

# 흐름라인 방식의 철도차량 의장공장에서 비용을 고려한 운영전략 비교

김동옥 · 신양우 · 문덕희<sup>†</sup>

## Comparison of Operation Strategies Considering Costs in a Railway Vehicle Assembly Shop with Flow Line Layout

Dong Ok Kim · Yang Woo Shin · Dug Hee Moon<sup>†</sup>

### ABSTRACT

Due to the characteristics of the railway system, a fleet consists of multiple railway vehicles, and a project contract is made by supplying multiple fleets to the customer. If the project fails to meet the due date, the manufacturer must compensate for the delay to the customer. In this paper, we analyze the operation strategies of the railway vehicle manufacturing factory using simulation, in which the layout adopts the concept of the flow lines, and when shortages of parts are considered. If there is a shortage of parts, the subsequent assembly process cannot proceed due to the nature of the assembly process. Thus, in order to overcome this problem, three strategies for performing assembly work are presented when the events of shortages are occurred. We also compare the strategies with respect to reduce the total cost which includes labor costs and compensation costs for delay.

**Key words** : Railway vehicle, Assembly, Flow Line, Shortage parts, Operation Strategy, Simulation

### 요약

철도차량은 제품의 특성상 일정한 수량의 차량이 결합되어 편성이 구성되며, 프로젝트는 복수의 편성을 고객에게 납품하는 것으로 계약이 이뤄지는데 만일 납기를 지키지 못하면 생산자가 지체보상금을 고객에게 지불해야 한다. 이 논문에서는 부품의 결품이 발생하는 상황에서 흐름라인 방식으로 운영되는 철도차량 의장공장의 운영전략에 대해 시물레이션을 이용하여 분석한다. 만일 부품의 결품이 발생한다면 조립공정의 특성상 후속 조립공정이 진행될 수 없다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 부품의 결품이 발생했을 때 조립작업을 수행하는 3가지 전략을 제시하였고, 인건비와 지체보상금을 합한 총 비용이 전략에 따라 어떻게 변화되는지 비교하였다.

**주요어** : 철도차량, 조립, 흐름라인, 부품결품, 운영전략, 시물레이션

## 1. 서론

### 1.1 배경 및 목적

제품을 생산하기 위해 공장의 생산라인을 어떤 형태로 구성하는 것이 최적인지에 대한 문제는 오랫동안 이론적으

로 혹은 사례연구를 통하여 논의되었던 사항이다. Tomkins 등(1996)은 설비배치의 유형을 제품별배치(Product Layout), 공정별배치(Process Layout), 그룹별배치(Group Layout), 고정위치형배치(Fixed-Position Layout) 등의 네 가지 유형으로 정의하고 각 방식의 장단점을 제시하였다. 그 이외에도 제품별배치의 일환으로 일본의 도요타(Toyota) 자동차에서 시도되었던 U 라인(U Line) 생산방식, 캐논(Canon) 등 전자제품 회사의 조립라인을 중심으로 제품을 처음부터 끝까지 소수의 인원이 책임지고 조립하는 셀생산방식(Manufacturing Cell Systems)도 보편화 되었다(Moon et al., 2018).

흐름라인(Flow Line 혹은 Serial Line)은 제품별 배치

\* 이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

**Received:** 1 July 2022, **Revised:** 13 August 2022,  
**Accepted:** 16 August 2022

<sup>†</sup> **Corresponding Author:** Dug Hee Moon  
E-mail: dhmoon@changwon.ac.kr  
Changwon National University  
Department of Industrial and Systems Engineering

구조를 가지는 전형적인 방식으로 20세기 초반 포드(Ford) 자동차 회사에 도입된 이래 다양한 산업영역에서 널리 사용된 생산방식이다(Moon et al., 2018). 흐름라인은 제품 생산에 필요한 공정을 세분화하고, 생산량을 고려한 택트시간(Tact Time 또는 Takt Time)을 결정한 후, 라인 밸런싱(Line Balancing)을 통해 작업장을 구성하여 작업장을 일렬로 배치하는 방식이다.

흐름라인을 설계할 때는 생산요구량을 고려하여 제품이 생산되는 평균시간간격을 먼저 설정해야 하는데 이를 택트시간이라고 한다. 택트시간이 정해지면 각 단위작업장의 개별효율(Isolated Efficiency) 및 막힘(Blocking), 기근(Starving) 확률 등을 고려하여 라인편성을 위한 목표 주기시간(Target Cycle Time)을 결정한다. 그 이후에 라인밸런싱을 이용하여 세부 공정들을 각 작업장에 할당한다. 라인밸런싱에 의해 각 작업장별로 할당된 작업시간이 순수주기시간(Pure Cycle Time)이며, 다음 작업장으로 제품을 이송하는 시간(Transfer Time)도 필요한 경우 반영된다. Figure 1은 이와 같은 관계를 보여준다.

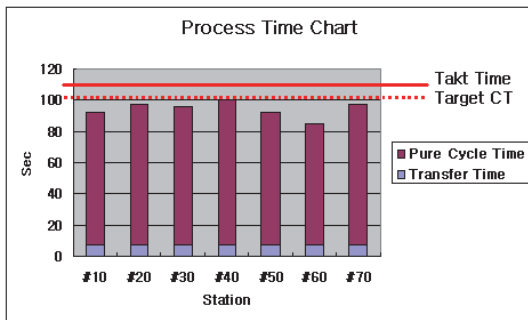


Fig. 1. Tact time and target cycle time (Moon et al., 2006)

이와 같은 흐름라인 방식은 소품종 대량생산에 최적화된 생산방식이다. 하지만 생산시스템의 외부 환경이 소품종 대량생산에서 다품종 소량생산으로 변화하면서 흐름라인은 셀생산방식이나 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System) 등으로 변화되고 있다(Moon et al., 2018).

흐름라인은 구조적으로 몇 가지 치명적인 단점을 가지고 있다. 첫째, 전체 라인의 생산효율은 애로 작업장(Bottleneck Station)에 의해 결정된다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 라인밸런싱이 중요하다. 특히 동일 라인에서 서로 다른 여러 종류의 제품을 생산하는 혼류생산(Mixed Model Production)의 경우에는 제품별로 다른 공정시간의 차이를 완충시키기 위한 방법으로 혼류생산의 라인밸런싱(Mixed Model Assembly Line Balancing)

방법이나 혼류생산스케줄링(Mixed Model Scheduling) 방법을 사용한다(Becker and Scholl, 2006). 둘째, 각 작업장의 공정시간이 확정적이 아니라 확률적으로 변하거나, 혹은 고장이 발생한다면(Unreliable Machine) 작업장 사이의 버퍼(Buffer)가 유한한 경우 막힘현상과 기근현상이 반복되어 라인의 길이가 길어질수록 라인 전체의 생산성이 기하급수적으로 떨어진다는 점이다. 예를 들어 기계의 개별효율(Isolated Efficiency)이 0.96인 경우 10대의 기계가 흐름라인으로 배치되고, 기계 사이의 버퍼가 허용되지 않는다면 라인의 생산률은  $0.96^{10}=0.665$  이하로 감소한다(Gershwin, 1994). 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 작업장 사이의 버퍼를 최대한 크게 설치해야 한다. 만일 작업장 사이의 버퍼가 무한대라면 라인의 효율은 0.96을 유지할 수 있겠지만, 제품의 크기가 대형인 경우에는 공간의 제약으로 인하여 버퍼를 많이 허용할 수 없는 것이 현실이다.

본 논문의 대상인 철도차량 의장공장의 경우에도 회사에 따라 제품별배치 혹은 고정위치형배치를 활용하고 있다. 심지어 동일한 회사에서조차 공장별로 두 가지 다른 방식을 사용하는 경우도 있다(Moon et al., 2018). 이와 같은 현상은 항공기 조립라인에서도 유사하게 적용되고 있는데, 공통적인 특성은 제품의 크기가 매우 크고 작업장별 공정시간이 길다는 점이다.

Moon et al.(2018)에서는 철도차량의 조립에 필요한 부품의 결품이 발생하는 경우에 흐름라인 형태의 생산방식보다 고정위치형 생산방식이 효율적이라는 것을 시뮬레이션을 이용하여 입증하였다. 이러한 부품의 결품 현상은 최근의 COVID-19 상황의 대두로 인하여 부품 공급망의 붕괴가 확대됨으로써 의도치 않게 심화되고 있는 형편이다. 그 결과 납품의 지연으로 인하여 상당한 금액의 지체보상금을 발주처에 지급하고 있어서 기업의 경영수지도에 악영향을 미치고 있다. 하지만 기업의 입장에서 기존의 생산방식을 전면적으로 변경하는 것은 노조의 반발 등 현실적으로 어려운 점이 많다. 이에 기업에서는 인건비를 추가로 부담하더라도 납기를 지켜 지체보상금을 줄이는 것이 더 효율적이라는 판단을 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 버퍼가 제한된 기존의 흐름라인에서 택트시간을 유지하기 위해 사용하고 있는 운영 전략 등 현실적인 운영상의 방법 등을 비교해 보기로 한다.

## 1.2 관련연구

흐름라인의 효율을 예측하는 문제는 제조시스템설계(Manufacturing System Design) 분야의 대표적 연구주

제로 오랜 기간 연구가 진행되어 왔다. 특히 유한 버퍼를 갖는 흐름라인은 공정시간의 분포 특성, 장비 고장여부, 고장발생시간(Time to Failure)과 수리시간(Time to Repair)의 분포특성, Blocking After Service와 Blocking Before Service 같은 막힘정책(Blocking Strategy) 등의 분류에 따라 매우 다양한 문제로 정의 되는데, 대기행렬망이론(Queueing Network Theory)이나 마르코프 과정(Markov Process) 등을 이용한 수리모형이 많이 발표되었다(Papadopoulos et al. 2019). 하지만 정확해(Exact Solution)를 구할 수 있는 시스템은 극히 제한되어 있고, 대부분의 경우 근사방법(Approximating Method)을 이용하여 분석을 한다.

하지만 흐름라인의 경우에도 좀 더 현실적이고 복잡한 조건들이 포함된 시스템은 대부분의 경우 시뮬레이션을 이용하여 접근하고 있다. 이와 같이 시스템의 효율을 예측할 수 있는 수리적 모형이나 시뮬레이션 모델이 완성되면 이 모델들을 이용하여 버퍼할당문제(Buffer Allocation Problem) 같이 주어진 자원의 제약하에서 최적화를 시도한다.

단일 작업장에서 서비스가 부품공급에 의존하는 시스템은 재고를 포함하는 재고-대기행렬시스템(Inventory Queue)으로 모형화하여 분석되어 왔다(Schwarz et al. 2006; Saffari et al., 2013; Krishnamoorthy et al., 2015; Ko et al., 2016; Baek and Moon, 2014, 2016). 이들 논문에서는 주로 수요와 재고 상태에 대한 결합분포를 구하고 이를 이용하여 재고정책을 정하는 문제에 관심을 가지고 있다. Baek and Moon(2014)은 M/M/1 재고-대기행렬모형에서 외부로부터 공급되는 제품의 발주정책이( $r, Q$ ) 정책인 경우와 내부에서 생산하여 공급하는 경우의 시스템을 분석하였으며, Ko et al.(2016)은 G/M/1 재고-대기행렬모형에서 시간의 진행에 따라 진부화(Perishable)가 되는 제품의 발주정책을( $s, S$ )정책으로 하는 경우에 대해 연구하였다. Baek and Moon (2016)은 M/M/c 재고-대기행렬모형에서 제품의 발주정책을 ( $s, S$ )정책으로 하고, 제품에 결함이 발생하면 구매를 포기하는 (Lost-sales)상황을 고려하는 경우에 대해 분석하였다.

최근에 Moon et al.(2020)은 일반적인 흐름 조립라인에서 조립에 필요한 기저제품과 조립부품에 각각 할당된 버퍼가 유한하고 서버에 고장이 발생하는(Unreliable) 시스템의 효율을 분해법(Decomposition)을 이용하여 수리모델로 분석하였다. 하지만 위에서 조사한 모든 선행연구들도 본 논문에서 다루고자 하는 택트시간 유지 및 납기 준수라는 특수한 상황을 반영하고 있지 않다.

## 2. 생산시스템의 특성

### 2.1 작업장 배치

본 연구에서 다루고자 하는 대상 시스템은 Moon et al (2018)에서 다루었던 철도차량 의장공장의 일부 라인이다. Figure 2에 제시된 바와 같이 대상 시스템은 10개의 작업장으로 구성된 흐름라인으로 되어 있다. 10개 작업장 중에서 8개 작업장은 실제 조립공정이 수행되는 작업장(WST; Working Station)이며 나머지 2개의 작업장은 내부버퍼(BST; Buffer Station)로 활용되고 있다. 공장 내부에서 조립이 완료된 차량은 외부장소(OST; Out-of-house Station)로 이송되어 편성(Fleet)구성이 완료될 때까지 대기한다. 편성이란 열차를 구성하는 단위들의 의미하는데, 만일 1편성이 10량의 차량으로 구성된다면 OST는 최소 10개의 공간이 필요하다. 편성이 구성되면 시험을 거친 후 납품이 된다.

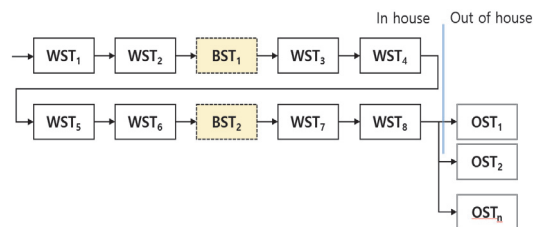


Fig. 2. Abstract model of layout (Moon et al. 2018)

### 2.2 작업자 운영

현재 작업자는 조(Team)별로 운영되는데 각 조별 인원은 해당 작업장에서 수행해야 할 작업량(Man-hour 기준)에 따라 공정별로 인원이 서로 다르다. 하지만 본 연구에서는 조별 인원을 4명으로 가정하여 비용분석을 하였다. 또한 한 라인을 담당하는 작업자는 8개의 조로 편성되어 있고, 각 조는 버퍼공간을 제외한 나머지 작업장에 고정되어 있으며, 노동조합의 요구에 따라 다른 작업장의 작업은 수행하지 않는다. 또한 전용라인 개념으로 조립작업을 수행하기 때문에 다른 작업장이나 다른 라인 사이의 작업자 공유는 없다.

### 2.3 공정시간

철도차량 조립공장의 경우 거의 모든 작업이 수작업이기 때문에 설비의 고장은 고려하지 않아도 큰 영향이 없다. 다만 수작업의 경우 작업자의 숙련도, 건강상태, 부품의 정밀도 등에 따라 공정 수행시간이 차이가 난다. 따라

서 부품의 결품이 없다고 가정할 때 작업장에서의 실제 공정시간에 영향을 주는 요인은 다음과 같다.

- ① 공정시간 자체의 변동성(분산)
- ② 작업장 사이 버퍼의 제한에 따라 공정시간의 변동성 때문에 발생하는 막힘, 기근 확률

철도차량의 특성상 동일한 프로젝트의 데이터가 많지는 않지만 과거 실적을 분석해보면 실제공정시간의 분포도 삼각(Triangle) 분포, 베타(Beta) 분포, 정규(Normal) 분포, 대수정규(Log-normal) 분포 등 다양한 형태를 가진다. Figure 3은 결품이 발생하지 않았던 특정한 두 공정의 실적 사례를 보여주고 있는데, 각각 정규분포, 대수정규분포를 따르고 있으며, 표준편차가 평균의 10~20% 수준으로 매우 높은 편이다. 공정시간의 표준편차가 큰 이유는 철도차량이 대형물로서 조립과정에서 부품의 치수공차, 형상오차 등에 기인한 재작업, 조정작업이 많이 발생하기 때문이다.

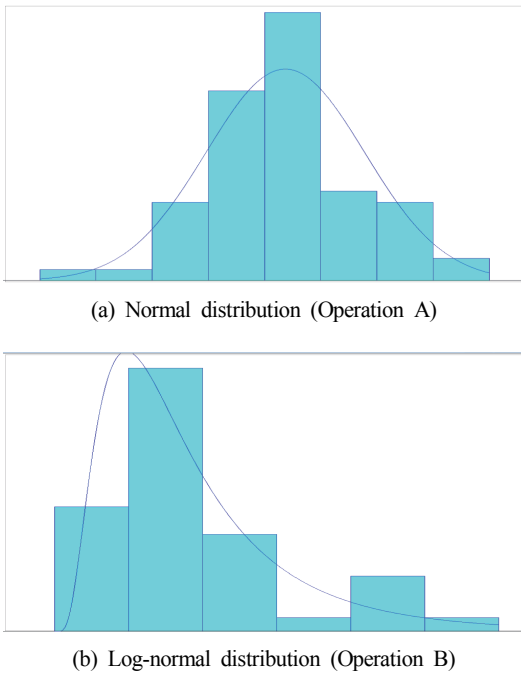


Fig. 3. Examples of process time distribution

본 연구에서는 차량 1량을 조립하는데 소요되는 시간의 평균을 16시간×8= 128시간을 가정하며, 하루 작업시간은 8시간으로 한다. 따라서 만일 8개의 작업장에서 작업을 수행하면 각 작업장에 할당되는 시간은 16시간이며,

작업장의 수를 10개로 늘이면 12.8시간이 할당되는 것으로 가정한다. 작업시간의 분포는 정규분포를 따르며, 표준편차는 평균시간의 15%로 가정한다. 또한 각 작업장에서의 라인밸런싱 효율은 100%인 것으로 가정하고, 공정선후관계 및 팀작업에 따른 간섭(Interference) 효과에 의한 손실은 없다고 가정한다.

### 2.4 부품의 결품 및 결품시간

부품은 해당 작업장에서 조립이 시작되는 시점에 모두 도착되어 있어야 하는 것이 원칙이다. 하지만 실제로 작업이 진행되는 도중에 도착하더라도 조립순서를 변경하면 주어진 택트시간 내에 작업이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 결품을 정해진 종료시간(택트시간)이 지날 때까지 도착하지 않는 부품으로 정의한다.

본 논문에서는 두 종류의 결품을 가정한다. 결품유형 1은 결품이 발생하여 해당 작업장에서 조립작업을 수행하지 못하더라도 후속 작업장에서는 계획대로 조립작업을 수행할 수 있는 유형을 의미한다. 반면에 결품유형 2는 기저부품이 결품된 것이기 때문에 후속 공정이 진행될 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 유형 2 결품이 발생하면 후속 작업장에서는 작업을 수행하지 못한다. 이 때, 각 작업장에서 발생하는 두 종류의 결품은 각각 독립적으로 발생하는 것을 가정한다.

이 때 다음과 같은 변수들을 이용하여 결품을 정의하는데, 각 변수는 확률분포를 따른다.

- $i$  : 차량 일련번호
- $j$  : 조립작업장(WST) 번호,  $j = 1, \dots, 8$  (또는 10)
- $x_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서의 당초 소요작업시간
- $p1_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 결품 1이 발생할 확률
- $p2_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 결품 2가 발생할 확률
- $\alpha1_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 결품 1 부품의 작업시간 비율
- $\alpha2_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 결품 2 부품의 작업시간 비율
- $y1_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 결품 1 부품의 결품시간
- $y2_{i,j}$  : 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 결품 2 부품의 결품시간

### 3. 운영전략

현재 가장 큰 문제점은 당초 프로젝트 수주시 택트시간을 16시간으로 가정하여 납품계획을 수립하였지만 실

제 운영과정에서 공정시간의 변동, 결품의 발생 등으로 인해 정해진 납기를 지키지 못함으로써 상당한 수준의 지체보상금이 발생한다는 점이다. 또한 당초 예상했던 차량당 생산소요기간(Manufacturing Lead Time)도 증가함으로써 편성 구성에 소요되는 시간도 길어지며, 이로 인하여 공간부족현상도 심각해지고 있다는 점이다.

따라서 작업장 수의 증가, 외부 용역의 활용 등 다양한 운영전략을 검토하고 있는데, 본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 전략에 대해 비교분석 하고자 한다.

### 3.1 전략(Strategy) 1

Figure 1에 제시된 것처럼 10개의 공간으로 구성된 흐름라인에서 8개의 작업장(WST)을 조립작업에 사용하며, 여유작업장(BST) 2곳은 단순한 버퍼로 운영한다. 만일 결품이 발생하면 결품된 부품이 도착할 때까지 대기한 후 조립작업을 완료한다. 따라서 특정 차량이 각 작업장에서 체류하는 시간의 변동폭이 매우 커지게 되며, 이는 작업장에서의 결품에 의한 대기시간, 선후 작업장의 상황에 따른 막힘 및 기근에 의한 대기시간이 증가하는 영향을 미친다. 이 때 2개 버퍼의 위치에 따라 성능이 변할 수 있는데, 일차적으로 3번, 8번 공간을 버퍼로 지정한다.

또한 이 전략의 문제점은 사전에 예측한 각 작업장에서의 작업시작시점이 매번 변경되기 때문에 부품공급업자 입장에서는 정해진 시점에 납품을 하는 것이 어려워진다는 점이다. 따라서 결품 확률이 증가할 가능성이 높아진다.

### 3.2 전략(Strategy) 2

이 전략은 기본적으로 전략 1과 동일한 운영방식을 따르는데, 10개의 공간(WST, BST)을 모두 조립작업에 활용한다는 점이 다르다. 따라서 이 경우 각 작업장에 할당된 공정시간은 128시간/10=12.8시간이 된다. 이 경우에는 전략 1에 비해 2개의 작업조가 추가적으로 투입되어야 하므로 인건비가 증가된다. 전략 1과 2에서 OST는 편성구성을 위한 대기공간의 역할만 한다.

### 3.3 전략(Strategy) 3

이 전략은 택트시간을 반드시 지키도록 하는 방법으로 특정작업장에서 작업이 완료되지 않더라도 택트시간이 지나면 무조건 다음 작업장으로 차량을 이동시키는 전략이다. 반면에 기존의 BST 2곳을 선행작업장에서 미완성

된 작업들을 추가로 작업하는 작업장으로 전환하는 방안이다. 만일 특정 작업장에서 결품유형 1이 발생하면 해당 부품을 조립하지 않고 나머지 조립작업만 수행한다. 결품 유형 2가 발생하면 차량은 택트시간에 맞추어 후속작업장으로 이동하지만 후속작업장에서의 모든 조립작업은 수행할 수 없다. 이 때 미완성 작업은 OST에서 수행한다.

물론 이 전략으로 인해 조립라인 내부에 2개 조의 작업인력이 추가되어야 하며, OST에서 미조립 작업을 완성하기 위해 추가적인 인력이 필요하다. 이 경우에 OST에 할당해야할 작업자는 외부용역인력을 사용할 수 있다. 물론 이들 버퍼작업장의 위치를 어디로 하는 것이 좋은가 하는 문제, OST에서 작업을 수행할 작업조를 몇 팀 운영할 것인가 하는 문제는 또 다른 최적화문제가 될 수 있다.

각 작업장에서의 공정 수행시간을 설명하기 위해 2.4절에서 소개한 변수에 다음과 같은 변수 및 기호를 추가적으로 아래와 같이 정의한다. 이 때, 버퍼작업장(BST<sub>1</sub>과 BST<sub>2</sub>)위치는 3번째와 8번째 작업장으로, 편의상 그 위치를  $k_3$ 와  $k_4$ 로 표현한다.

$S_1$  : 버퍼작업장(BST<sub>1</sub>)의 선행 WST<sub>j</sub> 집합

$S_2$  : BST<sub>1</sub>과 BST<sub>2</sub>의 사이에 있는 WST<sub>j</sub> 집합

$k_1$  :  $S_1$ 에 속하는 작업장에서 차량  $i$ 에 대해 최초로 결품 2가 발생한 작업장

$k_2$  :  $S_1$ 에 속하는 작업장에서 차량  $i$ 에 대해 BTS<sub>1</sub> 작업이 종료될 때까지 도착하지 않은 최초의 결품 2 발생 작업장

$$z_{1,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{차량 } i \text{가 작업장 } j \text{에서 결품 1 발생} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z_{2,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{차량 } i \text{가 작업장 } j \text{에서 결품 2 발생} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z_{3,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{1,i,j} \leq 16 \times (k_3 - j), j = 1..k_3 - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z_{4,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{2,i,j} \leq 16 \times (k_3 - j), j = 1..k_3 - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

위의 기호에서  $z_{3,i,j}$ 와  $z_{4,i,j}$ 는 각각 차량  $i$ 의 작업장  $j$ 에서 발생한 결품 1부품과 결품 2 부품이 버퍼 작업장에서 작업이 종료될 때까지 공급이 완료되면 1의 값을 가지는 것을 의미한다. 만일 공급이 되지 않으면 다음 버퍼 작업장에서 작업이 수행되어야 한다.

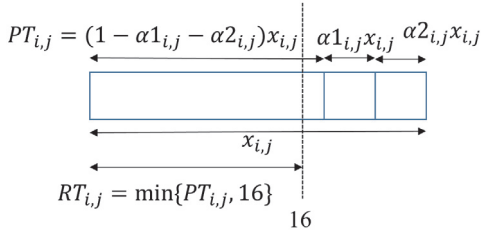


Fig. 4. Working time in station  $j$

Figure 4는 차량  $i$ 가 작업장  $j$ 에서 실제로 수행하는 작업시간의 관계를 보여준다.  $PT_{i,j}$ 는 결품 부품을 제외하고 나머지 부품을 작업하는데 소요되는 시간으로 식(1)과 같다.

$$PT_{i,j} = (1 - \alpha_{1,i,j}y_{1,i,j} - \alpha_{2,i,j}y_{2,i,j})x_{i,j} \quad (1)$$

하지만 각 작업장에서 최대 작업시간은 16시간이기 때문에 실제 수행 가능한 작업시간 ( $RT_{i,j}$ )은 식(2)와 같다.

$$RT_{i,j} = \min\{16, PT_{i,j}\} \quad (2)$$

이 경우  $BST_1$ 의 작업부하( $PTB_{i,1}$ )은 식(3)과 같이 정의되는데, 여기에는 선행작업장에서 16시간을 초과하여 미완료된 작업시간, 선행작업장의 결품 1 작업시간, 선행작업장의 결품 2 작업시간, 결품 2로 인한 후속 작업장에서의 작업 중단시간 등이 포함된다. 식(4)는 버퍼 작업장 1 역시 16시간이라는 상한 때문에 실제로 수행할 수 있는 작업시간( $RTB_{i,1}$ )을 의미한다.

$$PTB_{i,1} = \sum_{j=1}^{k_2} \max\{0, PT_{i,j} - RT_{i,j}\} \quad (3)$$

$$+ \sum_{j=1}^{k_2} \alpha_{1,i,j}x_{i,j}z_{1,i,j}z_{3,i,j} + \sum_{j=k_1}^{k_2-1} \alpha_{2,i,j}x_{i,j}z_{2,i,k_1}z_{4,i,k_1} + \sum_{j=k_1+1}^{k_2} RT_{i,j}$$

$$RTB_{i,1} = \min\{16, PTB_{i,1}\} \quad (4)$$

동일한 논리로  $BST_2$ 의 작업부하( $PTB_{i,2}$ )와 실제 작업시간( $RTB_{i,2}$ )을 계산할 수 있는데, 이 경우에는  $BST_1$ 에서 선행 작업장( $S_1$ )의 미완성 작업을 모두 처리한 경우와 처리하지 못한 경우,  $S_1$ 에서 발생한 결품2가  $BST_1$ 에서의 작업종료 이전까지 모두 도착한 경우와 도착하지 않은 것이 있는 경우 등 매우 다양한 경우의 수가 발생한다. 따라서 편의상 각각의 수식을 제시하지는 않겠지만 시뮬레이션 모델에는 반영되었음을 밝혀둔다.

## 4. 시뮬레이션 실험

### 4.1 성능지표

본 연구에서 사용할 성능 지표는 아래와 같이 정의한다. Figure 5는 하나의 편성에 대해 각 성능지표들 사이의 관계를 도식화시킨 것이다.

- ①  $ILT_{f,i}$  (In-house Vehicle Lead Time): 편성  $f$ 의 차량  $i$ 가 첫 번째 내부작업장에서 작업을 시작한 후 마지막 내부작업장에서 작업을 종료할 때까지 소요되는 시간

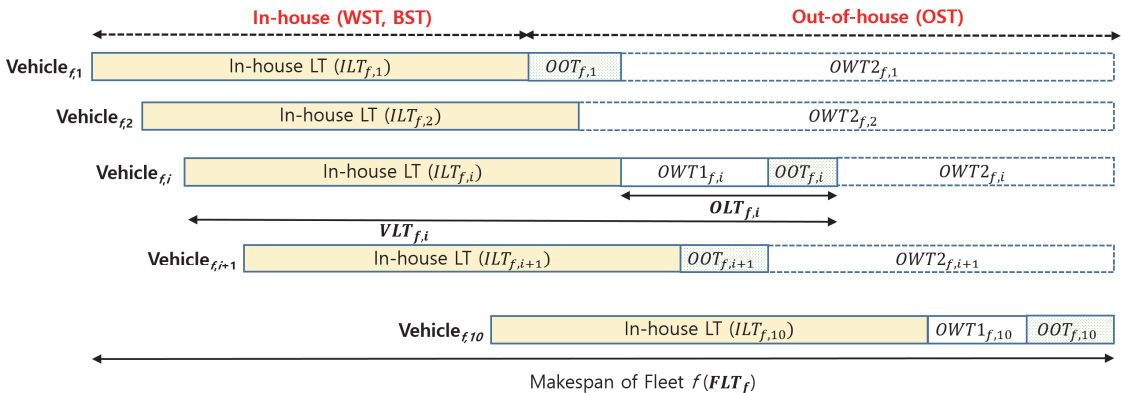


Fig. 5. Structure of performance measures for a fleet

- ②  $OWT1_{f,i}$  (OST Waiting Time 1): 편성  $f$ 의 차량  $i$ 가 OST에 들어가서 필요한 작업을 수행할 작업팀을 기다리는 시간(결품도착대기시간 포함)
- ③  $OOT_{f,i}$  (OST Operation Time): 편성  $f$ 의 차량  $i$ 가 OST에 들어가서 필요한 작업을 수행하는 시간
- ④  $OWT2_{f,i}$  (OST Waiting Time 2): 편성  $j$ 의 차량  $i$ 가 OST에서 작업을 마치고 편성이 완료될 때까지 기다리는 시간
- ⑤  $OLT_{f,i}$  (OST Lead Time):  
 $OLT_{f,i} = OWT1_{f,i} + OOT_{f,i}$
- ⑥  $VLT_{f,i}$  (Vehicle Lead Time): 편성  $f$ 의 차량  $i$ 가 내부 첫 번째 작업장에서 작업을 시작한 후 OST에서 작업을 완료할 때까지 소요되는 시간,  
 $VLT_{f,i} = ILT_{f,i} + OLT_{f,i}$
- ⑦  $FLT_f$  (Fleet Lead Time): 편성  $f$ 의 1호 차량이 첫 번째 작업장에서 작업을 시작한 후 OST에서 편성구성을 위한 맨 마지막 차량이 작업을 완료할 때까지 소요되는 시간  
 $FLT_f = \max_i \{ ILT_{f,i} + OWT1_{f,i} + OOT_{f,i} \}$   
 - 편성  $f$ 의 1호차 투입시간
- ⑧  $VTact$  (Vehicle Tact Time) : OST를 통과한 차량들의 평균 택트시간
- ⑨  $FTact$  (Fleet Tact Time) : OST에서 편성 구성을 마친 편성들의 평균 택트시간
- ⑩  $PMakespan$  (Project Makespan): 한 프로젝트를 가 종료될 때까지 평균소요시간
- ⑪  $PTardy$  (Project Tardiness): 한 프로젝트의 평균 납기지연시간
- ⑫  $Util_{ow}$  (Utilization of OST Worker): 외부 작업팀의 평균 가동률 (순수작업시간 기준)

## 4.2 비용 요소

비용은 크게 인건비와 지체보상금으로 구성된다. 인건비는 특성상 실제로 일을 하는 시간은 물론 휴휴(혹은 대기) 시간에 대해서도 지급되어야 한다. 총 비용은 프로젝트를 기준으로 하는데 프로젝트는 10량을 1편성으로 하고, 10편성을 생산하는 것으로 가정한다. 의사결정을 위해 사용하는 비용 요소는 다음과 같다.

- ①  $C_{rw}$  : In-house에서 작업하는 내부작업자 1팀의 1일 인건비
- ②  $C_{ow}$  : OST에서 작업을 하는 외부작업자 1팀의 1

일 인건비

- ③  $C_{pd}$  : 프로젝트당 1일 납기지연비용

내부작업자  $n_1$  팀과 외부작업자  $n_2$  팀이 투입된다고 할 때, 한 프로젝트당 소요되는 인건비는 총 비용은 프로젝트를 기준으로 하는데 프로젝트는 10량을 1편성으로 하고, 10편성을 생산하는 것으로 가정한다. 따라서 총비용 (TC; Total Cost)은 식(5)와 같이 정의할 수 있다.

$$TC = (100 \times n_1 \times C_{rw} \times \frac{VTact}{8}) + (100 \times n_2 \times C_{ow} \times \frac{mean(OOT_{f,i})}{8} \times \frac{1}{Util_{ow}}) + C_{pd} \times PTardy \quad (5)$$

## 4.3 실험조건

시뮬레이션 모델은 각각의 전략에 대해 ARENA를 이용하여 개발하였다. Warmup 기간은 1600시간으로 하였으며, 데이터 수집기간은  $16 \times 10,000 = 160,000$  시간으로 하였다. 시뮬레이션 반복횟수는 20회로 하여 각 성능지표의 평균을 구하였다.

첫 번째 공정의 투입시간간격은 16시간으로 설정하였는데, 이는 프로젝트 수주시 설정한 16시간 택트에 맞추어서 차체제작, 도장 등 선행 공정들의 생산계획이 수립되기 때문이다. 물론 선행공정에서도 생산지연 등의 문제가 발생할 수 있지만 본 논문에서는 이를 무시하였다. 따라서 시뮬레이션 수행시 전략에 따라 의장공장 직전의 버퍼에 많은 차량이 대기하는 결과가 발생하는데, 이는 현실적으로도 자주 발생하는 공간부족 현상으로 나타난다. 그 대신에 투입 후 첫 번째 공정이 시작될 때까지의 대기시간은 통계량 설정에 반영하지 않았다.

또한 하나의 프로젝트는 10편성으로 가정하였으며, 1편성은 10대의 차량으로 구성되는 것으로 가정하였다. 따라서 시뮬레이션은 100개의 프로젝트를 수행시켜 얻은 평균결과라고 할 수 있다.

Table 1은 3가지 전략에 따라 각 작업장의 역할과 각 작업장에서의 공정소요시간을 제시하고 있다. 전략 1의 경우 공장 내부의 작업장 3번과 8번은 단순한 버퍼로 운영된다고 가정한 것이며, 전략 3의 경우에는 작업장 3번과 8번이 선행 작업장에서 완료하지 못한 작업을 수행하는 BTS로 활용되고 있음을 보여준다. 전략 1에서 NORM (16, 2.4)의 의미는 각 작업장에서의 실제 작업시간이 평균 16시간, 표준편차가 2.4시간인 정규분포라는 의미다.

**Table 1.** Process time of each station (hour)

ST No.	Strategies								
	Strategy1			Strategy2			Strategy3		
	Role	Work-load	Process time	Role	Work-load	Process time	Role	Work-load	Process time
ST1	WST <sub>1</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>1</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>1</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST2	WST <sub>2</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>2</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>2</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST3	BST <sub>1</sub>		0	WST <sub>3</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	BST <sub>1</sub>		$RTB_{i,1}$
ST4	WST <sub>3</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>4</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>3</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST5	WST <sub>4</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>5</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>4</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST6	WST <sub>5</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>6</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>5</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST7	WST <sub>6</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>7</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>6</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST8	BST <sub>2</sub>		0	WST <sub>8</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	BST <sub>2</sub>		$RTB_{i,2}$
ST9	WST <sub>7</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>9</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>7</sub>	16	NORM(16, 2.4)
ST10	WST <sub>8</sub>	16	NORM(16, 2.4)	WST <sub>10</sub>	12.8	NORM(12.8, 1.92)	WST <sub>8</sub>	16	NORM(16, 2.4)
OST	Fleet waiting	0	$OWT2_{f,i}$	Fleet waiting	0	$OWT2_{f,i}$	Working and waiting		$OWT1_{f,i} + OOT_{f,i} + OWT2_{f,i}$

**Table 2.** Data related to shortage in each station

	Strategies					
	Strategy1		Strategy2		Strategy3	
	Shortage 1	Shortage 2	Shortage 1	Shortage 2	Shortage 1	Shortage 2
Process time in WST ( $x_{i,j}$ )	NORM(16, 2.4)		NORM(12.8, 1.92)		NORM(16, 2.4)	
Shortage probability ( $p1_{i,j}, p2_{i,j}$ )	10%	5%	10%	5%	10%	5%
Shortage period ( $y1_{i,j}, y2_{i,j}$ )	EXPO(10)	EXPO(10)	EXPO(10)	EXPO(10)	EXPO(10)	EXPO(10)
Process time of shortage parts ( $\alpha1_{i,j} \times x_{i,j}, \alpha2_{i,j} \times x_{i,j}$ )	$0.1 \times x_{i,j}$	$0.05 \times x_{i,j}$	$0.1 \times x_{i,j}$	$0.05 \times x_{i,j}$	$0.1 \times x_{i,j}$	$0.05 \times x_{i,j}$

Table 2는 제품에 대한 입력자료로 실제 현장의 데이터 특성을 고려한 가상의 데이터임을 밝혀둔다. 제품 유형 1과 유형 2가 발생할 확률은 각각 10%, 5%로 가정하였다. 또한 결품된 부품의 작업시간은 해당 작업장에 할당된 공정시간( $x_{i,j}$ )의 10%, 5%로 가정하였다. 마지막으로 결품된 부품이 도착할 때까지 소요되는 시간은 모두 평균이 10시간인 지수분포를 가정하였다.

**4.4 실험결과**

세 가지 전략에 따른 시뮬레이션 실험 결과는 Table 3에 제시되어 있다. 첫 번째 관심사인 차량 1대의 택트시간( $VTact$ )의 경우 세 가지 전략에서 얻은 값이 19.66시간, 17.88시간, 16.00시간이다. 1편성(10량)의 차량이 완성되는 시간간격인  $FTact$ 의 경우도 각각 196.57시간,

178.78시간, 160시간으로 전략 3의 경우가 가장 짧았다. 한 편성의 1호 차량이 내부작업장의 첫 번째 공정에서 작업을 시작한 후 마지막 차량이 OST에서 편성 구성을 마칠 때까지 소요되는 시간인  $FLT_f$ 는 각각 342.64시간, 318.59시간, 355.21시간으로 전략 3의 경우가 가장 길었다. 하지만 전략 3의 경우 OST에서는 병렬 작업이 가능하기 때문에  $FLT_f$ 는 길더라도  $FTact$ 는 최소가 된다. 참고로 내부작업장에 투입되는 순서는 1호기부터 차례대로 투입이 되지만 OST에서 작업이 종료되는 시점은 순서가 뒤바뀔 수 있다는 점을 유념해야 한다.

16시간 간격으로 차량 1대를 생산하겠다는 공장의 목표를 고려해 볼 때 160000시간 동안의 시뮬레이션 결과 생산량은 8139.5대, 8947.9대, 10000대가 되어 전략 3만이 목표를 달성할 수 있었다. 이 결과는 하나의 프로젝트



**Table 3.** Simulation results of three strategies

Performance measures		Strategies					
		Strategy1		Strategy2		Strategy3 (OST 3teams)	
		Average	95% C.I	Average	95% C.I	Average	95% C.I
Vehicle in-house lead time ( $ILT_{f,i}$ )		165.78	0.3576	157.78	0.2474	160.00	0.0000
Vehicle OST lead time ( $OLT_{f,i}$ )		0	0	0	0	27.22	0.2502
Vehicle operation time in OST ( $OOT_{f,i}$ )*		0	0	0	0	26.77	0.1863
Fleet lead time ( $FLT_f$ )		342.64	0.5572	318.59	0.6102	355.21	0.6786
Vehicle quantities produced		8139.5	10.539	8949.7	20.258	10000.0	0.5935
Fleet quantities produced (Fleet)		814.05	1.1710	894.90	2.0138	1000.0	0.2630
Vehicle tact time ( $VTact$ )		19.66	0.0253	17.88	0.0405	16.00	0.0000
Fleet tact time ( $FTact$ )		196.57	0.2531	178.78	0.4002	160.00	0.0254
Project makespan ( $PMakespan$ )		2111.51	2.4677	1927.67	4.6174	1794.61	1.3419
Number of vehicles working in OST		0	0	0	0	9285.9	11.043
Number of worker teams	In-house	8		10		10	
	OST	0		0		3	
	Total	8		10		13	

\* 실제 OST에서 작업을 수행한 차량의 평균

(100량)를 완성하는데 소요되는 총시간(Project Makespan)을 보면 이해할 수 있는데, 이 값이 각각 2111.5시간, 1927.7시간, 1794.6시간이 되어 납기지연의 가능성이 전략 1이 가장 높다는 것을 알 수 있다.

물론 전략 1은 8팀의 내부작업팀이 필요하며, 전략 2는 10팀, 전략 3은 내부작업자 10팀과 외부 작업자 3팀이 필요하여 인건비가 추가로 소요된다는 단점이 있다. 하지만 이러한 인건비의 증가에도 불구하고 납기지연에 따른 지체보상금 지급 규모를 고려한다면 기업의 입장에서서는 최적의 전략 선택에 대한 당위성을 느낄 수 있다.

#### 4.5 비용 분석

비용 계산을 위한 기초 자료는 다음 Table 4와 같다. 비용은 한 프로젝트(10편성, 총 100량)를 완료하는데 필요한 인건비와 한 프로젝트를 모두 완료하는데 소요되는 시간 (Makespan)이 납기를 지키지 못했을 때 발생하는 지체보상금의 합으로 구성하였다. 작업자 1인의 연간 비용은 내부작업자의 경우 1억원, 외주작업자의 경우 8천만원으로 정하였으며, 연간 근무일수는 240일로 하여 1일 인건비를 계산하였다. 각 작업장에서 일하는 작업자의 수는 4인으로 가정하였기 때문에 작업자 1팀의 1일 인건비는 내·외부 각각 167만원, 133만원으로 계산된다.

차량 1량의 가격은 10억원으로 가정하였으며, 한 프로

젝트는 100량의 차량으로 가정하였기 때문에 한 프로젝트의 가격은 1000억원으로 가정하였다. 이 때 프로젝트가 납기를 지키지 못하는 경우 지체보상금은 프로젝트 계약금액에 대해 근무일을 기준으로 하루당 0.1%의 비율로 가정하였다.

Table 5는 전략 1, 2와 OST를 활용하는 전략 3에서 OST 작업팀이 3팀인 경우와 2팀인 경우를 구분하여 분석한 것이다.

해당 내부작업장은 흐름라인이기 때문에 각 작업장에서 작업자가 근무하는 시간은 실제 작업을 수행하는 시간과 결품대기 및 막힘대기시간을 합한 총시간에 의해 결정이 된다. 따라서 내부작업장에서 차량 1대를 조립하는데 발생하는 인건비는 차량의 택트시간을 이용하여 식 (5)의 첫 번째 항에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다. 그 결과 전략 1의 경우 한 프로젝트의 내부작업자 인건비는 32.76억원으로 계산된다.

전략 1과 2에서는 OST의 역할이 편성구성을 위한 대기공간이므로 별도의 작업이 필요하지 않고, 따라서 인건비도 발생하지 않는다. 반면에 전략 3에서는 내부 작업장에서 완료하지 못한 나머지 작업들을 수행해야 하므로 인건비가 발생한다. 실험결과 OST에서 작업을 수행해야 하는 차량의 비율은 92.86%로 추정되었다. 따라서 한 프로젝트 100대의 차량 중에서 92.86대는 OST에서 작업을

**Table 4.** Data related to Cost

Labor Cost			Delay Penalty Cost	
Worker type	In-house worker	Outsourcing worker	Price per vehicle (m.₩*)	1,000
Working days per year	240	240	Price per fleet (m.₩)	10,000
Annual labor cost per person (m.₩)	100	80	Price per project (m.₩)	100,000
Annual labor cost per team (m.₩)	400	320	Rate of compensation per working day (%)	0.1
Daily labor cost per team (m.₩)	1.667	1.333	Daily compensation cost for project delay (m.₩)	100

\* m.₩ : million Korean Won

**Table 5.** Results of cost analysis

Performance Measures		Strategies			
		Strategy1	Strategy2	Strategy3	
				OST 3teams	OST 2teams
Quantities per project (vehicle)		100	100	100	100
Labor costs of In-house	Number of worker teams	8	10	10	10
	Tact time of vehicle (hr)	19.66	17.88	16.00	16.00
	Labor cost per vehicle (m.₩)	32.76	32.74	33.33	33.33
	Labor cost per project (m.₩)	3,276	3,274	3,333	3,333
Labor costs of OST	Number of worker teams	0	0	3	2
	Probability of vehicles assembled in OST	0	0	0.9286	0.9286
	Number of vehicles assembled in OST per a project	0	0	92.86	92.86
	Number of vehicles assembled in OST per a team	0	0	30.95	46.43
	Mean assembly time per vehicle in OST (hr)	0	0	26.77	26.77
	Utilization of work team in OST (%)	0	0	51.79	77.68
	Mean worker time per vehicle in OST (hr)	0	0	51.69	34.46
	Labor Cost per vehicle (m.₩)	0	0	7.99	5.33
Labor Cost per project (m.₩)	0	0	799.9	533.3	
Penalty cost for project delay	Project due date (hr)	1800	1800	1800	1800
	Project makespan (hr)	2,111.51	1,927.67	1,794.61	1,822.56
	Project mean tardiness (hr)	311.51	127.97	12.90	35.33
	Project mean tardiness (day)	38.94	16.00	1.62	4.42
	Compensation cost for tardiness (m.₩)	3,893.88	1,599.63	161.25	441.63
Total cost (m.₩)		7170.04	5324.00	4294.53	4308.27

수행한다. 이 들 중 일부는 결품된 부품이 도착할 때까지 대기한 후 OST 작업자를 할당받기 위해 추가로 대기해야 하며, 일부는 OST작업자 할당만 대기하면 된다. 따라서 OST에 들어올 때는 차량이 호기별로 들어오지만 OST에서 작업이 종료되는 시점은 먼저 들어온 차량이 늦게 완료될 수 있다. 하지만 특정 편성이 완료되는 시점은 동일 편성의 1호 차량부터 10호 차량까지 모두 작업이 완료되는 시점이 된다.

OST 작업자 인건비는 식(5)의 두 번째 항을 이용하여

구한다. OST에서 조립작업을 수행해야 하는 차량 1량당 소요되는 평균작업시간( $OOT_{f,i}$ )은 26.77시간이다. 이때 OST 작업팀의 평균 가동률은 3팀이 투입되는 경우 51.79% 이므로 차량 1량당 OST 작업팀의 근무시간은  $26.77/0.5179=51.69$ 시간으로 계산된다. 따라서 OST차량 1량당 인건비는  $1.33\text{백만원} \times 51.69\text{시간}/8\text{시간} = 7.999\text{백만원}$ 이 되며, 한 프로젝트를 완료하는데 소요되는 OST인건비는 799.9백만원이다. 만일 OST 작업팀을 2팀으로 하면 가동률이 77.68%로 높아지므로 인건비 절감효과는 있지만

프로젝트 종료시간이 지연되어 지체보상금이 발생할 가능성이 높아진다.

총 비용을 구성하는 마지막 항목은 지체보상금이다. 지체보상금은 발주처에서 납기를 얼마나 인정해 주느냐에 따라 달라지는데, 발주처 입장에서는 가급적 납기를 짧게 정하려고 한다. 지체보상금은 납기에 비해 일찍 종료된 경우에는 발생하지 않고 늦은 경우에 대해서만 발생하기 때문에 납기지연시간(Tardiness)의 개념을 이용하여 산정하였다. Table 5는 납기가 1800시간으로 결정된 경우의 지체보상금 규모를 제시한다. 이 경우에 프로젝트당 총비용은 OST 3팀을 투입하는 전략 3이 최선의 전략이 된다. Figure 6은 납기가 변할 때 전략들 간의 총비용 변화를 보여준다. 납기가 충분히 길면 전략 1이 최선이고 납기가 짧아질수록 OST 작업팀을 3팀으로 하는 전략 3이 최선의 정책이 된다.

현실적으로 전략 3을 선호하는 또 다른 이유는 내부작업장에서 개별 차량의 생산 시작시점이 고정되기 때문에 부품 납품처도 납품 시기를 안정적으로 추정할 수 있기 때문에 결품 확률이 줄어들 수 있다는 점이다. 이 경우에는 OST의 인건비도 줄일 수 있고, 프로젝트 완료시간도 좀 더 단축시킬 수 있다.

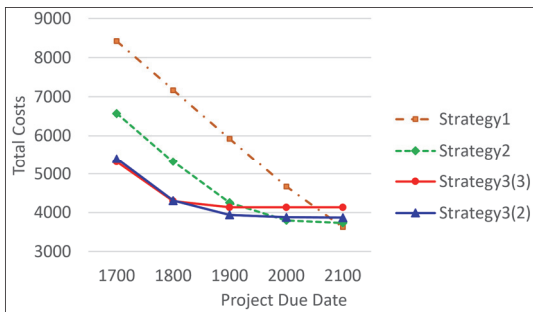


Fig. 6. Sensitivity analysis for due date

## 5. 결론

이 논문에서는 불가피하게 흐름라인 생산방식을 고수할 수밖에 없는 철도차량 의장공장에서 납기 지연을 줄여서 총비용을 감축시키기 위한 몇 가지 운영전략에 대해 분석해 보았다. 납기 지연의 주요 원인은 작업자 작업시간의 변동요인과 조립공정의 특성상 부품의 결품으로 인한 조립지연이 주요 원인이다.

흐름라인에서 가장 이상적인 상황은 각 작업장에서의 공정시간에 대한 분산을 0으로 만들어서 변동성을 제거

하고, 결품이 발생하지 않도록 관리수준을 향상시키는 것이다. 하지만 이 방법을 당장 도입하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 흐름라인인 내부작업장은 택트시간을 유지하면서 운영하는 대신 완료되지 못한 작업을 병렬라인으로 구성된 OST를 활용하여 수행하는 전략을 추가로 제시하였다. 이 전략의 이면에는 내부작업자인 노조와의 합의문제, 외부작업자의 인건비가 저렴하다는 현실 상황이 존재한다. 분석 결과 납기가 얼마나 짧아지게 결정되었느냐에 따라서 최선의 운영전략이 달라진다는 것을 확인하였다.

이 논문에서는 다루지 않았지만 전략 3에서 BTS<sub>1</sub>과 BTS<sub>2</sub>의 위치를 어디로 정하는 것이 OST에서의 작업을 줄일 수 있는가에 대한 최적화문제를 고려할 수 있는데 이는 향후 연구 주제로 남겨둔다. 또한 내부작업장에서 택트시간을 유지할 때 결품확률이 감소할 수 있을 것으로 예상되므로, 결품 감소가 총 비용에 미치는 영향도 추가 분석이 가능하다.

## References

- [1] Baek, J. W. and S. K. Moon (2014) "The M/M/1 Queue with a Production-inventory System and Lost Sales", *Applied Mathematics and Computation*, 233(1), 534-544.
- [2] Baek, J. W. and S. K. Moon (2016) "A Production-inventory System with a Markovian Service Queue and Lost Sales", *Journal of the Korean Statistical Society*, 45(1), 14-24.
- [3] Becker, C. and A. Scholl (2006) "A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing", *European journal of operational research*, 168, 694-715.
- [4] Gershwin, S. B. (1994), *Manufacturing Systems Engineering*, Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A.
- [5] Ko, S. S., J. Kang, and E. Y. Kwon (2016) "An (s, S) Inventory Model with Llevel-dependent G/M/1-type Structure", *Journal of Industrial and Management Optimization*, 12(2), 609-624.
- [6] Krishnamoorthy, A., D. Shajin, and B. Lakshmy (2015) "On a Queueing- inventory with Reservation, Cancellation, Common Life and Retrial", *Annals of Operations Research*, 247(1), 365-389.
- [7] Moon, D.H., H.I. Cho, H.S. Kim, H. Sunwoo and

- J.Y. Jung (2006) "A Case Study of the Body Shop Design in an Automotive Factory Using 3D Simulation", *International Journal of Production Research*, 44(18-19), 4121-4135.
- [8] Moon, D.H., D.S. Shon, Y.H. Lee and Y.W. Shin (2018) "Comparison of Flow Line Layout and Fixed-Position Layout in a Rail Vehicle Assembly Factory", *Journal of the Korea Society for Simulation*, 27(3), 117-129.  
(문덕희, 손동수, 이영훈, 신양우 (2018) "철도차량 의장공장에서 흐름라인방식과 고정위치형 배치방식의 비교", 한국시뮬레이션학회논문지, 제27권 제3호, 117-129.)
- [9] Moon, D.H., G.M. Baek, D.O. Kim and Y.W. Shin (2020) "Approximation of Unreliable Flow Line Considering Parts Supply and Assembly", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 46 (4), 369-381.  
(문덕희, 백경민, 김동욱, 신양우 (2020) "부품공급과 조립을 고려한 고장이 발생하는 흐름라인의 근사방법", 대한산업공학회지, 제46권 제4호, 369-381.)
- [10] Papadopoulos, C. T., J. Li, and M. E. J. O'Kelly (2019) "A Classification and Review of Timed Markov Models of Manufacturing Systems", *Computers & Industrial Engineering*, 128, 219-244.
- [11] Tompkins, J. A., J. A. White, Y. A. Bozer, E. H. Frazelle, J. M. A. Tanchoco and J. Trevino (1996) *Facilities Planning*(2nd Ed.), John Wiley & Sons, New York, USA.
- [12] Saffari, M., S. Asmussen, and R. Haji (2013) "The M/M/1 Queue with Inventory, Lost Sale, and General Lead Times", *Queueing Systems*, 75 (1), 65-77.
- [13] Schwarz, M., C. Sauer, H. Daduna, R. Kulik, and R. Szekli (2006) "M/M/1 Queueing Systems with Inventory", *Queueing Systems*, 54(1), 55-78.



**김 동 욱** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7239-2002> / [positive\\_ok@naver.com](mailto:positive_ok@naver.com))

2013~ 2019 창원대학교 산업시스템공학과 공학사  
 2019~ 2021 창원대학교 친환경해양플랜트FEED과정 공학석사  
 2021~ 2022 창원대학교 산업기술연구원 연구원  
 2022~ 현재 현대자동차 생산정원개선팀

관심분야 : 생산시스템 분석, 시뮬레이션 응용, Scheduling



**신 양 우** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-3107-4569> / [ywshin@changwon.ac.kr](mailto:ywshin@changwon.ac.kr))

1984 경북대학교 수학과 이학사  
 1986 한국과학기술원 응용수학과 이학석사  
 1991 한국과학기술원 수학과 이학박사  
 1991~ 현재 창원대학교 통계학과 교수

관심분야 : 확률과정론, 대기행렬이론, Manufacturing System Design



**문 덕 희** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7660-4976> / [dhmoon@changwon.ac.kr](mailto:dhmoon@changwon.ac.kr))

1984 한양대학교 산업공학과 공학사  
 1986 한국과학기술원 산업공학과 공학석사  
 1991 한국과학기술원 산업공학과 공학박사  
 1990~ 현재 창원대학교 산업시스템공학과 교수

관심분야 : Facilities Planning, 시뮬레이션 응용, Scheduling