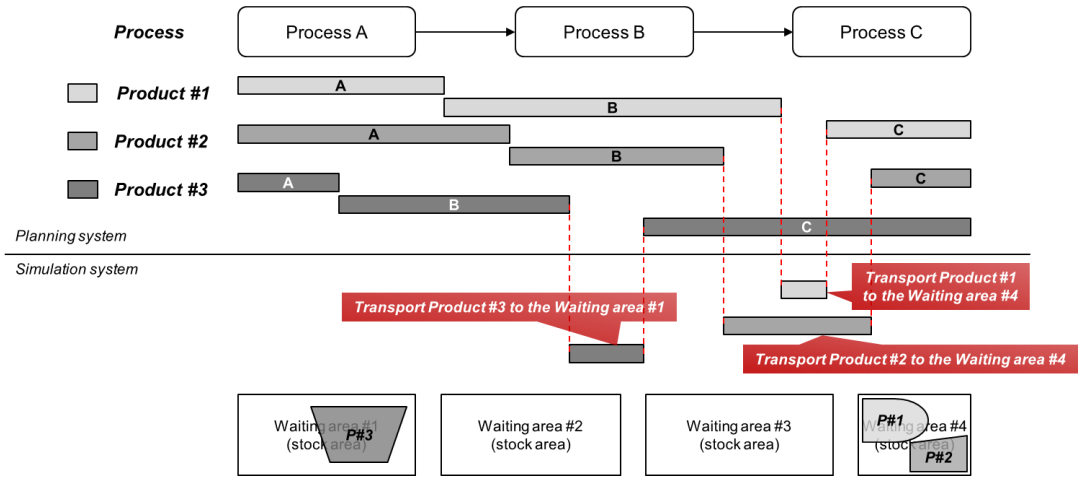


Figure 58 물류 시뮬레이션 결과를 이용한 공간 배치 계획 수립 방법

Figure 58 는 물류 시뮬레이션 시스템을 공간 배치 계획을 수립하는데 활용하는 방안을 나타낸다. 일반적으로 계획 시스템에서는 단위 생산 공정의 시작일과 종료일만 고려한다. 따라서 각 생산 공정 사이에 발생하는 잉여 기간에 대해서는 별도의 분석 결과를 도출할 수 없다. 하지만 물류 시뮬레이션 시스템에서는 생산 공정 사이에 발생하는 잉여 기간을 적치 활동으로 고려하여 해당하는 제품을 적치장으로 이동 시킨다. Figure 58 와 같이 일정이 진행되는 경우, 제품 3 은 가장 먼저 적치장 1 에 입고되고, 다음 생산 공정인 공정 C 가 실행되기 전 적치장 1 에서 출고된다. 그리고 제품 2 가 적치장 4 에 입고되고, 제품 1 이 적치장 4 에 입고, 제품 1 이 적치장 4 에서 출고, 제품 2 가 적치장 4 에서 출고되는 과정을 확인할 수 있다.

이처럼 물류 시뮬레이션 시스템을 이용하면 이전의 시스템에서 식별할 수 없었던 적치 활동에 해당하는 결과를 도출할 수 있으며, 해당 제품이 어떤 시점에 어떠한 적치장에 입고되는 지를 알 수 있기 때문에

이를 바탕으로 중장기적인 관점에서 적치장과 같은 공간의 활용 계획을 수립할 수 있다. 이는 조선소의 설비 투자를 위한 의사 결정을 내리는 근거로 활용할 수 있다.

4.1.3 트랜스포터 배차 계획 수립

조선소 물류 시뮬레이션 시스템은 앞서 살펴본 것과 같이 물류 흐름을 식별하는데 활용할 수 있으며, 적치 활동에 대한 분석 결과를 도출하고, 중장기적인 전략을 수립하는데 도움을 줄 수 있다. 그뿐만 아니라 이송 활동에 대한 분석 결과를 도출할 수 있는데, 이러한 결과는 제품을 이송하는데 사용되는 설비인 트랜스포터의 배차 계획을 수립하는데 활용할 수 있다.

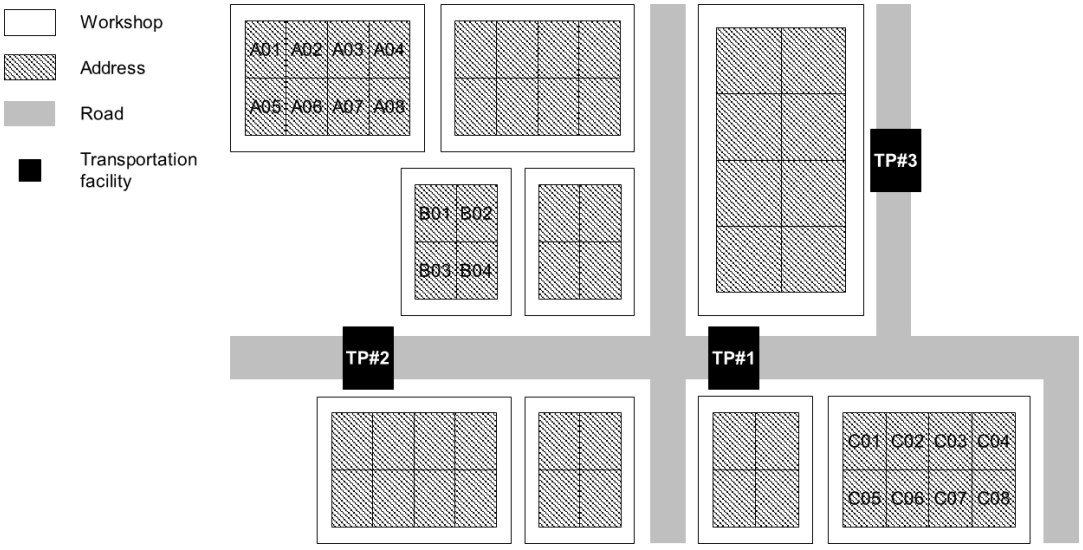


Figure 59 물류 시뮬레이션 시스템 개념도

Figure 59 는 물류 시뮬레이션을 수행하기 위한 도로 정보, 지번 정보, 이송 설비 정보를 나타낸다. 일반적으로 물류를 고려하지 않은 고정 시뮬레이션에서는 Table 16 과 같이 각 제품의 공정 별 시작일, 종료일 정

보만 확인할 수 있다. 하지만 물류 시뮬레이션 시스템에서는 Table 17와 같이 특정 날짜에 해당하는 블록의 이송 시작 시간, 출발 위치(지번), 도착 위치(지번)을 시뮬레이션 수행 결과로 출력한다. 이송 설비 배차 계획을 수립하는 작업자는 이러한 결과를 바탕으로 현재 트랜스포터의 위치, 출발 위치, 도착 위치, 도로 혼잡 현황 등을 고려하여 트랜스포터 배차 계획을 수립할 수 있다. 현재 조선소에서는 블록의 이송이 필요한 경우 별도의 시스템을 이용하여 이송 신청을 하고, 배차 계획 수립 담당자가 주기적으로 배차 계획을 수행하고 있다. 이때 트랜스포터를 배차하는 규칙은 정량적으로 비교된 결과가 아니며, 대부분 담당자의 경험에 따라 결정되고 있다.

Table 16 생산 계획 데이터 예시

제품	시작 위치 (지번)	도착 위치 (지번)	계획 시작일
P01	-	-	2017-12-01
P02	-	-	2017-12-01
P03	-	-	2017-12-01
P04	-	-	2017-12-01
P05	-	-	2017-12-01

Table 17 공정 시뮬레이션 결과 예시

제품	시작 위치 (지번)	도착 위치 (지번)	계획 시작일	운반 시작 시각
P01	A01	B02	2017-12-01	AM 09:01
P02	A08	C08	2017-12-01	AM 09:14
P03	B04	C05	2017-12-01	AM 09:20
P04	C06	B04	2017-12-01	AM 10:25
P05	A08	C08	2017-12-01	PM 01:03

Table 18 물류 시뮬레이션 결과 예시

제품	시작 위치 (지번)	도착 위치 (지번)	계획 시작일	운반 시작 시각	사용 설비	운반 종료 시각
P01	A01	B02	2017-12-01	AM 09:01	TP #1	AM 09:12
P02	A08	C08	2017-12-01	AM 09:14	TP #1	AM 09:23
P03	B04	C05	2017-12-01	AM 09:20	TP #2	AM 09:34
P04	C06	B04	2017-12-01	AM 10:25	TP #1	AM 10:40
P05	A08	C08	2017-12-01	PM 01:03	TP #3	PM 01:15

Table 18 은 물류 시뮬레이션 시스템에서 도출된 결과를 바탕으로 트랜스포터 배차 계획을 수립한 결과의 예시이다. 트랜스포터의 위치와 공주행 거리, 출발 위치, 도착 위치를 고려하여 트랜스포터 배차 계획을 수립할 수 있고, 중장기 계획을 바탕으로 트랜스포터 관리 계획을 수립할 수 있다.

4.2 시스템 적용 사례

4.2.1 트랜스포터 운영 전략 비교 시뮬레이션

조선소에서는 효율적으로 설비와 인력을 관리하기 위하여 권역을 조선소 사업장을 권역으로 나누어 트랜스포터를 운영하고 있다. 일반적으로 권역에 따라 트랜스포터를 운영하는 조직을 다르게 설정하고 있으며, 각각의 조직은 전사적인 관점에서 트랜스포터를 운영하기 보다는 각 조직의 이익을 창출하기 위하여 트랜스포터를 운영하는 전략을 수립하고 있다. 각 권역에 할당된 트랜스포터는 해당 권역에서 이송 신청을 받은 경우에만 사용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 트랜스포터 운영 전략이 실제로 조선소를 운영하는 관점에서 이익이 되는 전략인지 분석을 수행하였다.

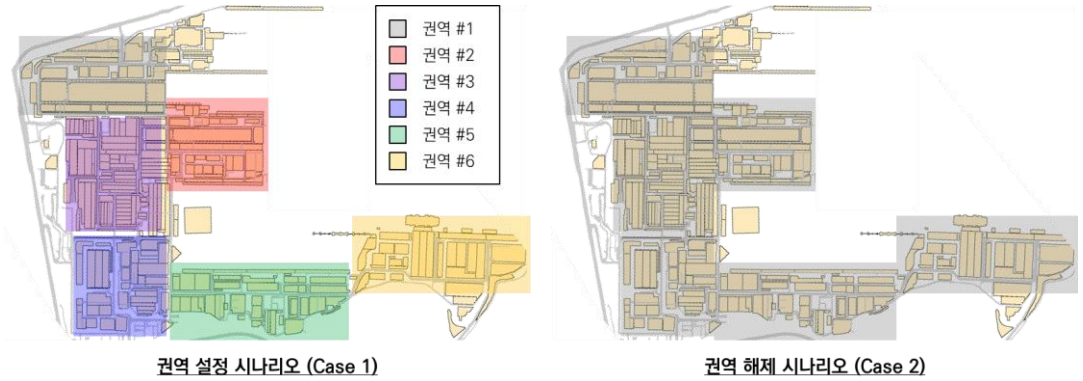


Figure 60 트랜스포터 운영 전략 시나리오

이를 위하여 Figure 60 과 같이 권역 설정 시나리오를 가정하였다. Figure 60 의 좌측 그림은 권역 설정 후 권역 별 사용 가능한 트랜스포터에 제약을 설정한 Case 1 이고, Figure 60 의 우측 그림은 권역 별 사용 가능한 트랜스포터 제약을 해제한 Case 2 이다. 그리고 Case 1 에서 권역 별로 사용 가능한 트랜스포터의 최대 용량과 수량은 Table 19 와 같으며, Case 2 에서는 권역을 해제하였기 때문에 Table 20 와 같이 모든 설비가 권역에 상관 없이 사용 가능하도록 가정하였다.

Table 19 권역 별 트랜스포터 정보 (시나리오 1)

권역	트랜스포터 최대 용량	수량
전체 권역	1000 Ton	2 대
권역 #1	600 Ton	1 대
	350 Ton	1 대
	500 Ton	1 대
권역 #2	500 Ton	2 대
	350 Ton	1 대
권역 #3	600 Ton	1 대
	500 Ton	1 대
	350 Ton	2 대
	300 Ton	1 대
	200 Ton	2 대
	100 Ton	1 대
권역 #4	600 Ton	1 대
	500 Ton	2 대
	350 Ton	2 대
권역 #5	500 Ton	1 대
	350 Ton	1 대
	300 Ton	1 대
	200 Ton	1 대
권역 #6	300 Ton	3 대
	100 Ton	1 대
합계		29 대

Table 20 권역 별 트랜스포터 정보 (시나리오 2)

권역	트랜스포터 최대 용량	수량
전체 권역	100 Ton	2 대
	200 Ton	3 대
	300 Ton	5 대
	350 Ton	7 대
	500 Ton	7 대
	600 Ton	3 대
	1000 Ton	2 대
합계		29 대

물류 시뮬레이션은 2017 년 5 월에서 6 월 사이의 공정이 포함된 제품 310 개를 대상으로 수행하였으며, 적치장과 작업장의 공간 제약은 별도로 설정하지 않았다. 따라서 적치장과 작업장의 용량 초과로 인한 지연은 발생하지 않도록 하였다. 그리고 트랜스포터의 경로 탐색 알고리즘은 최단 경로를 탐색할 수 있도록 Dijkstra 알고리즘을 적용하고, 트랜스포터를 할당 할 때에는 제품의 중량을 확인하여 사용 가능한 트랜스포터 중 가까운 위치에 있고, 최대 용량이 가장 작은 트랜스포터를 우선 적으로 할당하도록 하였다.

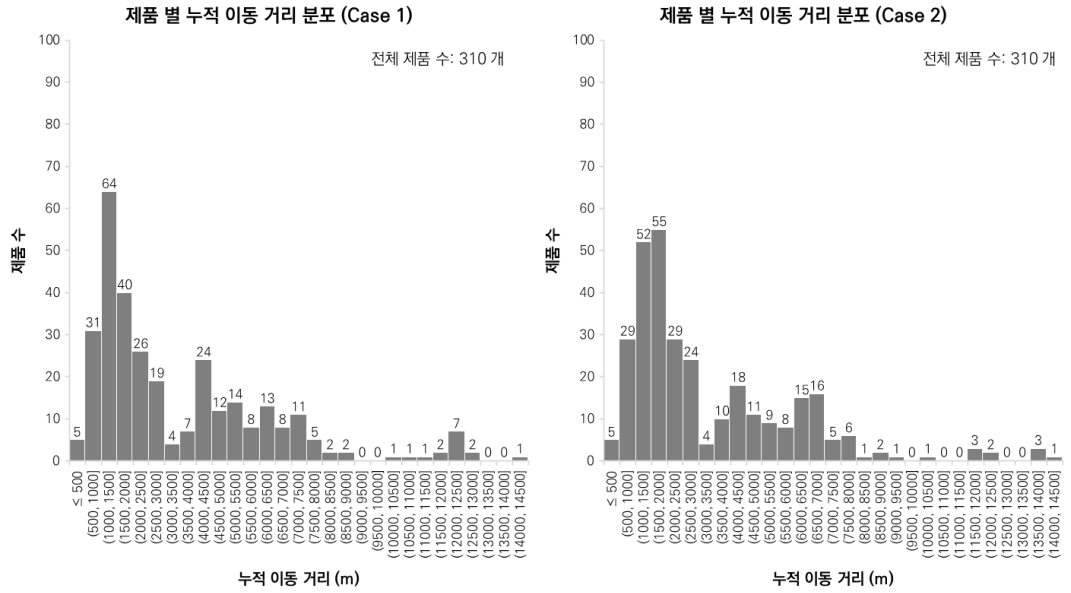


Figure 61 제품 별 누적 이동 거리 분포 비교

시뮬레이션 수행 결과 Figure 61 과 같이 제품 별 누적 이동 거리의 분포를 비교할 수 있었다. 두 가지 전략에 대하여 크게 차이가 없는 누적 이동 거리 분포를 보이고 있었으나, Case 1 의 결과는 Case 2 의 결과에 비하여 이동 거리가 1,000m 에서 1,500m 인 경우에 제품이 집중된 것을 확인할 수 있었다. 다만, 권역을 해제한 Case 2 는 Case 1 에 비하여 제품 별 누적 이동 거리가 더 긴 경향을 보일 것으로 예상하였으나, 큰 차이가 없는 결과를 보이고 있다.

다음으로 Figure 62 은 트랜스포터 용량 별 누적 이동 거리를 나타낸다. 권역이 설정되어 있던 Case 1 은 총 이동 거리가 1,157.24km 로 산출되었으며, 권역을 해제하였던 Case 2 는 총 이동 거리가 962.07km 로 산출되었다. 그리고 누적 이동 거리의 분포는 Case 1 은 최대 용량이 350 톤과 500 톤인 트랜스포터가 주로 사용된 것을 보이고 있으며,

Case 2 는 Case 1 에 비하여 최대 용량이 1,000 톤인 대형 트랜스포터가 많이 사용된 것을 보이고 있다. 이는 Case 1 에서는 권역 내에 사용 가능한 트랜스포터가 있는 경우 전지역에서 사용 가능한 최대 용량 1,000 톤급 트랜스포터의 우선 순위가 낮기 때문으로 예상할 수 있다. 그리고 Case 2 의 총 이동 거리가 Case 1 에 비하여 더 짧게 산출된 것으로 보아 권역을 설정하여 트랜스포터를 운영하는 것이 이동 거리 관점에서는 불리한 전략임을 확인할 수 있다.

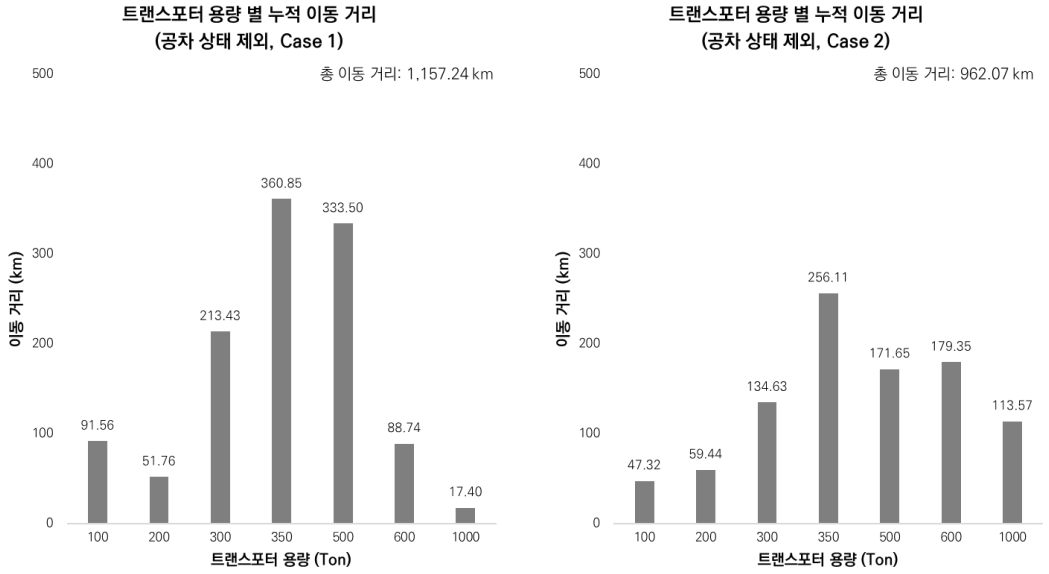


Figure 62 트랜스포터 용량 별 누적 이동 거리 분포 비교 (1)

트랜스포터의 이동 거리는 물류 시뮬레이션의 결과를 정량적으로 비교할 수 있는 지표 중에 하나이지만, 조선소를 전사적으로 운영하는 관점에서는 이동 거리 이외에도 추가로 고려해야할 지표가 있다. 본 논문에서는 트랜스포터의 이동 거리를 비용 관점에서 비교 분석할 수 있도록 트랜스포터 이동 거리와 운반한 블록의 중량, 사용한 설비의 최대 용량을 고려한 환산 비용을 지표로 선정하였다. 트랜스포터는 연료를 소모하며 제품을 이동하는 설비이기 때문에 이동 거리가 짧을수록 연료비를 절감할 수 있다. 또한 이동 거리가 동일한 경우에는 운반한 블록의 중량이 가벼울수록 비용이 절감된다. 마지막으로 트랜스포터의 최대 용량이 작은 이동 설비일수록 운영 비용이 적게 들 것으로 가정하였으며, 이러한 가정을 토대로 트랜스포터 운영에 따른 환산 비용은 트랜스포터 이동 거리, 운반한 블록의 중량, 사용한 설비의 용량에 비례한다고 가정하고 결과를 분석하였다.

Table 21 트랜스포터 운영 전략에 따른 시뮬레이션 결과 비교 (1)

구분	권역 설정 여부	설비 용량 조건	누적 이동 거리 합계 (km)	환산 비용 합계 (Case 1 기준)
Case 1	권역 설정	기본	1,157.24	1.000
Case 2	권역 해제	기본	962.07	0.992

분석한 결과는 Table 21 과 같으며, Case 1 의 환산 비용을 1.000 으로 하였을 때, Case 2 의 환산 비용은 0.992 로 계산 되었다. 이러한 결과를 종합해보면, 권역 설정과 해제에 따른 제품 별 누적 이동 거리 분포에는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 하지만, 권역을 해제하였을 때에는 트랜스포터의 누적 이동 거리가 약 16.87% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한 최대 용량이 큰 트랜스포터의 이동 거리가 17.40km 에서 113.57km 로 급격하게 증가하여, 이동 거리가 줄어든 것에 비하여 환산 비용이 크게 줄어들지 않은 것을 확인할 수 있었다.

Table 22 트랜스포터 운영 전략에 따른 시뮬레이션 결과 비교 (2)

구분	권역 설정 여부	설비 용량 조건	누적 이동 거리 합계 (km)	환산 비용 합계 (Case 1 기준)
Case 1	권역 설정	기본	1,157.24	1.000
Case 2-1	권역 해제	기본	962.07	0.992
Case 2-2	권역 해제	제한 해제	670.01	1.7998

트랜스포터의 최대 용량에 따른 환산 비용을 자세히 분석하기 위하여 앞서 가정한 Case 2 의 트랜스포터 최대 용량을 1,000 톤으로 변경하고 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Table 22 은 설비 용량 조건이 해제된 경우가 추가된 결과를 나타낸다. 결과를 분석해보면 권역과 설비 용량 조건을 모두 해제한 경우, 누적 이동 거리가 Case 1 에 비하여 42.10% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 이송할 제품의 중량과 관계 없이 가장 가까운 트랜스포터를 사용했기 때문이다. 하지만, 환산 비용에 영향을 주는 설비의 최대 용량이 증가하였기 때문에 환산 비용이 Case 1 에 비하여 78.98% 증가한 결과를 보였다.

Table 23 트랜스포터 운영 전략에 따른 시뮬레이션 결과 비교 (3)

구분	권역 설정 여부	설비 용량 조건	누적 이동 거리 합계 (km)	환산 비용 합계 (Case 3 기준)
Case 3	권역 설정	기본	341.77	1.000
Case 4	권역 해제	기본	314.82	0.8540

다음으로 동일한 조건에 대하여 투입하는 제품을 310 개에서 80 개로 감소시키고 물류 시뮬레이션 결과를 비교해보았다. Table 23 은 권역을 설정한 경우와 권역을 설정하지 않은 경우에 대하여 누적 이동 거리 합계와 환산 비용 합계를 비교한 결과를 나타낸다. 그리고 Figure 63 는 트랜스포터 용량 별 누적 이동 거리 분포를 나타내며, Figure 64 은 트랜스포터 1 회 운행 당 평균 이동 거리를 비교한 결과를 나타낸다.

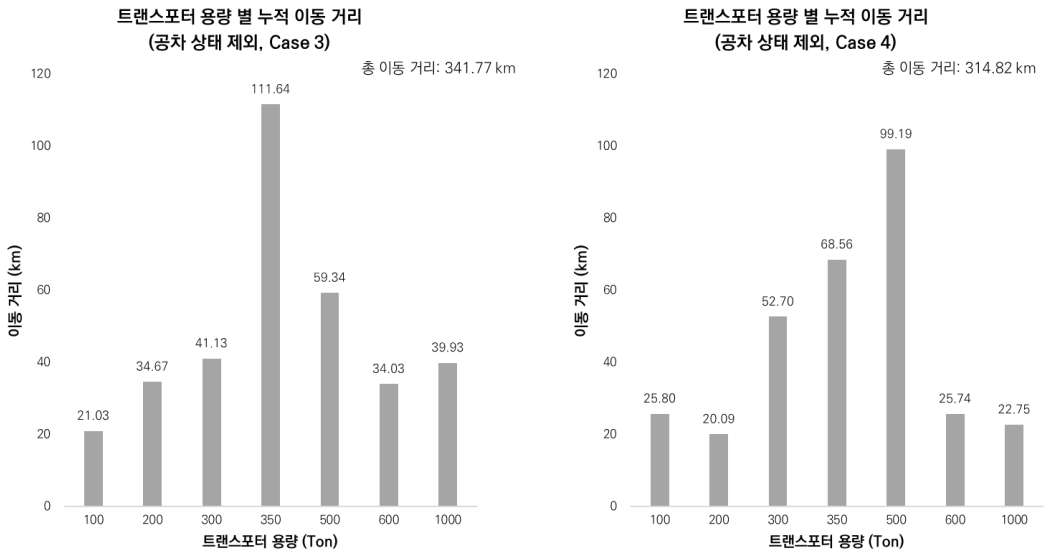


Figure 63 트랜스포터 용량 별 누적 이동 거리 분포 비교 (2)

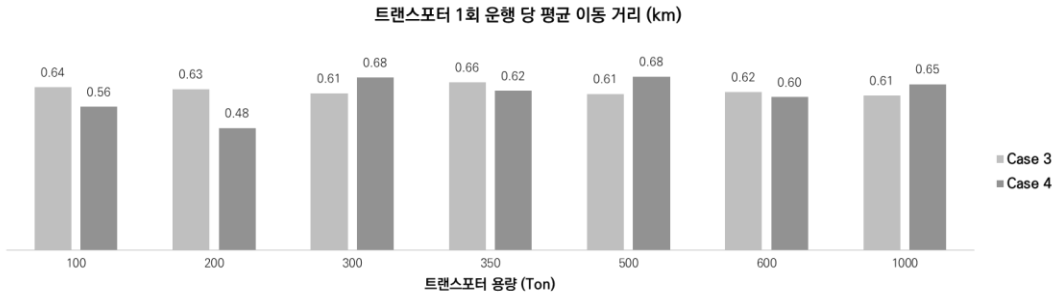


Figure 64 트랜스포터 1 회 운행 당 평균 이동 거리 비교

결과를 분석해보면, 권역을 해제하였을 때, 트랜스포터의 누적 이동 거리가 Case 3 에 비하여 약 7.89% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 권역을 해제하였을 때, 기존의 분석 결과(Case 1 vs. Case 2)와 달리, 환산 비용도 14.60% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 권역을 해제하고 설정하는 것보다는 어떠한 데이터를 입력하는지에 따라 누적 이동 거리나 환산 비용의 결과가 다르게 도출될 수 있음을 의미한다. 이는 물류 시뮬레이션 시스템이 다양한 운영 전략에 대한 의사 결정을 지원할 수 있는 도움이 되는 정량적인 결과를 하는 것으로 볼 수 있다. 물류 시뮬레이션 시스템은 시뮬레이션 모델과 계획 정보를 바탕으로 트랜스포터와 제품의 누적 이동 거리, 트랜스포터 운영 비용, 트랜스포터 1 회당 평균 이동 거리와 같은 다양한 결과를 정량적으로 산출하는데 도움을 주는 것을 확인하였다.

4.2.2 선행 탑재장 배치 시뮬레이션[3]

다음으로 본 논문의 3.1.3 절에서 제안한 선행 탑재장의 효율적인 공간 활용 방법을 실제 조선소 데이터에 적용해보았다. 3.1.3 절에서 제안한 알고리즘은 탐욕 알고리즘을 기반으로 꼬인 형상(TWist shape, TW)의 개수를 평가 요소로 하고 있기 때문에 Greedy-Twist (Greedy-TW) 알고리즘으로 이름을 정하였으며, 이 알고리즘이 선행 탑재장 배치 문제와 같이 배치 대상의 크기가 큰 경우에 효과가 있음을 보이기 위하여 문제를 가정하였다.

이를 위하여 조선소 두 곳의 데이터를 바탕으로 제품의 조립 단계에 따른 기하학적 특성을 분석하였다. 조선소에서 선박을 생산하기 위하여 만드는 중간 제품은 조립 단계에 따라 소조립 블록, 조립 블록, 1 차 PE 블록, 2 차 PE 블록으로 구분할 수 있으며, 일반적으로 조립 단계가 진행될수록 제품의 크기와 중량이 증가한다. 본 연구에서는 국내 중형 조선소 A 사의 39 개 프로젝트 내 블록 15,106 개 데이터와 국내 중형 조선소 B사의 11개 프로젝트 내 블록 3,080개 데이터를 분석하여 장축의 길이와 단축의 길이 그리고 면적의 평균 값과 표준 편차를 계산하였다. 분석한 결과 Figure 65 과 같은 결과가 도출 되었으며, 이 값을 이용하여 Table 24 와 같은 실험 케이스 별 배치 대상 200 개를 임의로 생성하였다. 예를 들어 Case 5 는 1 차 PE 블록 40 개, 2 차 PE 블록 160 개로 구성되어 있으며, 배치 대상의 장축 길이와 단축 길이는 Figure 65 에서 도출된 평균 값과 표준 편차를 이용하여 정규 분포를 갖도록 임의로 생성하였다. 배치 대상이 선행 탑재장에 투입되고 반출되는 일정은 모든

[3] 이 절의 내용은 Jeong et al. (2018) 논문의 내용을 요약하여 다시 정리하였음.

실험 케이스가 동일한 조건을 갖도록 하였으며, 시뮬레이션 수행 기간은 2014 년 12 월 10 일부터 2015 년 7 월 22 일까지로 하였으며, 본 연구에서 제안한 Greedy-TW 알고리즘과 기본 배치 알고리즘인 BLF 알고리즘 적용 결과를 비교하였다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 선행 탑재장 배치 문제는 Case 5 에서 정의한 문제와 가장 유사하다.

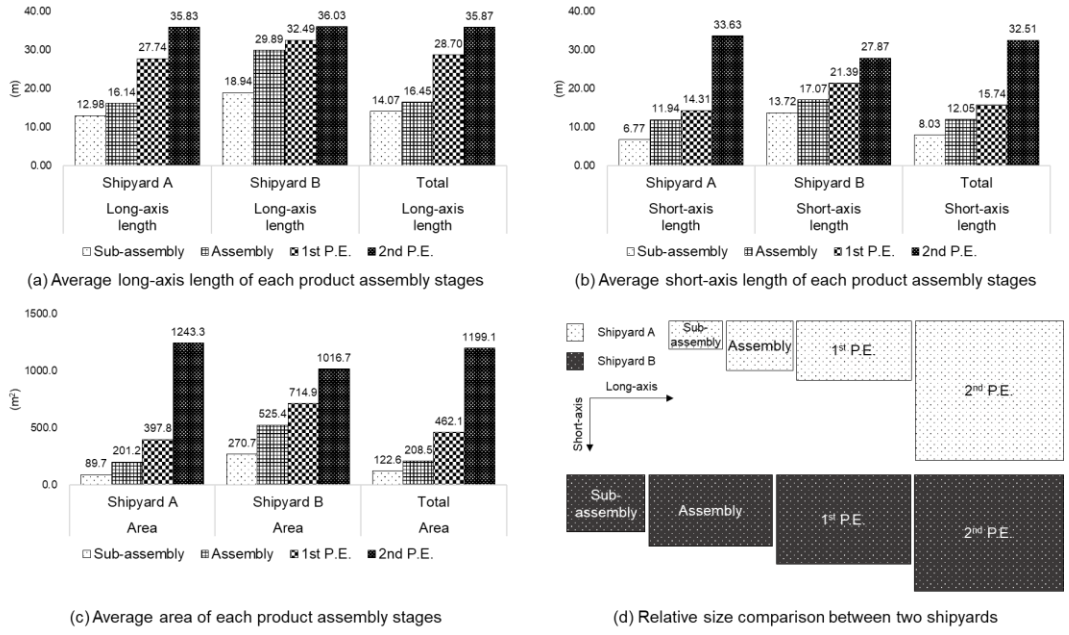


Figure 65 블록의 조립 단계 별 기하학적 특성 분석 결과

Table 24 실험 케이스 별 배치 대상 혼합 비율

구분	배치 문제 유형		배치 대상 혼합 비율 (200 개)				배치 영역 크기
	공간	제품	소조립 블록	조립 블록	1 차 PE 블록	2 차 PE 블록	폭×길이(m)
Case 1	작업장	소조립	100%	-	-	-	20×100
Case 2		조립	-	100%	-	-	30×150
Case 3	적치장	소형 블록 #1	50%	30%	20%	-	200×200
Case 4		대형 블록 #1	-	20%	30%	50%	100×300
Case 5		대형 블록 #2	-	-	20%	80%	100×300

Figure 66 는 선행 탑재장 공간 배치 시뮬레이션 수행 기간 내 면적 활용률 변화 추이를 나타내고 있다. 실선으로 표시된 그래프가 본 연구에서 제안한 Greedy-TW 알고리즘의 결과를 나타내고 있으며, Case 5 의 경우 그래프에 나타난 것과 같이 Greedy-TW 알고리즘 적용 시, 전체 시뮬레이션 기간 225 일 중 211 일 동안 면적 활용률이 평균 6.18% 높게 도출 된 것을 확인할 수 있었다. 다른 실험 케이스에 대해서는 Greedy-TW 알고리즘의 결과와 BLF 알고리즘 적용 결과에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 Greedy-TW 알고리즘은 기존의 다양한 공간 배치 문제에 대해서도 적용할 수 있으며, 특히 선행 탑재장과 같이 배치 대상의 크기가 상대적으로 큰 배치 문제에서 우수한 결과를 도출한다는 것을 확인할 수 있다.

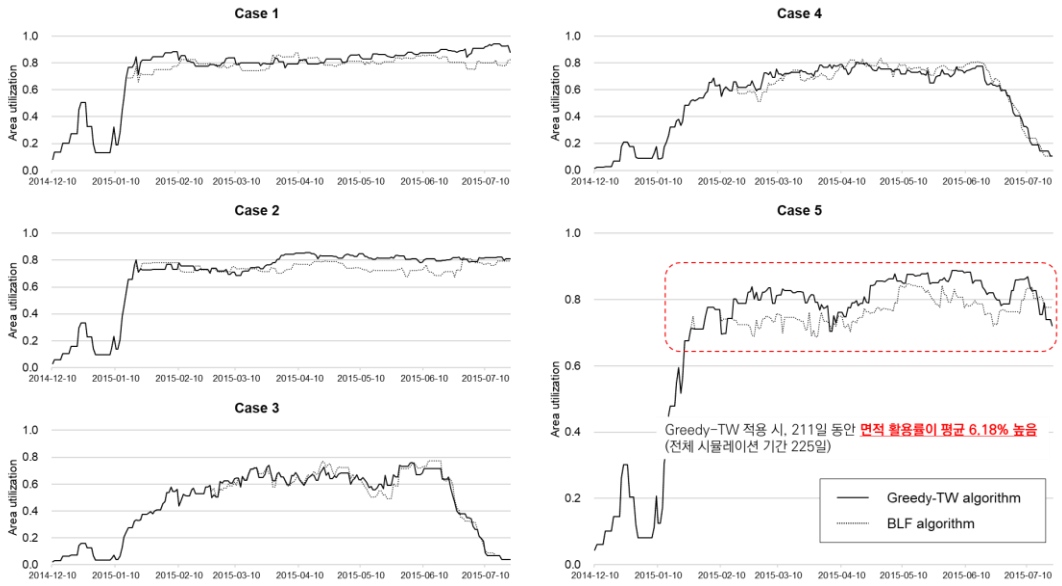


Figure 66 배치 알고리즘에 따른 면적 활용률 변화 추이

다음으로 Figure 67 은 Case 5 에 대하여 BLF 알고리즘과 Greedy-TW 알고리즘의 면적 활용률이 최대인 날짜의 배치 현황을 비교한 결과이다. BLF 알고리즘을 적용했을 때에는 2015 년 5 월 12 일에 면적 활용률이 84.77%로 가장 높았다. 그런데 동일한 날짜에 Greedy-TW 알고리즘을 적용한 경우에는 면적 활용률이 87.60%로 더 높은 것을 확인할 수 있다. 실제로 Greedy-TW 알고리즘을 적용했을 때에는 2015 년 6 월 3 일에 88.83%의 가장 높은 면적 활용률을 보였다. Figure 67 에 따르면 비점유 공간의 형상이 복잡하게 만들어진 BLF 알고리즘의 경우에는 남아 있는 면적이 넓은 경우에도 새로운 배치 대상이 위치할 곳이 부족한 것을 확인할 수 있다. 반면 Greedy-TW 알고리즘은 비점유 공간의 형상이 비교적 단순한 형태로 유지되어 배치 영역을 효율적으로 활용할 수 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 Greedy-TW 알고리즘으로 배치한 결과는 면적 활용률이 높을 뿐만 아니라 실제로 공간이 효율적으로 활용되었음을 알 수 있다.

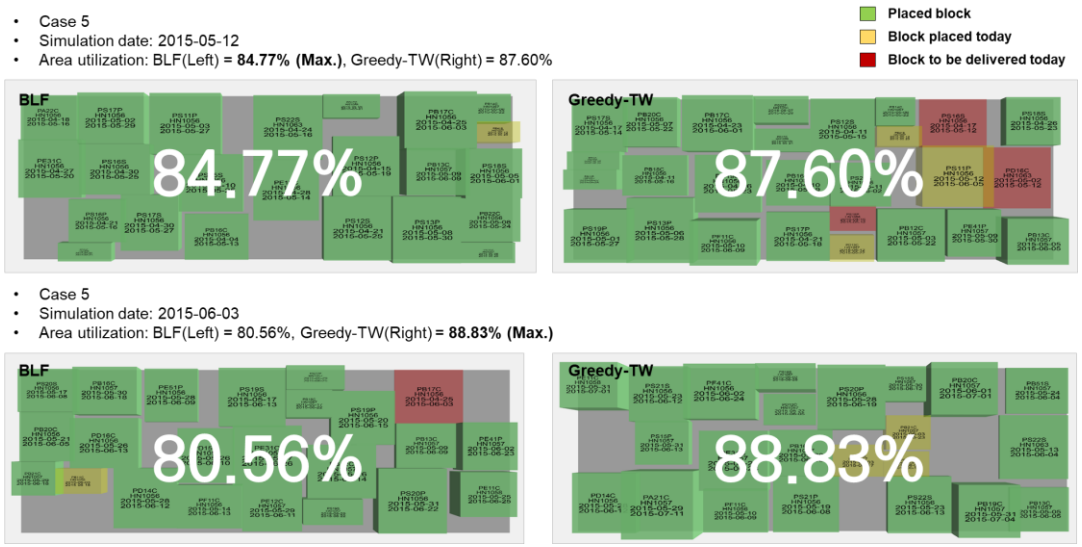


Figure 67 배치 알고리즘에 따른 배치 현황 비교

정해진 공간을 특정 기간 동안 효율적으로 활용하기 위해서는 공간이 전체적으로 균일하게 점유되어야 한다. 이를 확인하기 위하여 선행 탑재장 배치 문제에 대하여 위치 별 누적 배치일 평균 값과 표준 편차 값을 비교해보았다. 선행 탑재장 배치 문제에서 특정한 위치가 점유되었는지 여부는 식 (1)에서 정의한 것과 같이 시간 t에서 단위 격자 c_{ij}의 점유 여부를 나타내는 변수인 β_{ijt}를 이용하여 표현할 수 있다. 이 값은 시간 t에서 단위 격자 c_{ij}가 점유되어 있는 경우 1 이 되며, 그렇지 않은 경우에는 0 이 된다. 이를 그림으로 나타내면 Figure 68 와 같다.

$$\beta_{ijt} = \begin{cases} 1 & if\ unit\ cell\ c_{ij}\ is\ occupied\ at\ t \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

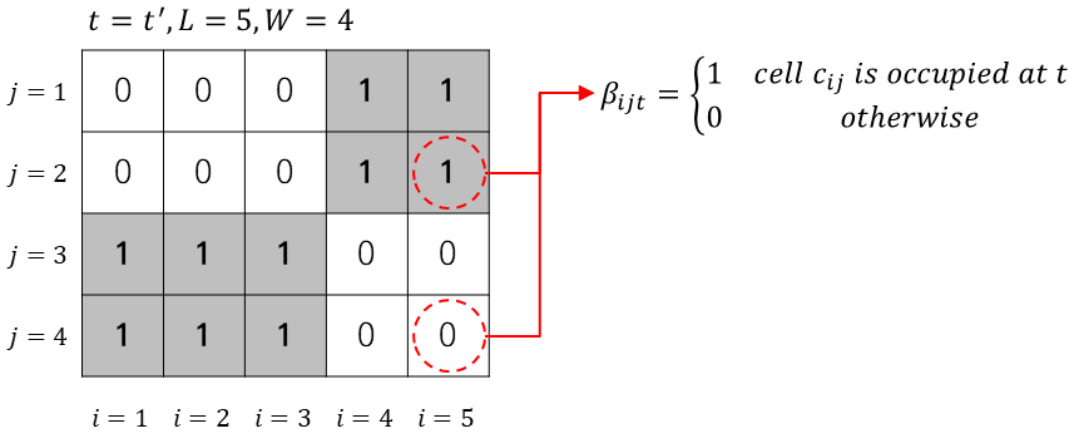


Figure 68 선행 탑재장 배치 문제의 단위 격자 표현 방법 정의

그리고 이 값을 이용하여 단위 격자 c_{ij}의 누적 점유일 COD_{ij}를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$COD_{ij} = \sum_{t} \beta_{ijt} \tag{2}$$

시뮬레이션 기간 중 배치 영역의 활용 수준을 나타내는 지표인 $\overline{COD_{ij}}$ 값은 식 (2)에서 정의한 값의 평균 값이며, 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 이때, L은 배치 영역을 구성하는 단위 격자의 가로 방향 개수이며, W는 폭 방향 개수를 나타낸다. 또한, 시뮬레이션 기간 중 배치 영역의 활용 편차를 나타내는 지표인 σ 값은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\overline{COD_{ij}} = \frac{COD_{ij}}{LW} \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (COD_{ij} - \overline{COD_{ij}})^2}{LW}} \tag{4}$$

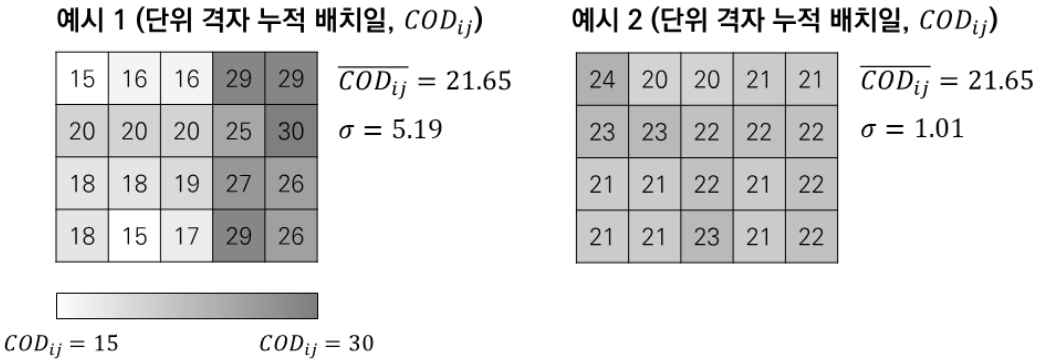


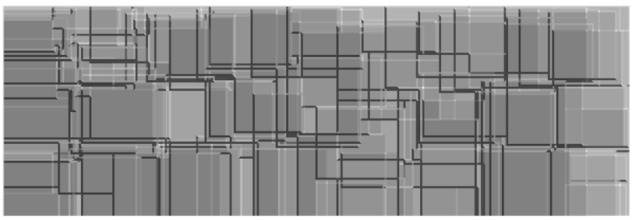
Figure 69 단위 격자 누적 배치일 비교

Figure 69 는 동일한 $\overline{COD_{lj}}$값을 가진 결과에 대해서도 σ 값에 따라 배치 영역을 활용하는 수준의 분포가 다를 수 있음을 보이고 있다. 모두 $\overline{COD_{lj}} = 21.65$ 이지만, σ 값이 5.19 인 좌측 그림의 배치 현황은 우측에 집중되어 있음을 알 수 있고, σ 값이 1.01 인 우측 그림은 비교적 골고루 배치 영역이 활용된 것을 확인할 수 있다.

Table 25 배치 알고리즘 적용 결과 비교

평가 지표	Case 4		Case 5	
	(a) BLF	(b) Greedy-TW	(a) BLF	(b) Greedy-TW
$\overline{COD_{lj}}$	123.31	120.28	136.97	144.59
σ	33.92	36.35	40.28	37.09

Case 4 와 Case 5 에 대하여 식 (3)과 식 (4)에서 정의한 평가 지표인 단위 격자의 누적 배치일 평균 값과 표준 편차 값을 비교하였으며, 그 결과는 Table 25 과 같다. 결과를 확인해보면, Case 5 에서는 Greedy-TW 알고리즘 적용 시 배치 영역이 비교적 고르게 활용된 것을 확인할 수 있었다. BLF 알고리즘 적용 결과에 비하여 단위 격자의 누적 배치일 평균 값은 5.56% 증가 하였고, 표준 편차 값은 7.92% 감소하였다. 이는 Greedy-TW 알고리즘을 적용하였을 때, 배치 영역의 활용 수준은 증가하고 편차는 감소하여 배치 영역이 고르게 활용되었음을 의미한다. Figure 70 은 Case 5 에 대하여 BLF 알고리즘을 적용한 결과와 Greedy-TW 알고리즘을 적용한 결과의 누적 배치일 분포 현황을 나타낸다. 시각적으로도 Greedy-TW 알고리즘을 적용한 결과가 균일하게 면적이 활용되었음을 알 수 있다.



• 공간 배치 방법: BLF 알고리즘
• $\overline{COD_{ij}} = 136.97$
• $\sigma = 40.28$

• 공간 배치 방법: Greedy-TW 알고리즘
• $\overline{COD_{ij}} = 144.59$
• $\sigma = 37.09$

Figure 70 단위 격자 누적 배치일 분포 현황 비교

마지막으로 모든 실험 케이스에 대하여 배치 시뮬레이션이 종료되는 시점까지 배치되지 않은 블록의 수, 초기 계획 대비 지연된 블록의 수, 지연된 모든 블록의 지연 일의 총합, 그리고 계산 시간을 비교하였다. 비교한 결과를 도식화하면 Figure 71 과 같다. Greedy-TW 알고리즘은 BLF 알고리즘에 비하여 모든 케이스에서 배치되지 않은 블록의 수가 적었으나, 초기 계획 대비 지연된 블록의 수는 오히려 증가한 경우도 있었다.

하지만 지연된 모든 블록의 지연 일의 총합을 비교해보면, Greedy-TW 알고리즘이 대형 블록 공간 배치 계획 문제에서 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 소형 블록이 다수인 Case 1 과 Case 2 에서는 지연 일의 총합이 비슷하거나 소폭 감소하였다. 하지만 대형 블록의 비율이 높은 Case 4 와 Case 5 에서는 Greedy-TW 알고리즘을 적용한 경우 지연 일의 총합이 각각 18.3%, 26.1% 감소한 것을 볼 수 있다.

이러한 결과를 통하여 본 논문에서 제안하는 Greedy-TW 알고리즘은 다양한 문제에서도 기존 알고리즘과 유사한 성능을 보이고 있으며, 특히 선행 탑재장 배치 문제와 같이 배치 대상의 크기가 상대적으로 큰 경우에 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

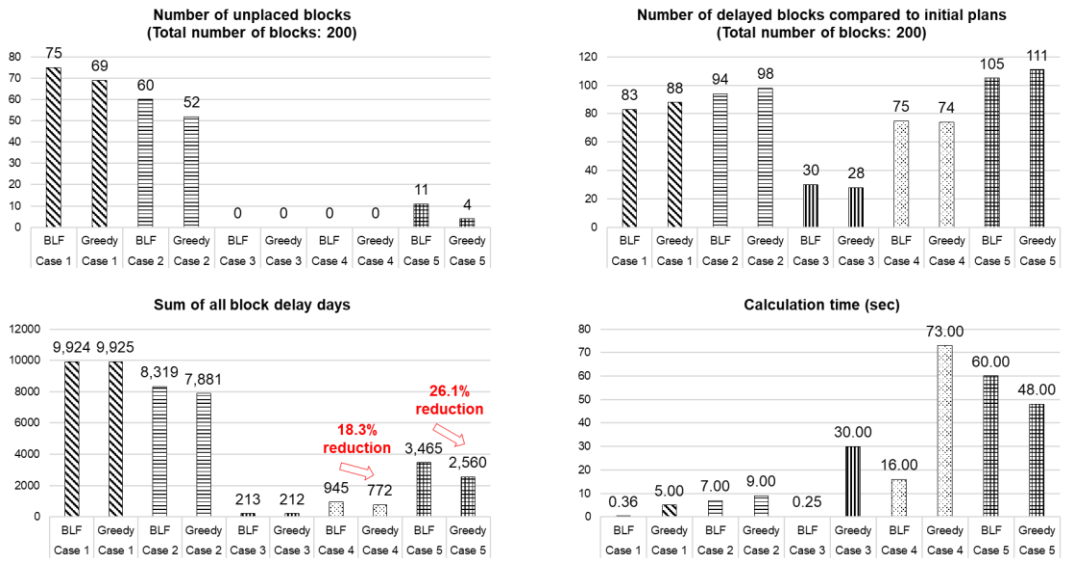


Figure 71 공간 배치 시뮬레이션 결과 종합 비교

4.2.3 공간 활용을 고려한 물류 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 조선소 물류 시뮬레이션 시스템은 물류 흐름을 상세화하여 이송 활동과 적치 활동으로 나누어 시뮬레이션을 수행하고 있으며, 물류 흐름과 적치 활동은 독립적으로 수행되는 것이 아니라 상호 작용을 하며 수행된다. 이 절에서는 가상의 모델을 가정하여 적치장 공간 활용 전략을 수량, 면적, 위치를 기준으로 하였을 때 결과에 어떠한 변화가 있는지를 분석하였다.

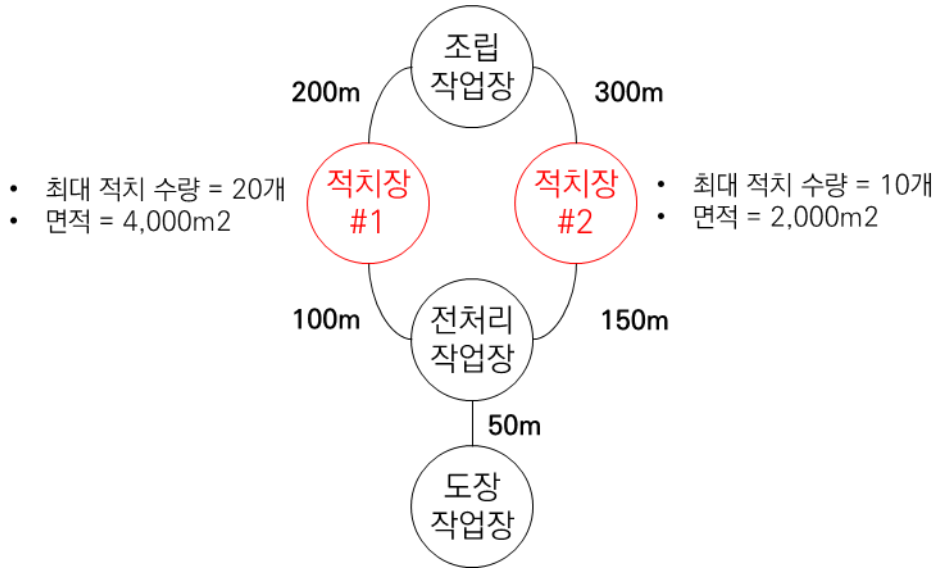


Figure 72 공간 활용을 고려한 물류 시뮬레이션 예제 모델 기본 정보

Figure 72 은 가상으로 정의한 물류 시뮬레이션 모델을 개략적으로 나타내고 있다. 대상으로 하는 공정은 조립, 전처리, 도장 3 개의 공정이고 시뮬레이션 대상 제품은 조립 블록 단계의 30 개 제품이다. 시뮬레이션

수행 시에는 적치장 1, 2 의 최대 적치 수량과 면적 제약 조건을 Figure 72 에 나타낸 것과 같이 설정하였고, 전처리, 도장 작업장은 최대 수량과 면적 제한이 없도록 설정하였다. Figure 73 는 시뮬레이션 대상 제품 30 개의 일정 정보를 나타낸다. 조립 공정과 전처리 공정 사이에는 적치 활동이 생길 수 있도록 일정을 생성하였다.

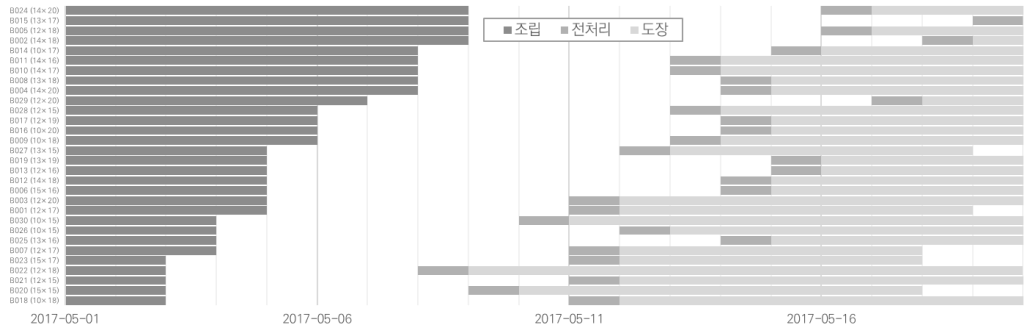


Figure 73 시뮬레이션 대상 제품의 일정 정보

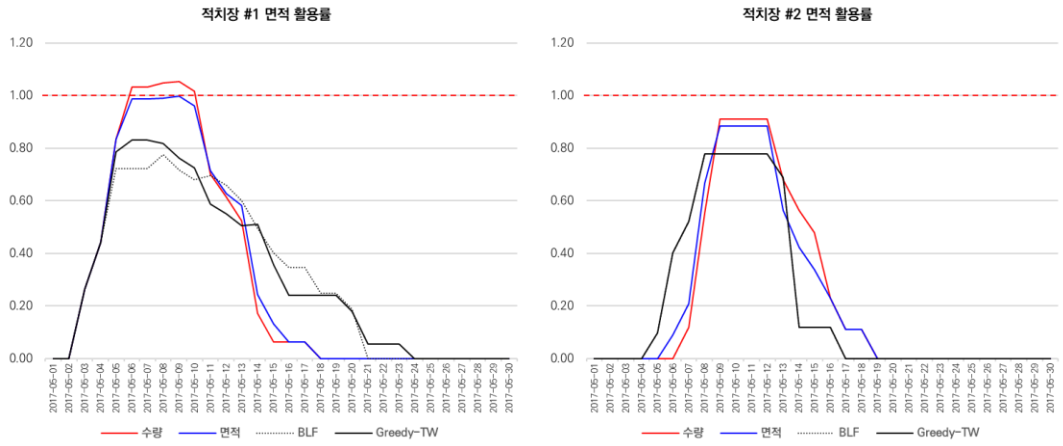


Figure 74 적치장 공간 활용 전략 따른 면적 활용률 변화 추이 비교

Figure 74 은 수량, 면적, 그리고 두 가지 배치 알고리즘을 적용하였을 때 적치장 1과 적치장 2의 면적 활용률 변화를 나타낸다. 수량을 기준으로 적치장에 제품을 투입한 경우에는 면적 활용률이 1.0 을 초과하는 결과가 도출되며, 이는 유효하지 않은 결과이다. 그리고 면적을 기준으로 적치장에 제품을 투입한 경우에도 면적 활용률이 1.0 에 아주 근접한 결과가 도출된다. 이 결과 또한 실제로는 제품의 형상을 고려해야하기 때문에 유효하지 않은 결과이다. BLF 알고리즘과 Greedy-TW 알고리즘과 같이 실제로 제품의 위치를 고려하여 배치를 한 경우에는 두 적치장 모두 0.80 정도의 최대 면적 활용률을 가졌으며, 수량이나 면적을 기준으로 배치하였을 때보다 작업 기간이 지연된 것을 확인할 수 있다.

Table 26 은 적치장 공간 활용 전략에 따른 계산 시간, 지연 블록 수, 누적 지연일, 최대 면적 활용률, 누적 이동 거리, 그리고 환산 비용을 정리한 결과이다. 적치장 공간 활용 전략에 따라 지연일, 이동 경로, 이동 비용에 차이가 있음을 확인할 수 있고, 이를 통하여 물류 시뮬레이션 수행 시 공간 배치 결과가 물류 흐름에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

Table 26 적치장 공간 활용 전략에 따른 물류 시뮬레이션 결과 비교

배치 기준 구분	계산 시간 (ms)	지연 블록 수 (개)	누적 지연일 (일)	최대 면적 활용률 (%)	누적 이동 거리 (m)	환산 비용 (Greedy-TW 기준)
수량	-	0	0	1.0542	11,700	1.016
면적	-	1	2	0.9978	11,700	1.013
BLF	101	8	25	0.7745	11,550	1.000
Greedy-TW	647	6	23	0.8308	11,550	1.000

제 5 장

결 론

5.1 결론

본 연구에서는 선박 건조 공정과 공간 배치, 물류 흐름을 연계하여 시뮬레이션하기 위한 시스템과 모델, 그리고 활용 방안과 적용 효과를 분석하였다. 또한, 조선소 내부에서 일어나는 물류 현상 뿐만 아니라 조선소를 중심으로 다양한 이해 당사자를 통합하여 고려할 수 있도록 조선 산업의 특성을 고려한 다중 계층 공급망 모델을 Figure 75 과 같이 정의하였다. 이를 위하여 일반 제조업, 프로젝트 산업의 공급망 특징을 분석하고 조선 산업과의 유사점, 차이점 등을 분석하였다.

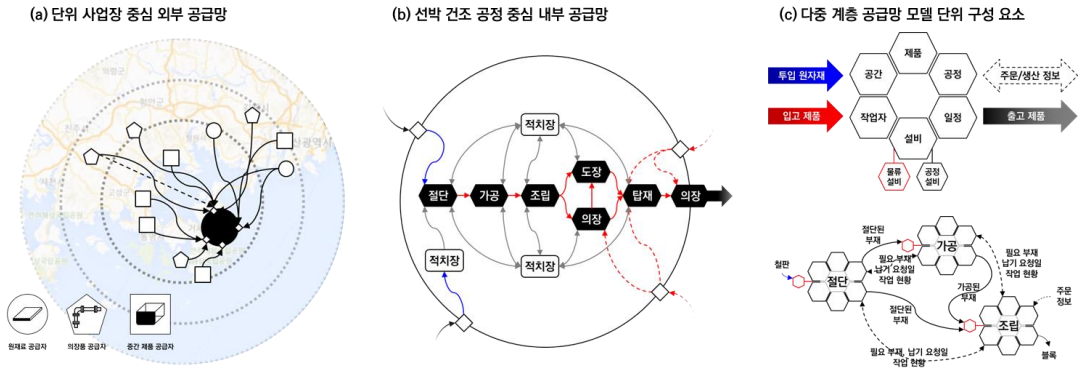


Figure 75 조선 산업 다중 계층 공급망 모델

본 연구에서 제안한 조선 산업의 특징을 고려한 다중 계층 공급망 모델은 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층, 조선소 내부 공급망, 그리고 다중 계층 공급망 모델을 구성하는 단위 구성 요소로 구분할 수 있다. 단위 조선소를 중심으로 한 외부 공급망 계층은 단위 조선소와 외부 협력사의 관계, 그리고 구성 요소를 정의하고 있으며, 조선소 내부 공급망 계층에서는 조선소 사업장 내부의 공급망을 선박 건조 공정을

중심으로 정의하였다. 이때, 선박 건조 공정은 단위 생산 공정과 물류 흐름으로 구분하였으며, 물류 흐름은 다시 이송 활동과 적치 활동으로 구분하였다. 마지막으로 다중 계층 공급망 모델을 구성하는 단위 요소는 조선소 6 대 요소 정보 모델을 기반으로 속성을 정의하였으며, 공급망 단위 구성 요소는 상세화 정도에 따라 또다른 공급망 구조를 하위에 가질 수 있게 하여, 다중 계층의 의미를 강조하였다.

다음으로 Figure 76 와 같이 조선소 물류 시뮬레이션 시스템을 정의하고 개발하였다. 이 시스템은 조선소 시뮬레이션 프레임워크를 기반으로 하고 있으며, 본 연구를 통하여 구성 요소와 기능, 알고리즘, 구축 절차 등을 상세히 정의하였다. 이 시스템은 선박 건조 공정과 공간 배치, 물류 흐름을 연계하여 통합 시뮬레이션을 수행하는 것을 목표로 한다. 앞서 정의한 다중 계층 공급망 모델을 표준 모델로 활용하였으며, 이를 물류 토큰을 고려한 공정 중심 모델링 방법으로 표현하였다. 그리고 적용 대상에 따라 시뮬레이션 경로가 동적으로 변경되는 동적 해상도 시뮬레이션 방법을 적용하여 입력 데이터의 수준에 따라서 시뮬레이션 결과가 다르게 도출될 수 있도록 하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 시스템의 성능과 결과를 검증하기 위한 작동 유효성 검증과 결과 유효성 검증을 수행하였다.

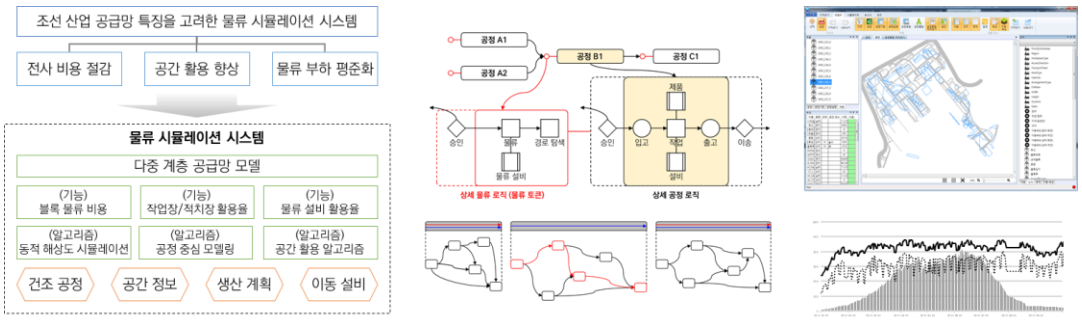


Figure 76 조선소 물류 시뮬레이션 시스템

제 5 장 결 론

마지막으로 조선소에서 본 논문에서 제안한 시스템을 효과적으로 활용할 수 있도록 시스템을 활용하는 방법과 실제로 적용한 결과를 분석하였다. 본 논문에서 제안하는 물류 시뮬레이션 시스템은 기존에 계획 단계에서 생산 계획 시스템 만으로는 분석할 수 없었던 물류 흐름을 식별하고 물류 부하를 산출하는데 활용할 수 있다. 이를 통하여 생산 계획 대안에 대하여 물리적 제약을 고려한 정교한 공정 부하와 물류 부하를 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이션 수행 결과를 바탕으로 공간 배치 계획을 수립하거나 트랜스포터의 배차 계획을 수립하는 데에도 활용할 수 있다. 본 논문에서 제안한 시스템을 이용하여 트랜스포터 운영 전략에 따른 정량적인 결과 비교를 수행하였으며, 다양한 시나리오에 따라 정량적인 결과를 도출하여 설비나 자원 활용에 대한 의사 결정 지원 시스템으로 활용할 수 있음을 확인하였다. 그리고 선행 탑재장과 같은 주요 공정에 대해서 공간 배치 전략을 다르게 하여 효과적인 결과를 얻었으며, 공간 배치 결과가 물류 흐름에도 영향을 줄 수 있다는 것을 정량적으로 확인하였다.

5.2 기대효과

현재 조선소에서는 선박 건조 공정의 특성을 고려하여 계층 구조를 가진 생산 계획을 수립하고 실행하고 있다. 다만, 배치 계획이나 배차 계획은 사전에 중장기적인 계획을 수립하지 못하고 있으며, 상황에 맞게 대처하는 것으로 문제를 해결하고 있다. 이러한 대처 방식은 결과가 합리적으로 실행된 것인지 판단할 근거가 없으며, 장기적인 관점에서 적치장이나 트랜스포터와 같은 자원을 활용할 계획을 수립하기 어렵다.

하지만, 본 논문에서 제안하는 선박 건조 공정, 공간 배치, 물류 흐름을 통합하여 고려한 물류 시뮬레이션 시스템을 도입하면 적치장의 면적, 트랜스포터의 용량, 이동 경로와 같은 물리적인 제약 조건을 고려한 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 이를 통하여 Figure 77 과 같이 기존의 생산 계획 시스템에서 고려하지 못한 트랜스포터의 이송 계획이나 적치장 공간 활용 계획을 중장기적인 관점에서도 수립할 수 있으며, 자원 활용 계획이나 투자 계획을 수립할 때 의사 결정을 위한 근거를 마련하는 수단으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

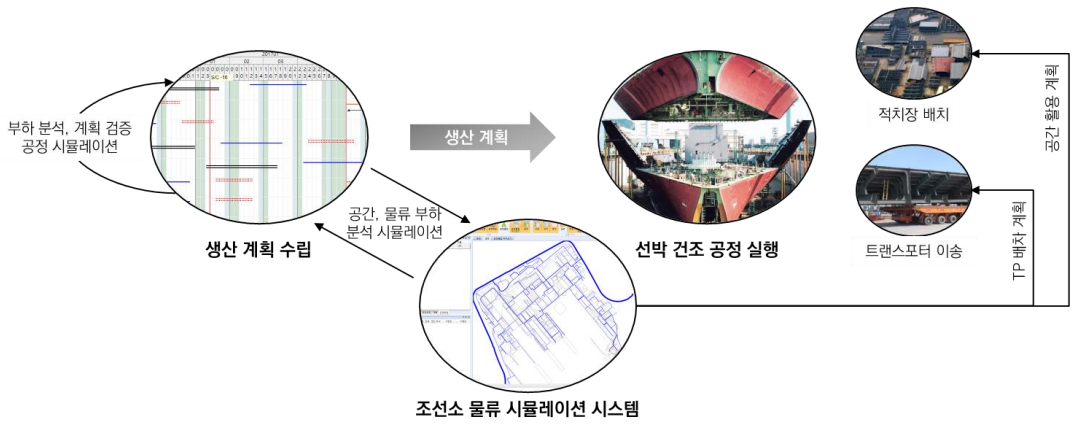


Figure 77 물류 시뮬레이션 시스템을 이용한 생산 계획 검증

참고 문헌

[1] Kim, H., Lee, S. S., Park, J. H., and Lee, J. G. (2005). A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), 427-441.

[2] Lee, J. K., Lee, K. J., Park, H. K., Hong, J. S., and Lee, J. S. (1997). Developing scheduling systems for Daewoo Shipbuilding: DAS project. *European Journal of Operational Research*, 97, 380-395.

[3] Bae, K. S., Lee, J. H., Jeong, H. J., Park, J. S., and Shim, S. W. (2016). *Restructuring the Shipbuilding Industry and Employment Policies and Measures*. Korea Labor Institute.

[4] Tett, G. (2015). *The silo effect: The peril of expertise and the promise of breaking down barriers*. Simon and Schuster.

[5] Kim, H., Lee, J. K., Park, J. H., Park, B. J., and Jang, D. S. (2002). Applying digital manufacturing technology to ship production and the maritime environment. *Integrated Manufacturing Systems*, 13(5), 295-305.

[6] Kim, H., Lee, J. G., Lee, S. S., and Park, J. H. (2003). A simulation-based shipbuilding system for evaluation of validity in design and manufacturing. Systems, Man and Cybernetics, 2003. *IEEE International Conference on*, 522-529.

[7] Shin, J. G., Lee, K. K., Woo, J. H., Kim, W. D., Lee, J. H., Kim, S. H., Park, J. Y., and Yim, H. (2004). A modeling and simulation of production process in subassembly lines at a shipyard. *Journal of Ship Production*, 20(2), 79-83.

[8] Woo, J. H., Oh, D. K., Lee, C. J., Choi, Y. R., and Shin, J. G. (2006). Simulation Modeling Methodology and Simulation Architecture for Shipbuilding Processes. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 11(1), 11-19.

[9] Song, Y. J., Woo, J. H., and Shin, J. G. (2009). Research on a simulation-based ship production support system for middle-sized shipbuilding companies. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1(2), 70-77.

[10] Shin, J. G., Song, Y. J., Lee, D. K., and Woo, J. H. (2009). A concept and framework for a shipyard layout design based on simulation. *Journal of Ship Production*, 25(3), 126-135.

[11] Lee, K., Shin, J. G., and Ryu, C. (2009). Development of simulation-based production execution system in a shipyard: a case study for a panel block assembly shop. *Production Planning and Control*, 20(8), 750-768.

[12] Song, Y. J., Lee, D. K., Woo, J. H., and Shin, J. G. (2010). System development and applications of a shipyard layout design framework. *Journal of Ship Production and Design*, 26(2), 144-154.

[13] Lee, D. K., Kim, Y., Hwang, I. H., Oh, D. K., and Shin, J. G. (2014a). Study on a process-centric modeling methodology for

virtual manufacturing of ships and offshore structures in shipyards. The International *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4), 621-633.

[14] Lee, D. K., Shin, J. G., Kim, Y., and Jeong, Y. K. (2014b). Simulation-Based Work Plan Verification in Shipyards. *Journal of Ship Production and Design*, 30(2), 49-57.

[15] Barzier, M. K., and Perry, C. J. (1991). An approach to the construction and usage of simulation modeling in the shipbuilding industry. *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*, 455-464.

[16] Aoyama, K., Nomoto, T., and Kentaro, W. (1999). Development of a shipyard simulator based on Petri nets. *Journal of Marine Science and Technology*, 4(1), 35-43.

[17] Krause, M., Roland, F., Steinhauer, D., and Heinemann, M. (2004). Discrete event simulation: An efficient tool to assist shipyard investment and production planning. *Journal of Ship Production*, 20(3), 176-182.

[18] Lamb, T., Chung, H., Spicknall, M., Shin, J. G., Woo, J. H., and Koenig, P. (2006). Simulation-based performance improvement for shipbuilding processes. *Journal of Ship Production*, 22(2), 49-65.

[19] Caprace, J. D., Trevisani Da Silva, C., Rigo, P., and Martins Pires, F. C. (2011). Discrete event production simulation and optimisation of ship block erection process. *In Proceeding of the 10th International Conference on Computer Applications and*

Information Technology in the Maritime Industries, 271-282.

[20] Fleischer, M., Kohler, R., Lamb, T., Bongiorni, H. B., and Tupper, N. (1999). *Shipbuilding Supply Chain Integration Project*. ONR Final Report.

[21] Jung, S. L. (2013). *A study on performance evaluation and success factors of ERP: Focused on shipbuilding and marine engineering*. Dissertation, Korea Polytechnic University.

[22] Bolton, R. W. (2001). Enabling Shipbuilding Supply Chain Virtual Enterprises. *Journal of Ship Production*, 17(2), 76-86.

[23] Jeong, S. W., Kim, D. Y., and Park, S. W. (2009). An analysis of project-based industry from SCM perspective. *Journal of Information and Operations Management*, 19, 59-83.

[24] Jung, D., Cho, C., and Nam, Y. (2010). The Development and Application of Cloud Computing-based BPM-ERP System for Small and Medium Marine Equipment Makers. *IE Interfaces*, 23(2), 126-138.

[25] Jeong, S. B. (2013). Developing a Supply Chain Assessment Framework for Ship Building Industry: A Case study of A Company. *Journal of Digital Convergence*, 11(3), 243-253.

[26] Pero, M., Stößlein, M., and Cigolini, R. (2015). Linking product modularity to supply chain integration in the construction and shipbuilding industries. *International Journal of Production Economics*, 170, 602-615.

[27] Nam, S., Ju, S. H., Ryu, C., and Shin, J. G. (2016). The Designing of Production Planning Module for Advanced Planning System

with Respect to Supply Chain of the Shipbuilding Industry. *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 21(3), 353-362.

[28] Mello, M. H. and Strandhagen, J. O. (2011). Supply chain management in the shipbuilding industry: challenges and perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 225(3), 261-270.

[29] Mello, M. H., Strandhagen, J. O. and Alfnes, E. (2015a). Analyzing the factors affecting coordination in engineer-to-order supply chain. *International Journal of Operations and Production Management*, 35(7), 1005-1031.

[30] Mello, M. H., Strandhagen, J. O., and Alfnes, E. (2015b). The role of coordination in avoiding project delays in an engineer-to-order supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26(3), 429-454.

[31] Mello, M. H., Gosling, J., Naim, M. M., Strandhagen, J. O., and Brett, P. O. (2017). Improving coordination in an engineer-to-order supply chain using a soft systems approach. *Production Planning and Control*, 28(2), 89-107.

[32] Woo, J. H., Kim, Y., Jeong, Y. K., and Shin, J. G. (2016). A Research on Simulation Framework for the Advancement of Supplying Management Competency. *Journal of Ship Production and Design*, 32(4), 1-20.

[33] Lee C. J., Lee J. H., Woo, J. H., Shin, J. G., and Ryu, C. (2007). A

Study on Discrete Event Simulation of Shipyard Outdoor Block Movement. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(6), 647-656.

[34] Song, C. S. and Kang, Y. W. (2009). Simulation of Block Logistics at a Big Shipyard. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 14(6), 374-381.

[35] Woo, J. H., Song, Y. J., Kang, Y. W., and Shin, J. G. (2010). Development of the decision-making system for the ship block logistics based on the simulation. *Journal of Ship Production and Design*, 26(4), 290-300.

[36] Cho, D. Y., Song, H. C., and Cha, J. H. (2011). Simulation of block and logistics control, *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), 24-29.

[37] Song, K. S., Lee, S., and Cho, D. Y. (2012). Smart Device Based Localization for Ship Block Logistics. *Journal of Korea Multimedia Society*, 15(12), 1506-1516.

[38] Son, J. R. and Ha, B. H. (2014). Design of a Block Logistics Operating System in Shipbuilding Industry Based on Axiomatic Design. *The Journal of Society for e-Business Studies*, 19(2), 75-93.

[39] Roh, M. I., and Cha, J. H. (2011). A block transportation scheduling system considering a minimisation of travel distance without loading of and interference between multiple transporters. *International Journal of Production Research*, 49(11), 3231-3250.

[40] Kim, B. S., and Joo, C. M. (2012). Ant colony optimisation with random selection for block transportation scheduling with heterogeneous transporters in a shipyard. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7229-7241.

[41] Heo, Y. J., Cha, J. H., Cho, D. Y., and Song, H. C. (2013). Optimal Block Transportation Path Planning of Transporters considering the Damaged Path. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(5), 298-306.

[42] Cha, J. H., Cho, D. Y., Ruy, W. S., and Hwang, H. J. (2016). Development of Optimal Planning System for Operating Transporters in Shipyard. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 21(2), 177-185.

[43] Moon, J. H., Ruy, W. S., and Cha, J. H. (2016). Comparison of Optimal Path Algorithms and Implementation of Block Transporter Planning System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(2), 115-126.

[44] Ruy, W. S. (2014). A Study on the Generation of Block Projections for the Assembly Shops. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(3), 203-211.

[45] Lee, H. and Ruy, W. S. (2013). Determination of Nesting Algorithm Fitness Function through Various Numerical Experiments. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(5), 28-35.

[46] Park, K., Lee, K., Park, S., and Kim, S. (1996). Modeling and solving the spatial block scheduling problem in a shipbuilding

company. *Computers and industrial engineering*, 30(3), 357-364.

[47] Ryu, C., Shin, J. G., Kwon, O. H., and Lee, J. M. (2008). Development of integrated and interactive spatial planning system of assembly blocks in shipbuilding. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(8), 911-922.

[48] Zheng, J., Jiang, Z., Chen, Q., and Liu, Q. (2011). Spatial scheduling algorithm minimising makespan at block assembly shop in shipbuilding. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2351-2371.

[49] Zhuo, L., Chua Kim Huat, D., and Wee, K. H. (2012). Scheduling dynamic block assembly in shipbuilding through hybrid simulation and spatial optimisation. *International Journal of Production Research*, 50(20), 5986-6004.

[50] Caprace, J. D., Petcu, C., Velarde, M. G., and Rigo, P. (2013). Optimization of shipyard space allocation and scheduling using a heuristic algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(3), 404-417.

[51] Chung, K. H., Baek, T. H., Min, S. G., Kim, H. S., Park, J. C., Cho, K. K., and Park, C. (2001). Development of the Spatial Scheduling System and Its Applications in Shipbuilding Industry. *IE interfaces*, 14(4), 394-402.

[52] Park, C., Chung, K. H., Park, J. C., Cho, K. K., Baek, T. H., and Son, E. I. (2002). A spatial scheduling application at the block paint shop in shipbuilding: the HYPOS project. *Production Planning and Control*, 13(4), 342-354.

[53] Varghese, R., and Yoon, D. Y. (2005). Dynamic Spatial Block Arrangement Scheduling in Shipbuilding Industry using Genetic Algorithm. *2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 444-449.

[54] Koh, S., Logendran, R., Choi, D., and Woo, S. (2011). Spatial scheduling for shape-changing mega-blocks in a shipbuilding company. *International Journal of Production Research*, 49(23), 7135-7149.

[55] Lee, S., Kim, J., and Moon, I. (2011). Deployment Planning of Blocks from Storage Yards Using a Tabu Search Algorithm. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 37(3), 198-208.

[56] Roh, M. I. (2012). Block layout method in the block stockyard based on the genetic algorithm. *Ocean Systems Engineering*, 2(4), 271-287.

[57] Ha, B. H., Son, J. R., Cho, K. K., and Choi, B. C. (2013). A Mathematical Programming Approach for Block Storage Problem in Shipbuilding Process. *Korean Management Science Review*, 30(3), 99-111.

[58] Son, J. R., Suh, H. W., and Ha, B. H. (2014). A Heuristic Algorithm for Block Storage Planning in Shipbuilding. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(3), 239-245.

[59] Tah, J. H. (2005). Towards an agent-based construction supply network modelling and simulation platform. *Automation in Construction*, 14(3), 353-359.

[60] Cizmeci, D. (2005). *An examination of Boeing's supply chain management practices within the context of the global aerospace industry*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

[61] Fayez, M., Cope, D., Kaylani, A., Callinan, M., Zapata, E., and Mollaghasemi, M. (2006). Earth to orbit logistics and supply chain modeling and simulation for NASA exploration systems. *In Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, 1462-1468.

[62] Vidalakis, C., Tookey, J. E., and Sommerville, J. (2011). Logistics simulation modelling across construction supply chains. *Construction innovation*, 11(2), 212-228.

[63] Ebrahimy, Y., AbouRizk, S. M., Fernando, S., and Mohamed, Y. (2011). Simphony supply chain simulator: A simulation toolkit to model the supply chain of construction projects. *Simulation*, 87(8), 657-667.

[64] Irizarry, J., Karan, E. P., and Jalaei, F. (2013). Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. *Automation in Construction*, 31, 241-254.

[65] Jung, M. (2016). *Complexity of Construction Supply Chain Management: Agent-Based Simulation of High-Rise Building Construction Project*. Dissertation, Seoul National University.

[66] Chandra, C. and Grabis, J. (2007). *Supply Chain Configuration: Concepts, Solutions, and Applications*, Springer.

[67] Cooper, M. C., Lambert, D. M., and Pagh, J. D. (1997). Supply chain management: more than a new name for logistics. *The*

International Journal of Logistics Management, 8(1), 1-14.

[68] Lambert, D. M. (2008). *Supply chain management: processes, partnerships, performance*. Supply Chain Management Inst.

[69] Stewart, G. (1997). Supply-chain operations reference model (SCOR): the first cross-industry framework for integrated supply-chain management. *Logistics Information Management*, 10(2), 62-67.

[70] Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281-294.

[71] Held, T. (2010). Supplier Integration as an Improvement Driver – An Analysis of Some Recent Approaches in the Shipbuilding Industry. *Supply Chain Network Management*, 369–384.

[72] Tokola, H., Niemi, E., and Remes, H. (2013). Block erection sequencing in shipbuilding with general lifting and joining times. *Journal of Ship Production and Design*, 29(2), 49-56.

[73] Yoon, D. Y., Varghese, R., and Yang, J. H. (2006). Genetic algorithm based technique for erection sequence generator in shipbuilding. *Ships and Offshore Structures*, 1(4), 289-299.

[74] Lim, H., Lee, Y., Kim, B., and Woo, J. (2016). A Study on the Erection Process Modeling and Simulation considering Variability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(2), 101-107.

[75] Lee, D. K. (2013). *Study on the PPR3-S information-based neutral model and system for integration and extension of shipbuilding*

production planning simulations. Dissertation, Seoul National University.

[76] Jeong, Y. K., Ju, S. H., Shen, H., Lee, D. K., Shin, J. G., and Ryu, C. (2018). An analysis of shipyard spatial arrangement planning problem and a spatial arrangement algorithm considering free space and unplaced block. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Published Online)

[77] Flack, R.W.J. (2011). *Evolution of Architectural Floor Plans*. Thesis, Brock University.

[78] Baker, B. S., Coffman, Jr, E. G., and Rivest, R. L. (1980). Orthogonal packings in two dimensions. *SIAM Journal on computing*, 9(4), 846-855.

[79] Chazelle, B. (1983). The bottomn-left bin-packing heuristic: An efficient implementation. *IEEE Transactions on Computers*, (8), 697-707.

[80] Lee, D. K., Jeong, Y. K., and Shin, J. G. (2013). Study on a layout design method for leisure ship production factories using a heuristic location-allocation algorithm. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(3), 277-284.

[81] Bennell, J. A., Dowsland, K. A., and Dowsland, W. B. (2001). The irregular cutting-stock problem—a new procedure for deriving the no-fit polygon. Computers and Operations Research, 28(3), 271-287.

[82] Jeong, Y. K., Lee, P., and Woo, J. H. (2017). Shipyard Block Logistics Simulation Using Process-centric Discrete Event

Simulation Method. *Journal of Ship Production and Design*, 33(3), 1-12.

Abstract

A shipyard logistics simulation system considering shipbuilding process, spatial arrangement, and logistics flow

Yong-Kuk Jeong

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graudate School

Seoul National University

A ship production system can be defined as the series of processes, physical elements, and the relationship between each element that are necessary for shipbuilding. To secure a competitiveness in the shipyard or shipbuilding industry, there must also be a competitiveness in terms of planning and managing the ship production system instead of just technical competitiveness in the shipbuilding process. However, there is currently a lack of skill in integrated management from an overall perspective, which is characteristic of a system that has complex components and diverse relationships defined between components.

The shipbuilding process can be divided into the unit production process and

logistics flow. The unit production process becomes the focus when mid-term production plans are established at a shipyard. Logistics flow can be defined as the physical transportation of raw materials and semi-finished products that occurs during the ship production process. Logistics flow plans are not considered when mid-term production plans are established. However, a logistics flow plan can be established in order to respond to situations that occur at the production site according to the designated mid-term production plan.

Since the unit production process and logistics flow are organically connected in the ship production system, a method for integrated management from the overall viewpoint is needed. However, because the size of shipyards where the ship production system is physically configured is extremely large compared to other manufacturing facilities, and is associated with high uncertainty and volatility in terms of resources such as manpower, space, and facility, it is difficult to integrate the unit production process and logistics flow at large shipyards.

To resolve these issues, this study has defined the components of the ship production system, and proposed a shipyard logistics simulation system so that the operation of the ship production system can be analyzed under various scenarios. In the proposed shipyard logistics simulation system, the logistics flow and spatial arrangement problems that exist in the ship production system, which were not considered in previous simulations, were taken into detailed account so that the uncertainties and volatility that occur at shipyards due to physical limitations can be controlled with precision.

Moreover, this study goes beyond the mere proposal of a shipyard logistics simulation system by presenting the detailed procedures and methods involved. Thus, this system can be built and utilized in actual shipyards, and also includes a system verification and validation process. This system may be used in

identifying and analyzing the logistics flow of the ship production system based on the shipyard's mid-term production plans. It may also be used to establish efficient allocation plans for transportation facilities at the production site or spatial arrangement plans for workshops and stock areas.

A quantitative comparison is possible on changes in logistics flow according to the mid-term production plans that were set by using the proposed system. More precise results were obtained through the logistics simulation that considered spatial arrangement, and the spatial arrangement algorithm that was proposed in this study also showed superior performance with respect to pre-erection area arrangement problems.

A competitiveness in the shipbuilding industry can be improved through the precise and systematic management of components in the ship production system in addition to securing competitiveness in production techniques. The method and system proposed in this study help integrate and manage the shipbuilding process simulation, logistics simulation, and spatial arrangement simulation from an overall perspective, and compare the ship production system's operations based on various production plans and strategies using quantitative values. This can be used to establish mid-term production plans for the ship production system that contains uncertainties and volatility and operate the production system in a rational manner.

Keywords: Ship production system, Shipyard logistics simulation, Discrete event system simulation, Shipbuilding process, Spatial arrangement problem

Student number: 2011-23464