



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](#)

공학석사 학위논문

조선소 성형공정의 작업 변동성을 고려한  
모델 안정화 기법 기반 인력 계획 연구

Research on workforce planning based on model enhancement method  
with variability of work : forming shop

지도교수 남종호

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

신혜수

본 논문을 신혜수의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장      박 주 용      (인)

위    원      남 중 호      (인)

위    원      우 중 훈      (인)



2019년 12월 27일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

<b>List of Tables</b> .....	iii
<b>List of Figures</b> .....	iv
<b>Abstract</b> .....	v
<b>1. 서 론</b> .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 관련 연구 동향 .....	2
1.3 연구 목적 .....	4
<b>2. 적용개념</b> .....	5
2.1 이산 사건 시뮬레이션 .....	5
2.2 AnyLogic 시뮬레이션 솔루션 .....	7
2.3 정수 최적화 계획법 ( Integer linear optimization programming) .....	9
2.4 모델 강화 ( ME, Model enhancement ) .....	10
<b>3. 성형 공정 분석 및 시뮬레이션 모델링</b> .....	12
3.1 조선소 성형 공정 분석 .....	12
3.2 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 설정 .....	14
3.3 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 확률 변수 설정 .....	15
3.3.1 공정 작업시간 설정 .....	15
3.3.2 기계 공정의 고장 상태 설정 .....	16
3.3.3 성형 공정 중 공정 간의 이동 시간 설정 .....	18
3.4 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 작업시간 설정 .....	19
3.5 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 실행 및 결과 데이터 .....	20
<b>4. 최적화 계획 및 모델 강화 적용</b> .....	23
4.1 인력 할당을 위한 정수 계획 최적화 모델 설계 .....	24

4.1.1 성형 공정 작업자와 생산량 간 관계식 설정 .....	24
4.1.2 성형 공정 인력 계획 최적화 모형 설계 .....	28
4.2 정수 계획 최적화 모델 결과 데이터 .....	31
4.3 반복 작업을 통한 모델 강화 .....	33
4.2.1 반복 작업의 종료조건 .....	33
4.2.2 Case 1 반복 작업 .....	34
4.2.3 Case 2 반복 작업 .....	39
4.2.4 Case 3 반복 작업 .....	44
<b>5. 결과 분석 및 결론 .....</b>	<b>48</b>
5.1 각 Case별 반복 작업에 따른 MAPE 비교 .....	48
5.2 각 Case별 공정 관련 비용 비교 .....	53
5.3 연구 결론 .....	59

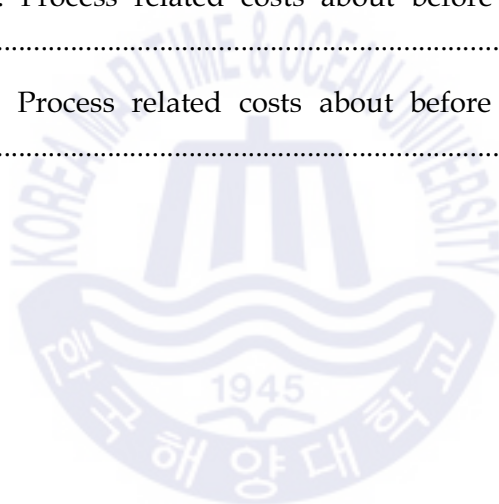


## List of Tables

<b>Table 1</b> The example of Material data variables .....	15
<b>Table 2</b> The result of running simulation model .....	22
<b>Table 3</b> Stochastic relations between workers and production per each period .....	24
<b>Table 4-(a)</b> The production of period 1 by the number of workers .....	26
<b>Table 4-(b)</b> The average production of period 2~6 by the number of workers .....	26
<b>Table 5</b> The process-related operational information .....	28
<b>Table 6</b> The weekly pay of Worker .....	29
<b>Table 7-(a)</b> Case 1 : The number of product demand .....	30
<b>Table 7-(b)</b> Case 2 : The number of product demand .....	30
<b>Table 7-(c)</b> Case 3 : The number of product demand .....	30
<b>Table 8-(a)</b> Case 1 : Integer Optimization plan established by relational equations .....	31
<b>Table 8-(b)</b> Case 2 : Integer Optimization plan established by relational equations .....	31
<b>Table 8-(c)</b> Case 3 : Integer Optimization plan established by relational equations .....	32
<b>Table 9</b> Case 1 : Simulation result value with optimization plan .....	34
<b>Table 10-(a)</b> Case 1 : The integer optimization plan established by twice relational equations (17),(18) .....	34
<b>Table 10-(b)</b> Case 1 : Simulation result value with twice improved optimization plan .....	35
<b>Table 11-(a)</b> Case 1 : The integer optimization plan established by 3 times relational equations (19),(20) .....	35
<b>Table 11-(b)</b> Case 1 : Simulation result value with 3 times improved optimization plan .....	36

<b>Table 12-(a)</b> Case 1 : The integer optimization plan established by 4 times relational equations (21),(22) .....	36
<b>Table 12-(b)</b> Case 1 : Simulation result value with 4 times improved optimization plan .....	37
<b>Table 13-(a)</b> The integer optimization plan established by 5 times relational equations (23),(24) .....	37
<b>Table 13-(b)</b> Simulation result value with 5 times improved optimization plan .....	38
<b>Table 14</b> Case 2 : Simulation result value with optimization plan .....	39
<b>Table 15-(a)</b> Case 2 : The integer optimization plan established by twice relational equations (25),(26) .....	39
<b>Table 15-(b)</b> Case 2 : Simulation result value with twice improved optimization plan .....	40
<b>Table 16-(a)</b> Case 2 : The integer optimization plan established by 3 times relational equations (27),(28) .....	40
<b>Table 16-(b)</b> Case 2 : Simulation result value with 3 times improved optimization plan .....	41
<b>Table 17-(a)</b> Case 2 : The integer optimization plan established by 4 times relational equations (29),(30) .....	41
<b>Table 17-(b)</b> Case 2 : Simulation result value with 4 times improved optimization plan .....	42
<b>Table 18-(a)</b> Case 2 : The integer optimization plan established by 5 times relational equations (31),(32) .....	42
<b>Table 18-(b)</b> Case 2 : Simulation result value with 5 times improved optimization plan .....	43
<b>Table 19</b> Case 3 : Simulation result value with optimization plan .....	44
<b>Table 20-(a)</b> Case 3 : The integer optimization plan established by twice relational equations (33),(34) .....	44
<b>Table 20-(b)</b> Case 3 : Simulation result value with twice improved optimization plan .....	45
<b>Table 21-(a)</b> Case 3 : The integer optimization plan established by 3 times relational equations (35),(36) .....	45

<b>Table 21-(b)</b> Case 3 : Simulation result value with 3 times improved optimization plan .....	46
<b>Table 22-(a)</b> Case 3 : The integer optimization plan established by 4 times relational equations (37),(38) .....	46
<b>Table 22-(b)</b> Case 3 : Simulation result value with 4 times improved optimization plan .....	47
<b>Table 23-(a)</b> Case 1 : MAPE comparison by iterations .....	48
<b>Table 23-(b)</b> Case 2 : MAPE comparison by iterations .....	48
<b>Table 23-(c)</b> Case 3 : MAPE comparison by iterations .....	49
<b>Table 24-(a)</b> Case 1 : Process related costs about before and after model enhancement .....	58
<b>Table 24-(b)</b> Case 2 : Process related costs about before and after model enhancement .....	58
<b>Table 24-(c)</b> Case 3 : Process related costs about before and after model enhancement .....	58





## List of Figures

<b>Fig. 1</b> Simulation language provided by “AnyLogic” .....	7
<b>Fig. 2</b> “Model enhancement” performance process .....	10
<b>Fig. 3</b> Model enhancement algorithm .....	11
<b>Fig. 4</b> Result of “Model enhancement” .....	11
<b>Fig. 5</b> Forming shop of a shipyard with labor-intensive characteristics	12
<b>Fig. 6</b> The workflow and layout of the forming shop .....	13
<b>Fig. 7</b> Forming shop discrete event simulation model .....	14
<b>Fig. 8</b> Hot and cold forging process of forming shop .....	16
<b>Fig. 9</b> Failure and maintenance settings of the facility .....	16
<b>Fig. 10</b> Uniform stochastic function .....	17
<b>Fig. 11</b> Triangular AV stochastic distribution .....	17
<b>Fig. 12</b> Travel time between forming shop .....	18
<b>Fig. 13</b> Setting travel time between forming shop .....	18
<b>Fig. 14</b> Triangular stochastic distribution .....	19
<b>Fig. 15</b> Worker’s working hours on simulation model .....	19
<b>Fig. 16</b> Set model time and randomness of simulation model .....	20
<b>Fig. 17</b> Discrete event simulation model of forming shop .....	21
<b>Fig. 18</b> Setting the cycle time for Resource .....	22
<b>Fig. 19</b> The flow-chart of the model enhancement process .....	23
<b>Fig. 20</b> Stochastic relations between workers and production .....	24
<b>Fig. 21</b> The Relationship between worker and production in Period 1 obtained by least square technique .....	27
<b>Fig. 22</b> The Relationship between worker and production in Period 2 ~ 6 obtained by least square technique .....	27
<b>Fig. 23</b> Trends in employment size and total amount of employment by 9 major shipbuilding companies .....	28
<b>Fig. 24</b> Direct employment costs of in-house subcontracting workers in each industry .....	29

<b>Fig. 25</b> The empirical rule of standard deviation .....	33
<b>Fig. 26-(a)</b> Case 1 : Standard deviation of MAPE with iterations .....	38
<b>Fig. 26-(b)</b> Case 2 : Standard deviation of MAPE with iterations .....	43
<b>Fig. 26-(c)</b> Case 3 : Standard deviation of MAPE with iterations .....	47
<b>Fig. 27-(a)</b> Case 1 : MAPE between simulation model and optimization plan .....	50
<b>Fig. 27-(b)</b> Case 2 : MAPE between simulation model and optimization plan .....	51
<b>Fig. 27-(c)</b> Case 3 : MAPE between simulation model and optimization plan .....	52
<b>Fig. 28-(a)</b> Case 1 : Process cost before iteration .....	55
<b>Fig. 28-(b)</b> Case 1 : Process cost after iteration .....	55
<b>Fig. 29-(a)</b> Case 2 : Process cost before iteration .....	56
<b>Fig. 29-(b)</b> Case 2 : Process cost after iteration .....	56
<b>Fig. 30-(a)</b> Case 3 : Process cost before iteration .....	57
<b>Fig. 30-(b)</b> Case 3 : Process cost after iteration .....	57
<b>Fig. 31</b> Average process cost comparison by case .....	58

# Research on workforce planning based on model enhancement method with variability of work: forming shop

Shin, Hye Soo

Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The Material of the curved steel plate that is a part of hull is made through the forming process. In order to save the inventory and human resource related cost of forming shop, a plan that reflects the characteristics of the forming process should be established. However, scientific planning is not possible because decisions made by worker experience are predominant in the forming process. In addition, the prediction of mid to long term demand and the creation of an optimization plan for the production site based on it do not take into account the variability at the site, resulting in an error between the production activities and the plan. In order to improve this problem, this study constructed a model of cutting, cold, and hot molding processes using DES( discrete event simulation ) to simulate production activities performed in actual processes by reflecting the characteristics of mechanical processes such as failure and repair. In addition, a model hardening (ME, model enhancement) process was used to improve the equation by reflecting the result values of simulation repeatedly in planning using the water purification plan optimization method, which was used to reflect the relationship between the operator for each period calculated using the least squares method. This allowed the establishment of an optimal plan with a constant error rate considering the variability of the molding process.

**KEY WORDS:** Shipyard 조선소; Forming Shop 성형 공정; Planning 계획; Discrete event simulation 이산 사건 시뮬레이션; Model enhancement 모델 강화; Optimization 최적화.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

세계 조선 산업에서 한국의 경쟁력은 고부가 가치 선박인 대형컨테이너선, LNG / LPG선, 해양플랜트 등 대형화 및 고도화된 기술을 필요로 하는 제품들을 생산함으로써 확보할 수 있었다. 한국 조선 산업은 전통적인 선박 제조를 기점으로 생산 제품의 영역을 넓혀감에 따라 점차 대형화 및 고도화된 기술이 접목된 다양한 제품군을 다루게 되었다. 이러한 제품군들을 다루기 위해서는 유연하고 신속한 최신 기술 도입 및 효율적인 제품 생산 방법 등이 뒷받침 되어야 한다. (Park, 2016) 이미 조선소에서는 선박 수주 정보를 바탕으로 6 ~ 18 개월의 기간을 대상으로 수요 예측에 따른 생산 목표를 효율적으로 달성할 수 있도록 생산 능력, 고용 수준, 재고 수준 등의 전반적인 수준을 고려한 총괄 생산 계획을 수립하고 있지만, 실제 각 공정 정보를 기반으로 수립하기 어려워 총괄 생산 계획을 만족하기 위한 중 일정 생산 계획을 자주 변경해야하는 실정이다. 이는 수주산업 특성상 납기일 준수 문제가 치명적인 요소인 조선업에서는 반드시 해결해야 하는 문제이다. 하지만 현재까지 한국 조선소의 생산 공정들은 노동집약적 특성으로 다른 산업에 비해 공정 자동화 및 정보화가 어려운 상황이며, 작업자의 경험에 의한 의사 결정이 지배적이기 때문에 중, 장기적 기간의 상대 비용을 고려한 최적의 계획이 과학적으로 수립되지 못하고 있다. 작업자의 경험에 의한 작업 정보 및 의사 결정은 예기치 못한 변동에 대해 효율적인 작업 계획을 수립하기에 어렵고, 작업자의 부재나 퇴직 시 데이터가 소멸될 수 있으며, 인수인계 과정으로도 모든 데이터를 다음 작업자에게 인계하기 어렵다는 큰 단점이 있다. ( Michael.G, 2006 )

조선소 성형 공정은 위와 같이 노동집약적 특징을 지닌 공정 중 하나이다. 공정 전체의 특성을 고려한 정수 최적화 모형을 수립하는 과정에서 제약 조건을 설정하게 되는데, 이 단계에서 공정 특성을 단순화함으로써 프로세스의 변동성을 포함한 확률적 특성을 정확히 반영한 제약조건을 설정하는 것이 어렵다. 이러한 이유로 제약조건을 단순화하는 과정에서 많은 가정 사항을 내포하게 된다. ( Belien & Demeulemeester, 2012 ) 따라서 정수 최적화 모형으로 수립한 계획과 실제 운영 시스템에서 요구되는 인력 운영간의 차이는 불가피하게 된다. ( Van den Bergh, et al., 2013 ) 이러한 성형 공정의 재고 및 인력 관련 비용을 절약하고, 안정적인 생산 공정 유지를 위해서는 성형 공정의 특성을 반영한 계획이 수립되어야 한다.

본 논문에서는 모델 강화( Model enhancement ) 휴리스틱을 반복 수행함으로써 작업자와 생산량간의 관계식을 업데이트한다. 업데이트한 관계식을 기반으로 정수 계획 모델의 제약조건을 수정하고, 수정한 정수 계획 모델의 결과 값과 시뮬레이션 모델 결과 값 간의

일정한 오차 값을 유지하는 식을 수립함으로써 시뮬레이션에 설정된 변동성을 일정한 오차 값으로 내포하고 있는 강건한 관계식을 수립한다. 이를 통해 오차 값을 고려한 관계식으로 실질적인 계획을 수립하는 것이 목적이다.

## 1.2 관련 연구 동향

### (1) 실현가능하며 실질적인 계획을 수립하기 위한 반복 작업 수행에 대한 연구

Byrne과 Bakir(1999)는 반복적 하이브리드 접근방식에 분석 및 시뮬레이션 모델링 방법을 결합한 프레임워크를 제시한다. 분석 모델은 선형 프로그래밍(LP) 공식을 사용하고, 시뮬레이션 모델은 queuing 및 운송 지연과 같은 제조 시스템 특성을 반영하였다. 이 계획 문제에서 LP 모델은 결정론적 입력으로 먼저 실행된다. 시뮬레이션은 생산 현장을 세부적으로 모델링하여 제안된 '최적' 계획의 실현 가능성을 평가한다. 시뮬레이션 모델 결과 값은 LP 모델의 capacity 제약 조건을 업데이트하는 데 사용된다. 이 반복 작업은 지정된 정지 기준을 달성하더라도 반복적으로 작동한다. 반복 작업을 수행함으로써 수학적 프로그램에서는 최적이지만 실제 시스템에서는 반드시 그렇지 않은 솔루션을 생성한다. 시뮬레이션 모델은 주어진 솔루션의 실현 가능성을 평가함으로써 이 시스템이 global optimal을 하지 않아도 되는 실현 가능한 솔루션으로 나아간다.

Lee와 Kim(2000)은 supply chain environment에서 통합된 생산-분배 시스템을 위한 분석 및 시뮬레이션 모델을 결합한 Hybrid 방법을 제안한다. 독립적으로 개발된 분석 및 시뮬레이션 모델의 솔루션 과정을 함께 사용하여 문제를 개발하였고, globally optimal이 필요하지 않는 실현 가능한 솔루션을 확보하는데 초점을 맞추었다.

Bang과 Kim(2010)은 반도체 wafer 제작 공장에서의 계층 생산 계획 (HPP, Hierarchical production planning) 방식을 제안했다. 선형 프로그램 모델을 통해 높은 수준의 생산 계획을 수립하고, 하위 단계에서는 상세 스케줄링을 수립하기 위해 list scheduling method를 사용한다. 생산 계획의 타당성 및 실현가능성 점검으로 이산 사건 시뮬레이션(DES, Discrete event simulation)을 사용한다. 시뮬레이션 실행 중 선형 프로그램 모델에서 얻은 생산 계획이 바람직하지 않은 것으로 판명될 경우, 대기 시간을 업데이트하고, 현재 반복 시뮬레이션이 제안하는 결과로 제품 유형을 재편성하여 다시 반복 작업을 수행하는 방법이 제안되었다.

Mahdavi, Shirazi, and Solimanpur(2010)은 확률적인 유연성이 특징인 job shop을

위한 시뮬레이션 기반 의사결정 지원 시스템을 개발했다. 여기서 시뮬레이션 모델은 shop floor에서 실시간으로 입력되는 데이터를 평가한다. 규칙 기반 엔진은 시뮬레이션 모델의 출력을 예상 출력과 비교한다. 반응 표면 방법론(RSM, Response-surface methodology)에 기초한 분석 모델은 예상 출력을 얻기 위해 시스템에 필요한 변화를 계산한다. 제안된 변경사항은 시뮬레이션 모델에서 실행되고, 이 프로세스는 시뮬레이션 모델의 출력이 예상 출력과 일치할 때까지 반복적으로 계속되며 실현 가능한 해결책을 얻는데 초점을 맞춘다.

Kulkarni (2014)는 Job shop scheduling과 같은 복잡한 문제들을 풀기 위해서 최적화 모델과 통합된 시뮬레이션의 반복적 주제를 설정한다. 시뮬레이션 모델에서 포착되는 job shop의 operational scheduling problem을 반복적인 시뮬레이션 최적화 통합 접근 방식(ISO, Iterative simulation-optimization approach)으로 해결하는 것을 제안한다. 최적화 모델과 시뮬레이션 모델간의 정보 교환은 feed back으로 제약 조건을 수정함으로써 수행된다.

## (2) 작업량에 대한 작업자할당에 대한 연구

Singh, N., Aneja, Y.P., and Rana, S.P (1992)는 셀 제조 방식에서 총 가공비용과 가공 시간의 최소화 그리고 작업 부하의 균형화들이 제시한 수식에서 고려한 작업자 할당을 위한 기준을 제시하였다.

Moon과 Kim (1999)은 자동차용 방진고무부품을 제조하는 공장의 사출공정을 대상으로 한 명의 작업자가 여러 대의 사출기를 담당하는 특징을 반영하여 작업자당 작업 할당량을 공평하게 배분하기 위해 유전자 알고리즘 (genetic algorithm)을 이용하여 초기 해를 구하고, 이를 다단계 접근 방법을 사용한다. 제약식이 많은 경우 유전자 알고리즘이 비효율적이기 때문에 다단계 접근 방법을 사용했다.

Yang (2017) 은 노동집약적인 산업의 특징을 가진 항공화물터미널의 항공기 출항지연과 같은 서비스 수준을 만족시키면서 인건비를 최소화할 수 있는 인력 계획 수립을 목적으로 최적화 모델을 수립한다. 수립한 최적화 모델로 추가 작업 인력의 shift를 구성하고, 시뮬레이션 모델로 추가 할당된 shift 인력의 utilization을 평가하고 비교함으로써 추가 인력의 필요 유무를 평가 후 서비스 수준을 만족시키는 조건에서 잉여인력을 제거함으로써 시뮬레이션 기반의 잉여인력 감축 휴리스틱 방법(Slack capacity reduction heuristic method: SCRHM)을 제안하였다.

### 1.3 연구 목적

생산 공정은 안정적인 생산 계획을 위해 총괄생산계획(Aggregate production planning)을 수립하고, 총괄생산계획을 바탕으로 공정 현장 수준에 알맞은 일정 및 생산 능력 계획(Production operations scheduling)을 수립한다. 이때 설정한 기간별 수요량에 대한 최적 계획을 수립하기 위해 최적화 기법을 사용하여 공정 운영 정보를 반영한 계획을 수립한다. 이렇게 도출된 최적화 계획은 현장 상황을 반영한 최적의 계획으로, 생산 현장에서 최적화 계획을 기반으로 작업을 수행하게 된다. 하지만 이렇게 수립된 기존 최적화 방법은 실제 공정의 변동성을 고려하고 있지 않기 때문에 현장과의 오차가 발생하게 되고, 이는 시간이 흐를수록 커지는 경향을 보이게 된다. 결국 최적화 계획을 수정하게 됨으로써 설정 기간 최적의 생산 활동을 수행하지 못한다. 따라서 이산 사건 시뮬레이션 모델을 이용하여 공정 변동성을 고려한 결과 데이터를 수집하고, 이를 공정 변수 관계식을 정의하기 위한 경험적 데이터로 누적한다. 관계식 개선을 위한 반복적 과정을 통해 변동성을 고려한 최적화 계획을 수립한다.

따라서 본 연구에서는 현장의 변동성을 고려한 최적화 계획 수립을 목적으로 한다. 이는 노동집약적 특성을 갖는 공정의 변동성을 반영한 계획으로 실제 현장에 해당하는 시뮬레이션 모델과 최적화 계획 간의 오차를 줄임으로써 확인할 수 있다. 또한, 이런 과정을 통해 공정을 운영하는데 필요한 다양한 대안을 수립을 목적으로 시뮬레이션 모델을 사용할 수 있다. ( Kim, 2015 )

## 제 2 장 적용개념

### 2.1 이산 시뮬레이션 모델링 ( DES, discrete event simulation )

시뮬레이션은 현실 세계의 실제 시스템(real system)들의 효율적인 운영을 도모하기 위해 실제 시스템의 동작을 이해하고 분석, 예측하는 과학적 방법으로서, 각종 공학 분야는 물론 자연 과학 분야, 그리고 의사결정과 정책결정을 합리적으로 해야 하는 경영, 경제학 분야에서 더욱 활용도가 증대되고 있다. 시뮬레이션은 시간에 따라 현실 세계의 프로세스(process)나 시스템의 동작을 묘사하는 것인데, 이로 인해 시스템의 동작 특성을 추론 가능하도록 한다. 또한 시뮬레이션은 한 시스템의 실제적이고 추상적인 동작의 특징을 컴퓨터와 같은 다른 시스템의 동작으로 표현하는 것이다. 시뮬레이션 모델링은 현존 시스템에서의 변화에 따른 영향을 예측하는 분석 도구(analysis tool)로서, 또는 여러 환경 하에서 새로운 시스템의 성능을 예측하는 설계 도구(design tool)로서 사용된다. 확률적 요소를 갖는 대부분의 복잡한 현실세계의 시스템은 분석적으로 평가 가능한 수학적 모델로 정확히 기술할 수 없다. 그래서 시뮬레이션을 통해 이를 해결할 수 있다. 또한, 시뮬레이션 모델을 이용하면 현존 시스템의 효율을 추정할 수 있으며, 특수 요구에 맞는 시스템의 설계(혹은 새로운 운영 방침이나 설계 대안) 방법들을 비교해볼 수 있다.

이산 시스템의 경계에 속하는 대상은 개체라고 말하는데, 각각의 개체는 다양한 특징과 속성을 지니고 있다. 이산 사건 시뮬레이션은 사건 시간(event time)이라 불리는 시뮬레이션 시간(simulation time)의 특정 순간에서 이산적으로 종속 변수가 변할 때 발생한다. 이산 사건 시뮬레이션 모델의 목적은 개체들이 관여하는 활동을 재현함으로써 시스템의 잠재적 행위와 성능에 대한 정보를 얻는 데 있다. 이것은 시스템의 상태를 정의하고, 시스템의 상태를 변화시키는 활동을 정의함으로써 행해진다. 시스템의 상태란 개체의 속성에 할당되는 수치로 정의된다. 이산 사건 시뮬레이션에서 시스템의 상태는 사건 시간에서 지속적으로 유지되기 때문에, 시스템 상태를 완전히 동적으로 기술하는 것은 한 사건으로부터 다음 사건으로 시뮬레이션 시간을 진행시킨다는 것을 의미한다. 이러한 타이밍 메카니즘을 다음 사건 진행(next event approach)이라 말하며, 대부분의 이산 사건 시뮬레이션 언어에서 사용된다.

시뮬레이션 모델은 확률 변수의 유무에 따라 확률적(stochastic) 또는 결정적(deterministic)으로 분류된다. 결정적 시뮬레이션 모델은 알려진 입력 집합들로부터 유일한 출력 집합으로 나타나는 시뮬레이션 모델을 말하고, 확률적 시뮬레이션 모델은 입력으로 결정적 모델에서의 미리 정해진 입력과는 달리 난수들을 선택하여 출력을 모델의 정확한 특성을 추정하도록 하



는 모델이다.

본 연구에서는 실제 현장 모사율을 높이기 위하여 확률적 이산 사건 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 시간  $t$ 에 따라 시뮬레이션 모델에 자재가 공급되고, 그에 따라 공정에서 정의한 작업시간을 거쳐 기간별 생산량을 측정하게 된다. 이때 추가적으로 확률적 이산 사건을 설정함으로써 현장에서 변동성으로 정의할 수 없는 상황들을 설정하였다.



## 2.2 AnyLogic 시뮬레이션 솔루션

AnyLogic은 AnyLogic Company ( 구: XJ Technologies )에서 개발한 복합 시뮬레이션 모델링 소프트웨어이다. AnyLogic 소프트웨어는 이산 사건(DES, discrete event simulation), 에이전트 기반 ( Agent - based modeling ) 및 시스템 다이내믹스 ( System dynamics ) 시뮬레이션의 구현을 지원한다.

시스템 다이내믹스와 이산 사건은 전통적인 시뮬레이션 접근 방식이며, 에이전트 기반은 보다 최선의 방식이라고 할 수 있다. 기술적으로 “시스템 다이내믹스” 처리 방식은 연속적인 공정을 다루는 반면, “이산 사건” 및 “에이전트 기반” 모델은 대개 이산 시간을 다루며, 예를 들어 특정한 이벤트에서 다른 이벤트로의 이동과 같은 것을 다룬다. 최근까지 에이전트 기반의 모델링은 대개 순수한 학문적 주제로만 머물러 있었지만, 국제 비즈니스 최적화에 대한 수요의 증가는 시뮬레이션 모델 개발자들이 매우 이질적인 성질을 가진 복잡한 상호의존적인 공정들에 대해 보다 깊이 있는 통찰력을 가질 수 있도록 하는 혼합형 접근 방식을 모색하도록 만들었다.

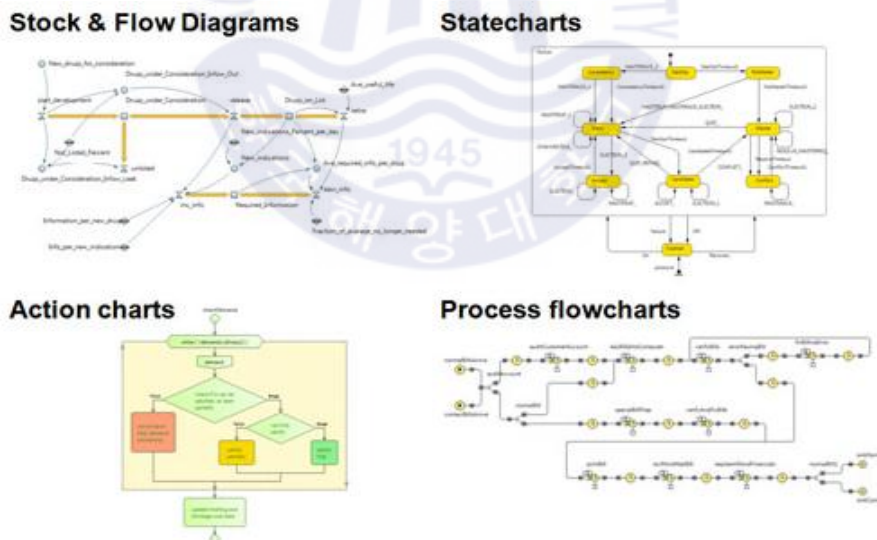


Fig. 1 Simulation language provided by “Anylogic”

AnyLogic은 그래픽적인 모델링 언어를 포함하며, 또한 사용자들이 Java 코드를 통해 시뮬레이션 모델들을 확장시킬 수 있도록 한다. 따라서 Java를 기반으로 하는 AnyLogic은 어떠한 표준 브라우저에서도 열릴 수 있는 Java 애플릿의 구축뿐만 아니라 Java 코딩을 통한 사용자 정의 모델을 확장하는 데에 적합하다.

또한 AnyLogic의 시뮬레이션 언어는 저장과 유량 다이어그램 ( Stock & Flow diagram ), 상태 차트 ( State charts ), 액션 차트 ( Action charts ), 처리과정 순서도 ( Process flowcharts ) 와 같은 요소들로 구성되어 있다. 저장과 유량 다이어그램 ( Stock & Flow diagram )은 시스템 다이내믹스 모델링을 위해 사용된다. 상태 차트 ( State charts )는 대개 에이전트의 행위를 정의하기 위한 에이전트 기반 모델링에 사용된다. 이는 기계 고장 시뮬레이션과 같이 이산 사건 모델링에도 종종 사용된다. 액션 차트 ( Action charts )는 알고리즘을 정의하기 위해 사용된다. 이는 전화 연결과 같은 이산 사건 모델링에 사용되거나 또는 에이전트의 결정 논리와 같이 에이전트 기반 모델링에도 사용될 수 있다. 처리 과정 순서도 ( Process flowcharts )는 이산 사건 모델링을 정의하는 기본 구조이다. 순서도를 통해 이산 사건 접근 방식을 프로세스 중심 ( process centric )이라고 하는지 알 수 있다.



## 2.3 정수 최적화 계획법 ( Integer linear optimization programming )

최적화란 희소한 자원을 최적으로 할당하기 위한 수리적 절차이다. 최적화의 가장 대중적인 형태인 선형계획법(Linear Programming)은 광고에서 생산계획에 이르기까지 거의 모든 비즈니스 분야에서의 실질적인 응용력을 가지고 있다. 선형 계획법은 주어진 선형 조건들을 만족시키면서 선형인 목적 함수를 최적화하는 문제이다. 제약 조건에서의 최적화라고도 해석된다. 그 중 정수 최적화 계획법이란 선형계획 모형에서 사용되는 의사결정 변수의 전부 혹은 일부가 정수 (Integer) 제약을 가지는 경우의 선형계획 모형을 뜻한다. 본 논문에서는 혼합 정수 계획법 (Mixed integer linear programming, MILP)으로 의사결정변수의 일부(작업자 수)가 정수 제약을 가지는 경우의 선형계획 모형으로 설계하였다.



## 24 모델 강화 ( ME, Model enhancement )

일반적으로 현장을 묘사한 시뮬레이션 모델을 기반으로 최적화 정수 계획 모델을 연계하여 제안된 솔루션을 현장에 적용하게 된다. 하지만 현장의 변동성을 완벽히 반영한 계획을 수립하는 것은 불가능하다. 따라서 최적화 계획과 현장 상황의 오차는 시간이 지날수록 커지게 된다. 이러한 상황을 보완하기 위해 모델 강화 개념이 나오게 되었는데, 이는 현장에서의 변동성을 고려한 강건한 계획을 도출하기 위한 방법이다.

현장을 묘사한 시뮬레이션 모델과 최적화 계획 모델을 연계함으로써 최적화 계획 모델을 통해 도출된 솔루션을 확률적 요소가 반영된 시뮬레이션 데이터로 활용한다. 그리고 시뮬레이션 모델의 결과 값으로 수집한 데이터를 이용하여 최적화 계획 모델의 제약조건을 수정하는 단계를 반복함으로써 국부적인 최적화 해결책의 한계에서 다각화적 해결책 탐색으로 보다 다양한 방안을 고려하여 현실적인 최적의 솔루션을 얻게 된다. 반복 작업에 설정한 종료 조건이 만족될 시, 반복 작업을 종료하게 된다. 이를 통해 어떠한 변동성에도 일정한 오차율을 갖는 계획을 수립함으로써 계획 수립의 목적을 최소 비용이 아닌 일정한 오차율을 갖는 계획 수립으로 설정한다. (Beliën J., et al., 2012) 아래 그림2은 “Model enhancement”가 수행되는 과정을 순서도로 묘사한 것이다. (Bachelet. B,2007)

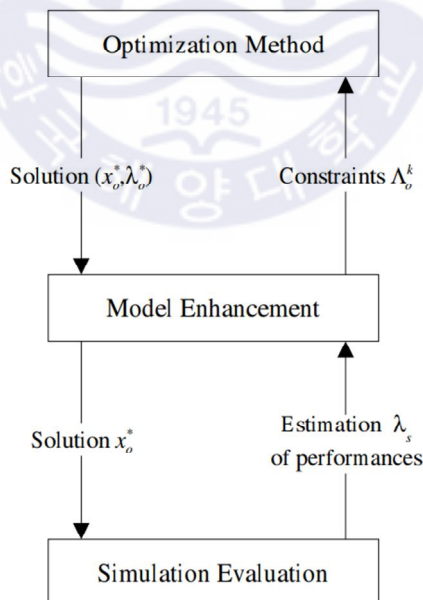


Fig. 2

“ model enhancement” performance process

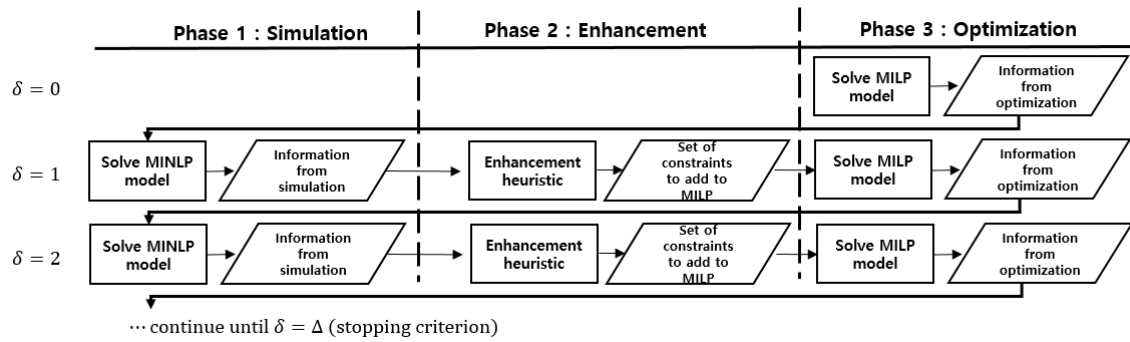


Fig. 3 Model enhancement algorithm

그림 4은 “Model enhancement”의 반복적 작업을 수행함에 따라 시뮬레이션 모델과 최적화 모델간의 Solution estimation의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 보다 현실적인 계획 수립을 확인할 수 있다.

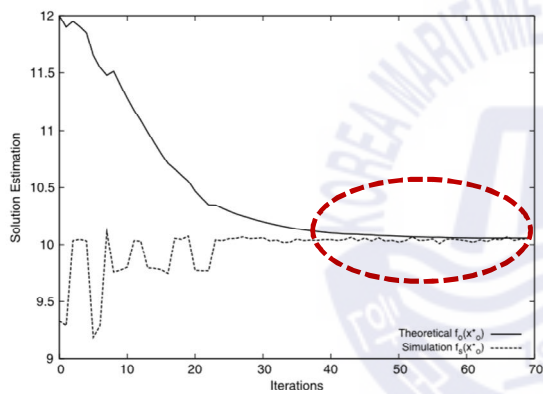


Fig. 13. Solution estimation evolution with model enhancement, case 1.

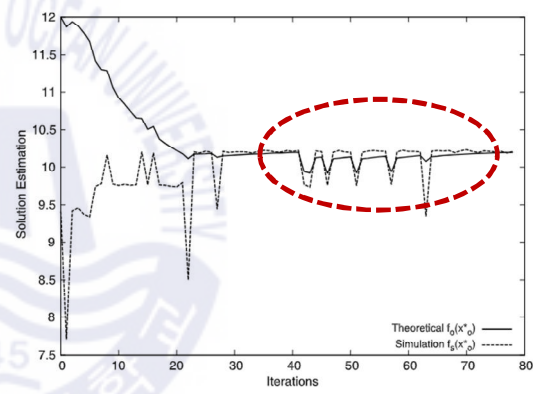


Fig. 14. Solution estimation evolution with model enhancement, case 2.

Fig. 4 Result of “ model enhancement”

## 제 3 장 성형 공정 분석 및 시뮬레이션 모델링

### 3.1 조선소 성형 공정 분석

조선소의 생산 공정 중 성형 공정은 선체의 곡면을 구성하는 곡 부재를 제작하는 공정으로 일반적으로 전처리, 절단, 곡 작업, 가공된 철판을 후 공정으로 인계, 총 4 단계로 분류할 수 있다. 성형 공장은 조선소의 여러 공장들 중에서도 가장 복잡한 공정을 지니고 있는 공장이다. 또한 일정 계획이 정형화 되어 있지 않고 상위, 하위 단계의 공정에 따라 유동적이기 때문에 상대적으로 비능률적인 작업이 이루어지고 있다. (Woo, 2005) 설비에 대한 시뮬레이션을 통해 각 작업장(Job shop)의 작업을 검증해보고 분석을 통해 공정 시뮬레이션을 위한 정보를 얻는 것을 목적으로 한다.



Fig. 5 Forming shop of a shipyard with labor-intensive characteristics

이 중 절단, 곡 작업 단계는 절단, 냉간, 열간 공정으로 다시 분류된다. 이 공정들은 자재의 설계 목적을 기반으로 재료, 두께, 면적, 가공 단계를 변수로 작업 시간이 계산된다.

절단 작업은 표면 처리된 강재의 종류, 규격, 용도에 따라 정해진 절단 라인으로 이송되어 수치화된 절단 결과에 따라 마킹 되고 절단된다. 이때 사용되는 절단 장비는 가스, 플라즈마, 레이저 등이며, 이러한 절단 장비들은 부재의 특성에 맞게 배치되어 있다. FB, FG, FN, NC,

NG, NP, PB 총 7개 중 하나의 방법으로 절단되며 수동 공정으로 작업장에 작업자가 배치되어야 하는 작업이다.

냉간 공정은 상온에서 소성가공을 하여 성형하는 단조방법으로 B0, B1, B2, B3, 총 4개의 기계로 배치된 작업장 중 하나로 분류되도록 구성되어 있다.

열간 공정은 1000 ~ 1250°C의 고온에 강을 가열해 변형 저항을 적게 하여 작은 힘으로 큰 변형을 주어 조형을 비교적 쉽게 할 수 있도록 하는 것과 단련효과를 더해 재료의 개선 강화를 꾀하기도 하는 작업이다. 작업자가 배치되는 수동 공정 6개와 기계가 배치되는 자동 공정 2개로 이루어져 있다. 자재들은 2개의 자동 공정에 우선적으로 분배되며, 2 개의 자동 작업장이 모두 작업 중일 때는 6개의 수동 공정으로 무작위 순으로 분배된다.

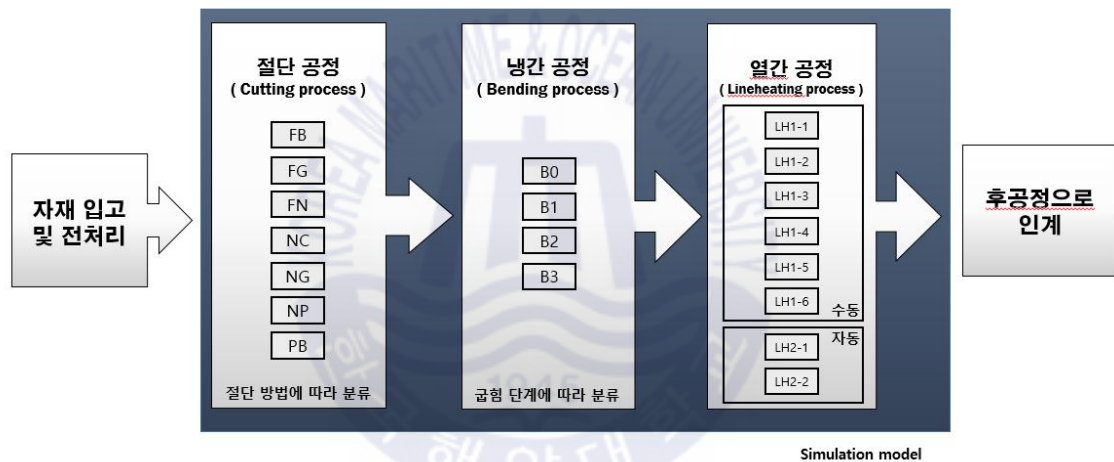


Fig. 6 The work flow and layout of the forming shop



### 3.2 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 설정

조선소 성형 공정 정보를 바탕으로 모사한 시뮬레이션 모델은 세 가지 가정을 설정하였다.

- 하루에 100개씩 자재 입고, 작업 시 자재가 부족한 상황은 없음
- 작업자는 성형 공정 내 모든 작업이 가능한 인력으로 가정
- 각 공정 당 1명, 최소 총 4명의 작업자는 고용하도록 설정

시뮬레이션 모델은 “Source” 를 통해 자재 데이터를 가지고 있는 “Plate” agent 가 입고된다. 자재 데이터를 기반으로 해당 작업장으로 분류되며, 작업을 마친 뒤 후 공정의 “Buffer” 에 대기하게 된다. 모든 작업을 마친 agent는 모두 “Sink” 로 이동된다.

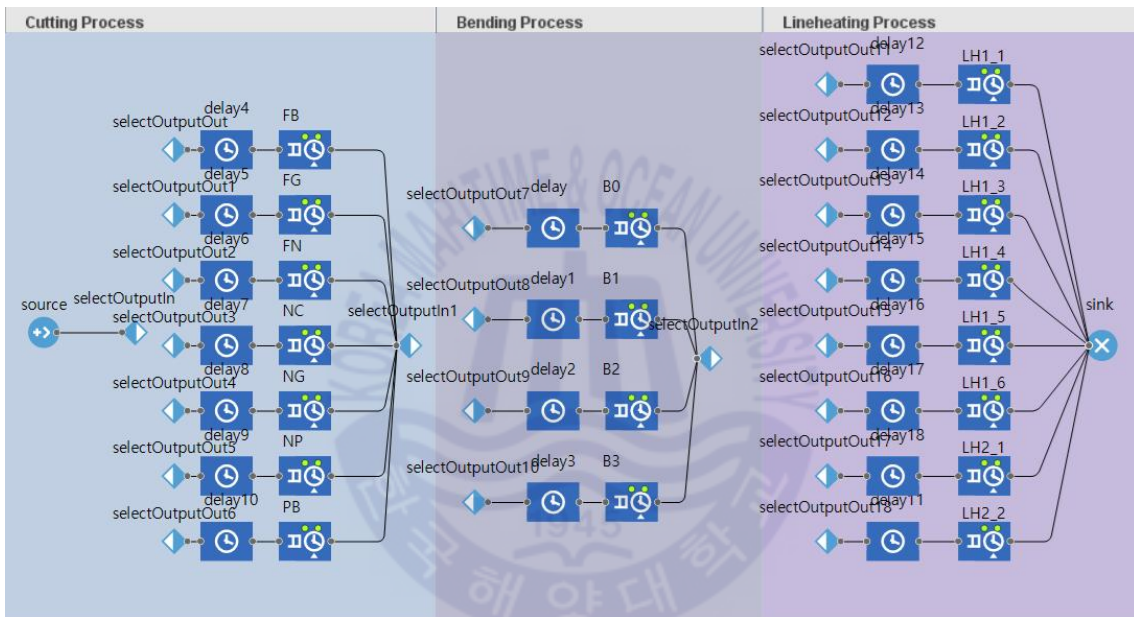


Fig. 7 Forming shop discrete event simulation model

### 3.3 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 확률 변수 설정

조선소 성형 공정의 현장 변동성을 모사하기 위해 설정한 확률적 요소들은 다음과 같다.

#### 3.3.1 공정 작업시간 설정

공정의 작업장별 작업시간은 투입되는 자재 데이터 변수에 의해 계산되며, 작업시간은 normal 함수를 사용하여 정규분포의 형태로 설정하였다. 자재 데이터 변수는 A사의 성형 공정 자재 변수 데이터를 참고하여 제작하였다.

Table 1 The example of Material data variables

Wo No	Material	Length	Width	Thicknes s	Forming level	Process		
						1	2	3
STEEL0001	Mild Steel	18	3	0.93	3	NC	B1	LH1
STEEL0002	Mild Steel	17	3	0.66	1	NC	B2	LH1
STEEL0003	Mild Steel	13	4	0.44	3	NC	B3	LH1
STEEL0004	High Tensile Steel	13	4	0.69	3	NC	B1	LH1
STEEL0005	High Tensile Steel	12	3	0.75	3	NC	B1	LH1
STEEL0006	High Tensile Steel	12	2	0.49	1	NG	B1	LH1
STEEL0007	High Tensile Steel	10	3	0.94	2	NG	B3	LH1
STEEL0008	High Tensile Steel	13	2	0.68	2	NG	B1	LH1
STEEL0009	High Tensile Steel	17	4	0.76	1	NG	B2	LH1
STEEL0010	High Tensile Steel	20	2	0.82	1	NG	B1	LH1

작업시간은 자재 변수를 통해 계산된다. 본 계산은 성형공장 작업자와의 인터뷰를 바탕으로 normal 함수를 사용하여 정규분포의 형태로 설정하였다.

작업자와의 인터뷰를 통해 작업시간은 절단 공정 작업은 평균 30분, 냉간 공정 작업은 평균 30분, 열간 공정 작업은 평균 3시간으로 정보를 얻었으며, 하루 평균 30개 생산을 정보로 얻어 이를 반영한 확률 분포 함수를 사용하여 작업 시간을 설정하였다.

### 3.3.2 기계 공정의 고장 상태 설정

아래 그림(6)의 (C)와 (D)에 해당하는 성형 공정 중 전체 냉간 공정과 열간 공정 중 자동 작업장에 해당하는 작업장은 기계가 배치되며 기계로 작업하는 공정이다.

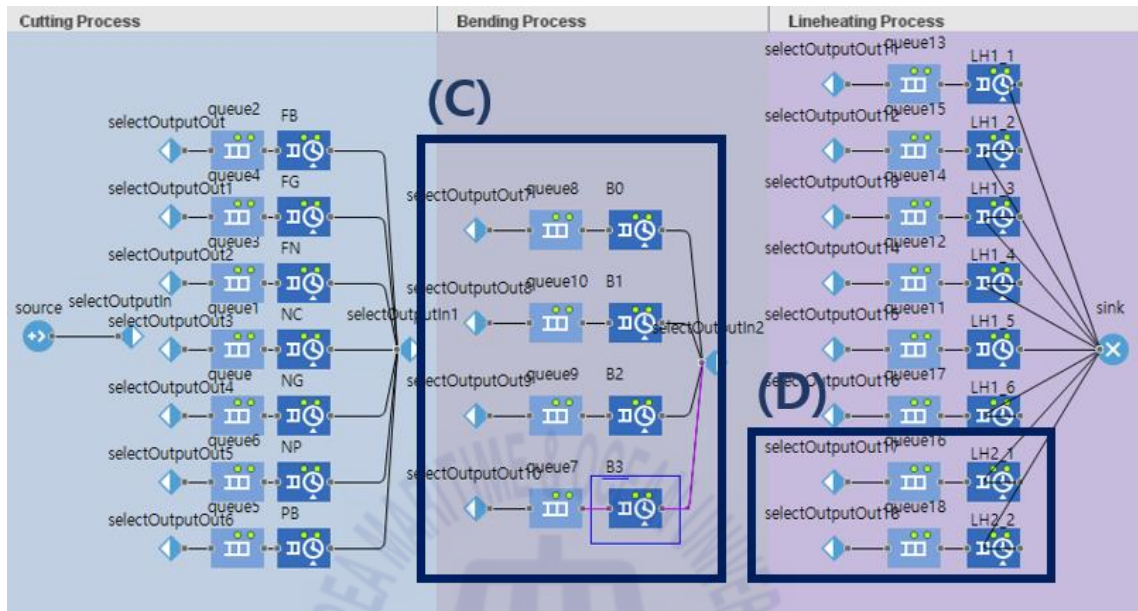


Fig. 8 Hot and cold forging process of forming shop

보통 시뮬레이션 모델 제작에서는 기계는 설비(Facilities)로 취급되며, 설비의 유형, 수량, 위치, 기능, 용량에 대해 설정 한다. 현실성을 높이기 위한 고장 상태를 설정할 때는 설비고장 데이터를 활용하여 고장유형 (고장, 트러블) 에 따른 발생 데이터와 유지 보수 데이터를 수집한다. 하지만 조선소 성형 공정의 경우, 기계에 대한 고장 데이터 및 유지 보수 데이터가 존재하지 않으므로, 현장 작업자의 인터뷰 정보를 바탕으로 아래 그림(7)과 같이 확률 분포를 사용하여 기계의 유지보수를 임의로 설정하였다.

Failures / repairs:	=, <input checked="" type="checkbox"/>
Initial time to failure:	<input type="text" value="uniform( 0, 10 )"/> days
Time to next failure:	<input type="text" value="triangularAV( 20, 0.1 )"/> days
Repair type:	=, Delay
Time to repair:	<input type="text" value="triangularAV( 4, 0.1 )"/> hours
Usage statistics are:	=, not collected

Fig. 9 Failure and maintenance settings of the facility

(1) Initial time to failure : 첫 고장이 발생하는 시간이다. 시간 단위는 “days(하루)” 로 하였다. uniform 분포 함수는 연속 균등 분포( continuous uniform distribution )라고 표현할 수 있다. 이 분포는 연속 확률 분포로, 분포가 특정 범위 내에서 균등하게 나타나 있을 경우를 가리킨다. 이 분포는 두 개의 매개변수  $a, b$ 를 받으며, 이때  $[a, b]$  범위에서 균등한 확률을 가지며 폐구간  $[a, b]$  사이의 모든 확률의 합은 1이 되어야 한다. 이 시뮬레이션 모델에서는  $\text{uniform}(0,10)$  (days) 로 설정함으로써 시뮬레이션이 시작된 후, 0에서 10일 사이에서 돌연적인 고장이 발생하도록 설정하였다.

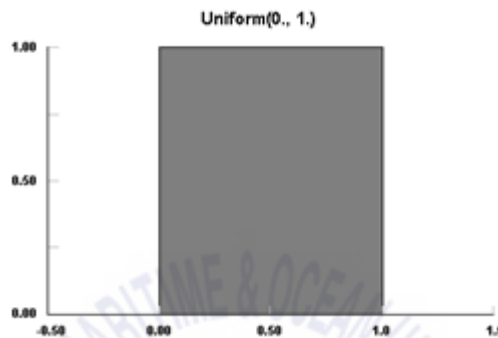


Fig. 10 Uniform stochastic function

(2) Time to next failure : 기계 고장 발생 사이의 확률을 Triangular AV 분포함수로 설정한다. Triangular AV 분포함수는 삼각확률분포를 기반으로 대략 20%를 +/-로 추가함으로써 좀 더 현실적인 변동성을 고려하도록 구성된 분포함수이다. 이 시뮬레이션 모델에서는  $\text{triangular}(20,0.1)$ 로 설정함으로써 평균값은 20일, 변동 정도는 0.1로 설정하였다.

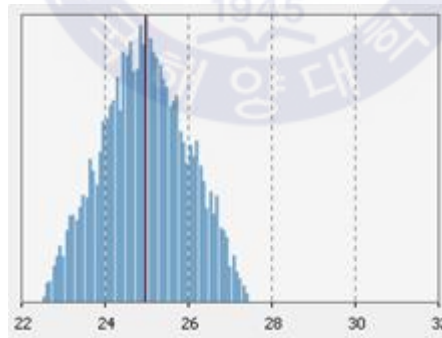


Fig. 11 Triangular AV stochastic distribution

(3) Repair type : 기계 수리 시, 작업 재고를 “Delay” 로 처리하였다. 이는 기계 수리가 완료 될 때까지 작업 재고는 보류된다.

(4) Time to repair : 이 설정은 기계 고장 시, 수리 시간까지 걸리는 시간을 설정한 값이다. 일상적인 잔고장인 경우로 가정하고,, 마찬가지로 Triangular AV distribution 함수를 사용하여 평균 4시간을 기준으로 변동 정도는 0.1로 설정하였다.

### 3.3.3 성형 공정 중 공정 간의 이동 시간 설정

성형 공정은 절단, 냉간, 열간 공정으로 분류되며 각 작업은 완료된 후 그림(9)과 같이 다음 공정으로 이동하게 된다. 이때 작업자들은 통상적으로 이동 시간은 평균 15분정도라고 예상하고 있다. 따라서 공정 간의 이동 시간은 그림(10)과 같이 설정하였다.

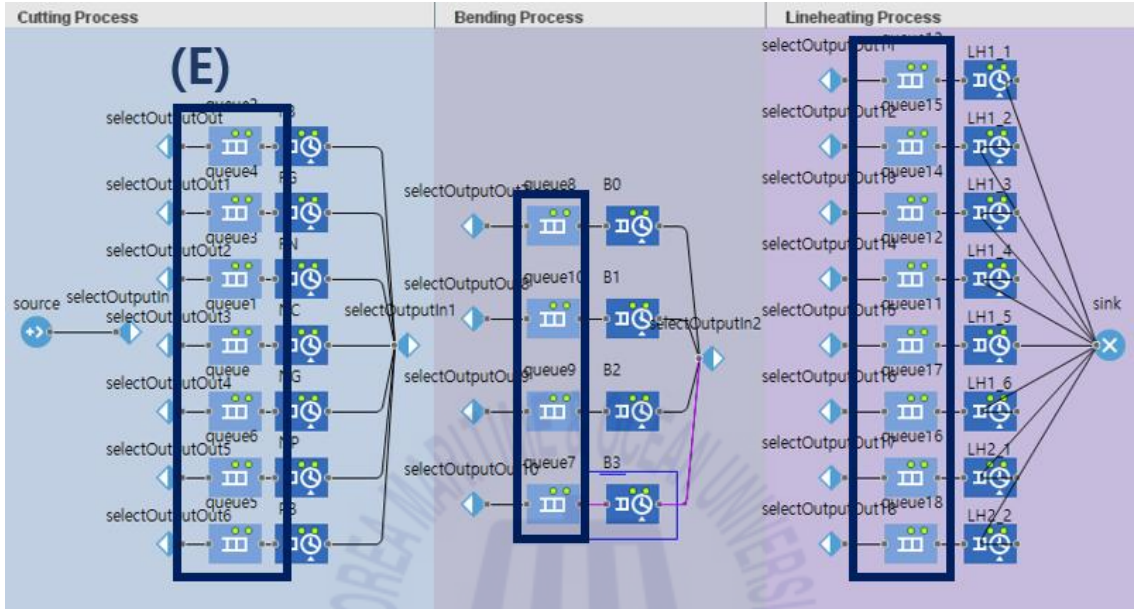


Fig. 12 Travel time between forming shop

Type:  Specified time  
 Until stopDelay() is called

Delay time:  minutes ▾

Fig. 13 Setting travel time between forming shop

공정 간의 이동 시간은 지연시간 ( delay time ) 으로 삼각 분포 함수 ( triangular distribution )로 설정하였다. 삼각 분포 함수는 최소치와 최댓값을 알 수 있으며, 가장 가능성이 높은 값 추측이 가능할 때 사용한다. 의미 있는 분포를 형성하기 위한 충분한 표본이 없는 경우 서비스 시간 등을 위해 통상적으로 사용되는 분포 함수이다. 여기에서는 triangular(10,15,20)으로 설정함으로써 평균 15분, 최소 10분, 최대 20분으로 공정 간의 이동 시간을 설정하였다.

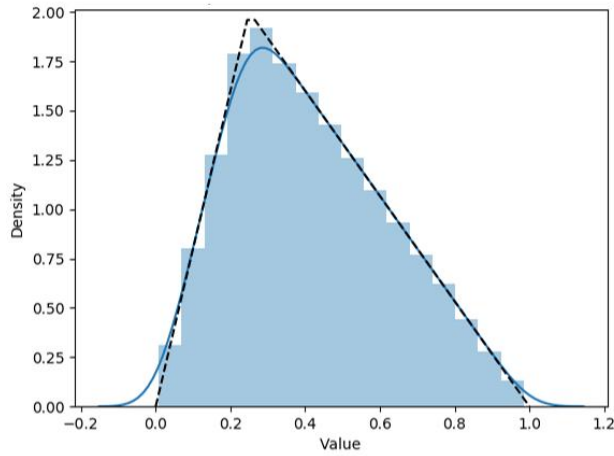


Fig. 14 Triangular stochastic distribution

### 3.4 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 작업시간 설정

작업시간은 주 5일(월~금), 오전 09:00 ~ 오후 18:00 (점심시간 1시간 제외)로 설정하였다.

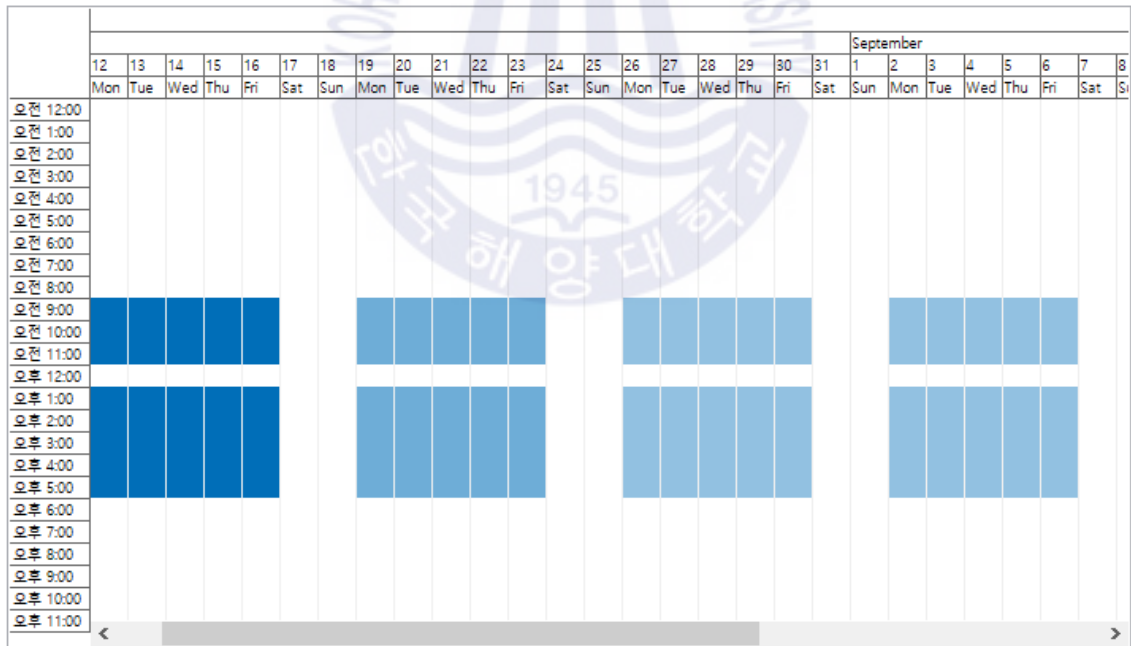


Fig. 15 Worker's working hours on simulation model

### 3.5 조선소 성형 공정 시뮬레이션 모델 실행 및 결과 데이터

조선소의 성형 공정 정보 및 확률 변수를 고려하여 설정한 시뮬레이션 모델의 실행화면은 아래와 같다. 각 시뮬레이션 모델 running 시, 다른 변동성이 적용되도록 Randomness에서 Random seed ( unique simulation runs )를 설정하였다. 시뮬레이션 모델의 시작 시간은 2019년 7월 21일 00:00:00 로 설정하였으며 Execution mode는 Real time의 scale 1로 설정하였다. 위 시뮬레이션 기본 설정은 그림16 과 같이 설정하였다. 시뮬레이션 모델 실행은 그림17 과 같다. 시뮬레이션 모델의 결과 값은 그림19 과 같이 관련비용을 계산하여 기록된다.

**Simulation - Simulation Experiment**

Name:   Ignore

Top-level agent:

Maximum available memory:  Mb

**Model time**

Execution mode:  Virtual time (as fast as possible)  
 Real time with scale

Stop:

Start time:  Stop time:

Start date:  Stop date:

**Randomness**

Random number generation:  
 Random seed (unique simulation runs)  
 Fixed seed (reproducible simulation runs) Seed value:   
 Custom generator (subclass of Random):

Selection mode for simultaneous events:

Fig. 16 Set model time and randomness of simulation model

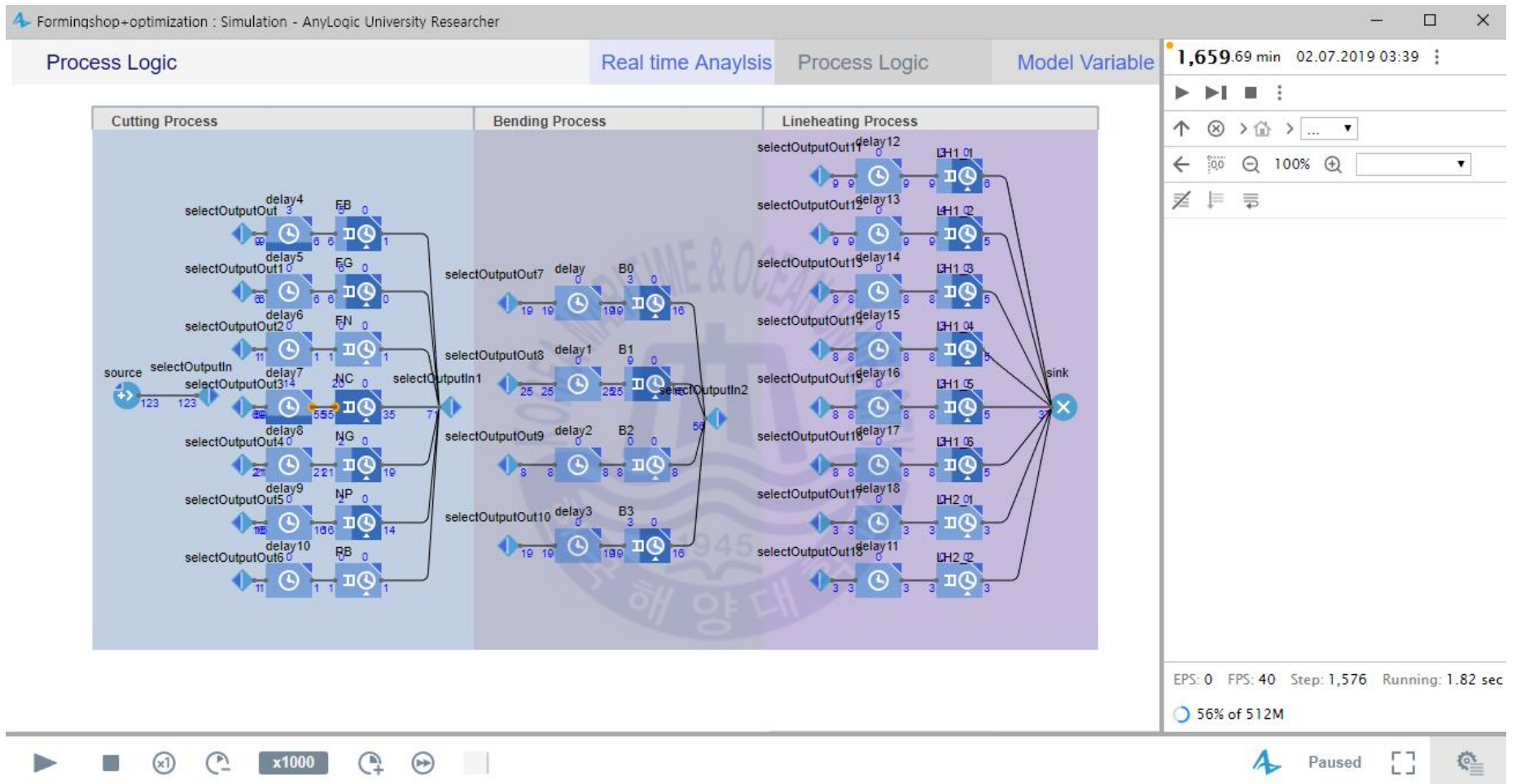


Fig. 17 Discrete event simulation model of forming shop



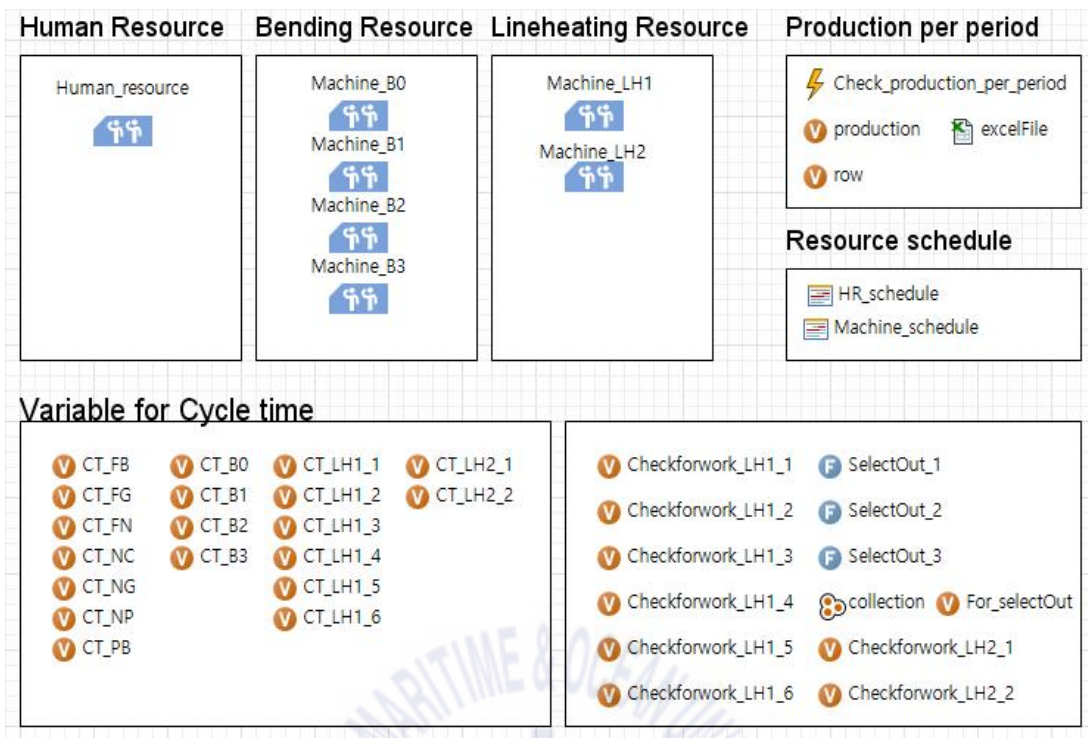


Fig. 18 Setting the cycle time for Resource

Table 2 The result of running simulation model

Period	Worker	Production	Demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	14	220	500	0	280	44800	14000	39600
2	14	275	0	0	5	800	14000	49500
3	14	255	500	0	250	40000	14000	45900
4	4	243	0	0	7	1120	24000	43740
5	4	243	500	0	264	42240	4000	43740
6	4	243	0	0	21	3360	4000	43740
						132320	74000	266220
							Total	472540

## 제 4 장 최적화 계획 및 모델 강화 적용

조선소 성형 공정의 최소 비용을 위한 인력 계획 수립을 위한 모델 강화 작업은 그림4와 같은 작업 순서로 수행된다.

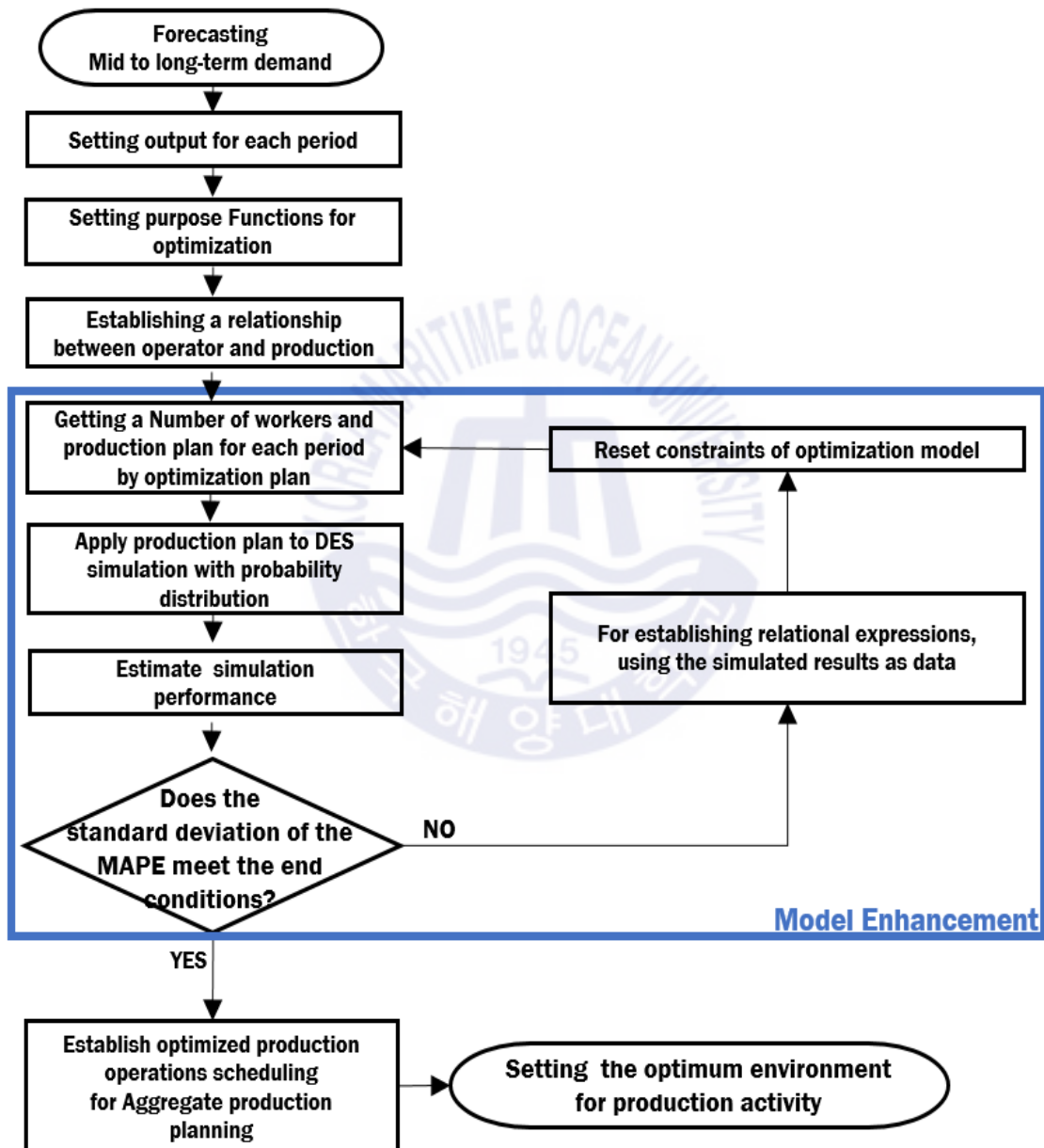


Fig. 19 The flow-chart of the model enhancement process

## 4.1 인력 할당을 위한 정수 계획 최적화 모델 설계

### 4.1.1 성형 공정 작업자와 생산량 간 관계식 설정

조선소 성형 공정의 확률적 특성 및 변동성을 고려하여 설계한 시뮬레이션 모델의 결과 데이터를 활용하여 정수 계획 최적화 모델 설계에 필요한 제약조건을 수립하였다. 순서는 다음과 같다.

Table 3 stochastic relations between workers and production per each period

기간(7일) \ 작업자 (명)	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40
1	189	225	235	287	261	315	281	292	305	308
2	227	251	293	294	331	286	331	319	297	310
3	237	285	321	343	371	356	351	359	366	364
4	223	274	323	343	325	326	294	316	338	329
5	220	270	312	312	335	318	347	329	315	313
6	224	272	313	338	344	357	357	368	364	355
합계	1320	1577	1797	1917	1967	1958	1961	1983	1985	1979
평균	220	262.8	299.5	319.5	327.8	326.3	326.8	330.5	330.8	329.8

먼저, 작업자 수에 따른 기간별 생산량을 측정하였다. 변동성을 포함한 시뮬레이션 모델이기 때문에 같은 작업자 수를 설정하더라도 기간별 생산량이 다른 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제 생산 현장을 반영한 시뮬레이션 모델의 작업자와 생산량간의 관계식은 하나의 관계식으로 쉽게 정의하기 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

기간별 작업자와 생산량 간의 관계

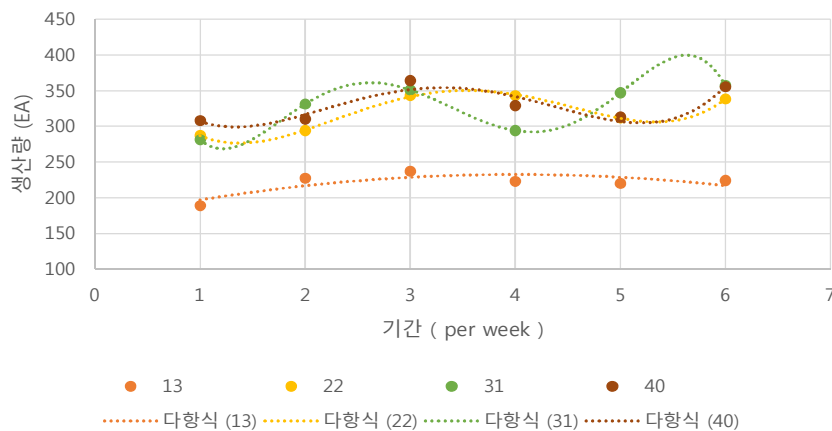


Fig. 20 Stochastic relations between workers and production

또한, 생산 공정에서는 작업이 진행됨에 따라 작업장의 대부분의 공정에 대기 재고가 쌓이게 되고, 신속한 재고 투입이 가능한 작업 환경을 기반으로 안정화된 WIP(Work in process)를 얻게 된다. 따라서 안정화된 WIP를 얻기 전인 기간 1의 단계에서는 다른 기간보다 생산량이 현저히 떨어지기 때문에 인력 계획 수립 시, 기간1과 기간2-6에 대한 '작업자-생산량 변수 관계식'을 분리하여 최적화 모델에 반영 후 계획을 수립하였다.

작업자와 생산량 간의 변수간의 관계를 식으로 표현하기 위해 시뮬레이션 결과데이터인 기간1과 기간2-6의 작업자 수에 따른 기간별 생산량 데이터를 최소자승법에 활용하여 1차 관계식을 수립하였다.

최소자승법(Method of least squares)이란 측정값을 기초로 해서 적당한 제곱 합을 만들고 그것을 최소로 하는 값을 구하여 측정결과를 관계식으로 계산하는 방법이다. 독립변수 값을 변경하며 실험을 진행할 때 그에 따른 종속변수의 결과 값이 일정한 규칙성을 갖는다면, 그 실험은 아무런 의미를 갖지 못한다. 따라서 최소자승법을 이용하여 실제 값과 추정치간 차이 즉, 회귀오차의 자승을 합한 값이 최소가 되는 표본 회귀선을 찾는 방법이다. 이 방법은 자료들을 표시하는 각 좌표들과 이 사이를 지나는 직선과의 수직적 길이 (차이)를 가장 짧게 하는 것으로, 각 수직적 길이를 제공하여 합한 값을 최소화하는 것이다. 회귀오차의 절대 값을 합한 값을 최소화하는 방법보다 회귀오차의 자승을 합한 값을 최소화하는 방법을 선택한 이유는 큰 폭의 오차에 대해 보다 더 큰 가중치를 부여함으로써 독립변수 값이 동일한 평균치를 갖는 경우 가능한 변동 폭이 적은 표본회귀선을 도출하기 위한 것이다. 다시 말하여, 각각의 데이터에 대해 근사식 f와의 오차를 구하여 그들의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 식을 구하는 것이다.

$$E(f) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (1)$$

위의 식(1)에서 E를 최소화하는 f를 찾는 것이 목표이다. 데이터 n개에 대하여 구하는 근사식이  $f(x) = ax + b$  라면 식(2) 와 같이 표현할 수 있다.

$$E(a,b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \quad (2)$$

식(2)를 기반으로 a와 b에 대해 각각 편미분을 진행한다.

$$\frac{\partial E(a,b)}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n (a^2 x_i^2 - 2a(y_i - b)x_i + (y_i - b)^2) \\
&= \sum_{i=1}^n 2ax_i^2 - 2(y_i - b)x_i = 0 \\
a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \tag{3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E(a,b)}{\partial a} &= \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \\
&= \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (b^2 - 2b(y_i - ax_i) + (y_i - ax_i)^2) \\
&= \sum_{i=1}^n (2b - 2(y_i - ax_i)) = 0 \\
a \sum_{i=1}^n x_i + nb &= \sum_{i=1}^n y_i \tag{4}
\end{aligned}$$

식(3)과 (4)를 연립하여 구한 a, b 값을 통해 관계식을 구할 수 있다. 아래의 표 (2), (3)을 데이터로 이용하여 구한 '작업자-생산량 관계식'은 식(5), (6) 과 같다.

**Table 4-(a)** The production of period 1 by the number of workers

작업자 수 (명)	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40
평균	189	225	235	287	261	315	281	292	305	308

**Table 4-(b)** The average production of period 2~6 by the number of workers

작업자 수 (명)	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40
평균	226.2	270.4	312.4	326	341.2	328.6	336	338.2	336	334.2

$$y = 3.9434x + 165.3 \tag{5}$$

$$y = 3.1871x + 230.46 \tag{6}$$

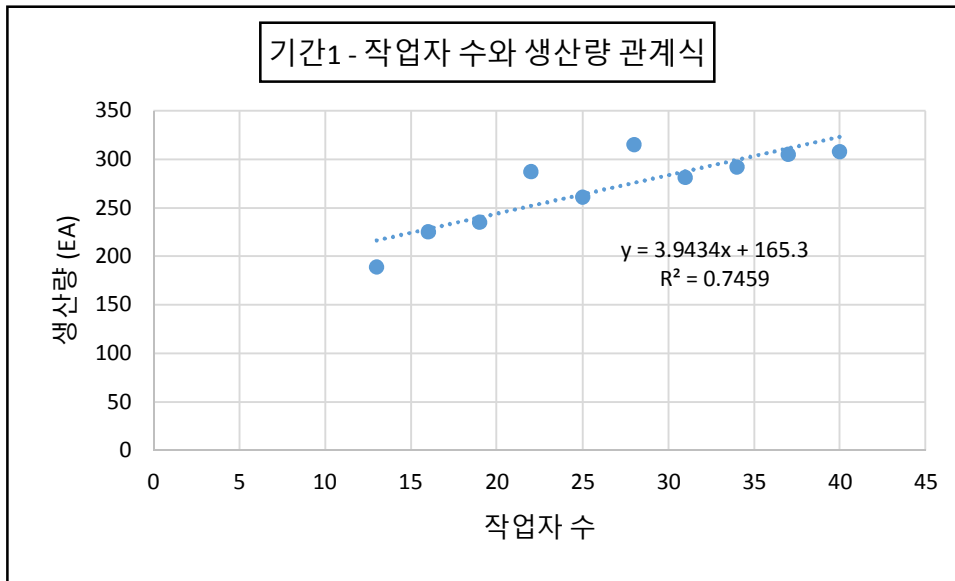


Fig. 21 The relationship between worker and production in period 1 obtained by least square technique

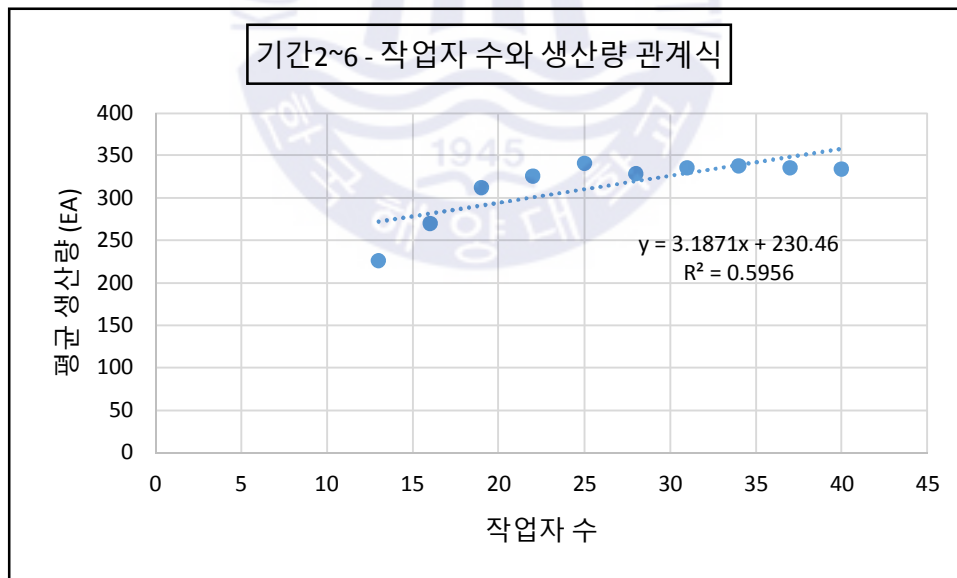


Fig. 22 The relationship between worker and production in period 2~6 obtained by least square technique

#### 4.1.2 성형 공정 인력 계획 최적화 모형 설계

앞 단계에서 구한 작업자-생산량 간 관계식을 이용하여 인력 계획 최적화 모형을 설계하였다. 공정 관련 운영 정보는 표(4)로 설정하였다.

Table 5 The process-related operational information

Maximum number of workers	40
Production cost	\$180
Cost of hiring a worker	\$1000
Cost of firing a worker	\$2000
Inventory carrying cost	\$ 80 / period
Inventory shortage cost	\$ 160 / period

고용 비용의 경우, 그림 24 (Park, 2015)과 그림 25 (Korea Labor Institute(KLI),2014)을 참고하여 2014년 인력 관련 비용 합계와 인력 수를 고려하여 계산하여 설정하였다. 해고 비용의 경우, 고용비용의 2배로 설정하여 보다 안정적인 고용 인력을 유지하도록 설정하였다. 재고비용과 재고부족비용은 80달러와 160달러로 설정하였다. (Roeder, 2016) 제품 당 생산비용은 2014년 후판 가격인 t당 60만원을 기준으로 아래의 식(8)로 계산하면 최소 2개에서 12개 정도의 후판이 계산되므로 개당 평균 18만원으로 설정하였다.

$$Steel\ plate\ weight = length \times width \times thickness \times specific\ gravity \quad (8)$$

( 비중(specific gravity) : 연강(mild steel)과 고장력강(high tensile steel) 모두 7.8로 계산 )

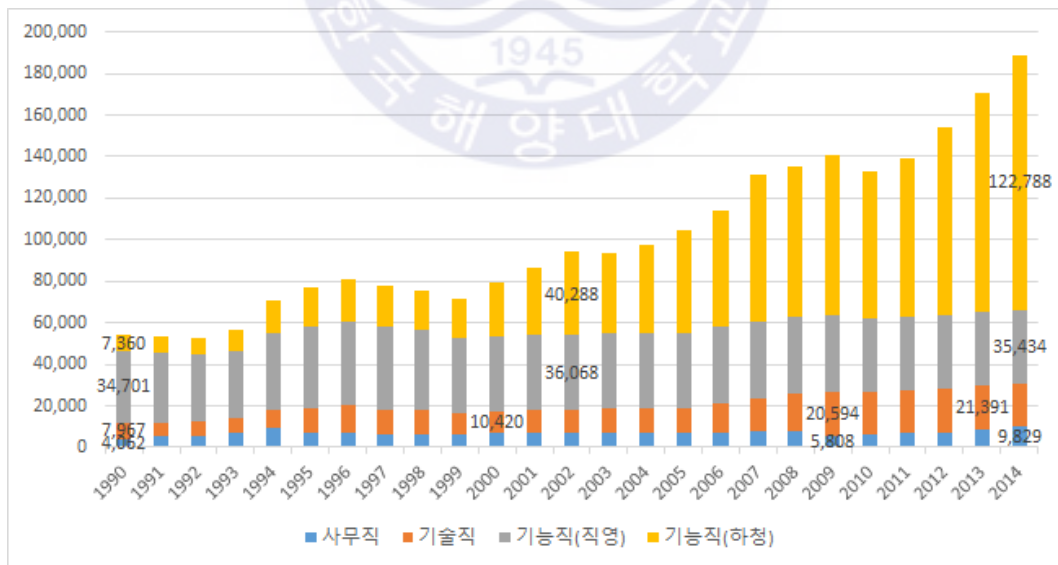


Fig. 23 Trends in employment size and total amount of employment by 9 major shipbuilding companies

(단위: 백만 원)

업종	조선	자동차	철강	기계금속	화학	전기전자	사무판매 서비스	기타	합계
현금급여	982,318	224,380	288,424	142,928	164,060	298,848	554,358	375,929	3,031,245
성과/일시금	305,643	73,255	89,741	44,471	51,046	92,985	172,485	116,968	946,595
법정퇴직금	81,860	18,698	24,035	11,911	13,672	24,904	46,197	31,327	252,603
국민연금	44,204	10,097	12,979	6,432	7,383	13,448	24,946	16,917	136,406
건강보험	27,701	6,328	8,134	4,031	4,626	8,428	15,633	10,601	85,482
장기요양보험	1,814	414	533	264	303	552	1,024	694	5,599
고용보험	12,770	2,917	3,750	1,858	2,133	3,885	7,207	4,887	39,406
산재보험	41,257	5,610	9,057	3,716	3,675	2,988	6,098	10,639	83,040
임금채권보장 부담금	786	180	231	114	131	239	443	301	2,425
유급연차휴가수당	6,520	2,422	3,047	1,248	1,357	2,514	4,347	2,660	24,116
법정의복리비 및 기타 노동비용	312,148	59,031	101,480	39,102	51,713	68,661	91,857	85,962	809,954
합계	1,817,022	403,332	541,410	256,075	300,099	517,453	924,596	656,885	5,416,872

Fig. 24 Direct employment costs of in-house subcontracting workers in each industry

Table 6 The weekly pay of worker

사내 하도급 고용 관련 비용	
합계 (₩)	1,817,022,000,000
직영 기능직 (명)	35,434
연봉 (₩)	51,279,054
월급 (₩)	4,273,254
주급 (₩)	827,081 ≈ \$ 1,000

성형 공정 당 하루 평균 30개의 제품을 생산하는 작업자와 인터뷰를 바탕으로 총 6주 동안의 기간 동안 총 1500개의 제품을 생산하도록 설정하였다. 총 1500개의 제품을 기준으로 기간별 수요량을 상이하게 설정하여 CASE를 결정하였다. 첫 번째 케이스의 경우, 모든 기간의 수요량을 일정하게 설정했다. 두 번째 케이스의 경우, 각 기간의 수요량은 무작위로 설정했다. 세 번째 케이스의 경우, 기간별 수요량의 차이를 극대화로 설정하여 생산 환경에서 대표적으로 확인할 수 있는 수요량의 변화를 케이스로 나누어 모델 안정화 기법을 여러 환경에서 확인해보고자 했다.



**Table 7-(a)** Case 1 : The number of product demand

**Table 7-(b)** Case 2 : The number of product demand

**Table 7-(c)** Case 3 : The number of product demand

Period ( 7 일씩 )	Demand	Period ( 7 일씩 )	Demand	Period ( 7 일씩 )	Demand
1	250	1	150	1	500
2	250	2	440	2	0
3	250	3	180	3	500
4	250	4	330	4	0
5	250	5	350	5	500
6	250	6	50	6	0

설정된 기간별 수요량과 공정 관련 운영 정보를 바탕으로 총 6기간 동안 공정 관련 비용이 최소가 되도록 목적함수를 설정하였다.

$$\text{Min} \sum_{n=1}^6 1000 * \text{Hired}(I) + 2000 * \text{Fired}(I) + 80 * \text{Invntr}(I) + 160 * \text{SInvntr}(I) + 180 * \text{Prdct}(I)$$

(9)

식(9)은 목적함수로 고용비용, 실업비용, 재고유지비용, 재고부족비용과 마지막으로 생산비용의 합이 최소가 되도록 설정했다.

$$X_n = 3.9434 * W_n + 165.3 \quad (\text{for period 1}) \quad (10)$$

$$X_n = 3.1871 * W_n + 230.46 \quad (\text{for period 2} \sim 6) \quad (11)$$

$$I_n - I_n^- = X_n - D_n + I^{+n-1} + I^{-n-1} \quad (12)$$

$$W_n = W_n + R_n - F_n \quad (13)$$

$$W_n \leq 40 \quad (14)$$

$$4 \leq W_n \quad (15)$$

제약조건은 식(10)~식(15)로 설정했다. 식(9),(10)은 작업자와 생산량 간의 관계식, 식(12)은 기간별 제품 재고량 혹은 재고부족량 계산식, 식(13)은 기간별 고용인원과 해고인원을 계산하기 위한 작업자 수, 식(14)과 식(15)은 기간별 최대 및 최소 작업자를 설정하였다.

## 4.2 정수 계획 최적화 모델 결과 데이터

설계한 정수 계획 최적화 모형을 바탕으로 제안된 기간별 계획 Solution Report를 표 8-(a), 표 8-(b), 표 8-(c) 와 같이 정리하였다.

**Table 8-(a)** Case 1 : Integer optimization plan established by relational equations

$y = 3.9434x + 165.3$ ( for period 1 ) $y = 3.1871x + 230.46$ ( for period 2~6 )								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	14	220	250	0	30	4800	14000	39600
2	14	275	250	0	5	800	14000	49500
3	8	255	250	0	0	0	20000	45900
4	6	249	250	0	1	160	10000	44820
5	6	249	250	0	2	320	6000	44820
6	6	249	250	0	3	480	6000	44820

**Table 8-(b)** Case 2 : Integer optimization plan established by relational equations

$y = 3.9434x + 165.3$ ( for period 1 ) $y = 3.1871x + 230.46$ ( for period 2~6 )								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	14	220	150	70	0	5600	14000	39600
2	14	275	440	0	95	15200	14000	49500
3	14	275	180	0	0	0	14000	49500
4	4	243	330	0	87	13920	24000	43740
5	4	243	350	0	194	31040	4000	43740
6	4	243	50	0	1	160	4000	43740

**Table 8-(c)** Case 3 : Integer optimization plan established by relational equations

$y = 3.9434x + 165.3$ ( for period 1 ) $y = 3.1871x + 230.46$ ( for period 2~6 )								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	14	220	500	0	280	44800	14000	39600
2	14	275	0	0	5	800	14000	49500
3	14	275	500	0	230	36800	14000	49500
4	4	243	0	13	0	1040	24000	43740
5	4	243	500	0	244	39040	4000	43740
6	4	243	0	0	1	160	4000	43740



### 4.3 반복 작업을 통한 모델 강화

관계식 (5), (6)으로 수립한 최적화 모형에서 제안한 인력 계획을 성형 공정 시뮬레이션 모델에 할당한 후 구한 결과 값으로 관계식을 업데이트 한다. 이때, 변동성이 반영된 시뮬레이션 모델의 결과 값들을 추가하여 작업자-생산량 데이터를 업데이트한다. 종료 조건을 만족할 때까지 작업을 반복한다.

#### 4.3.1 반복 작업의 종료조건

종료조건은 변동성을 포함한 관계식 수립 검증을 위해, 모델 강화 과정에서 시뮬레이션 모델 결과 값과 최적화 모델 간의 MAPE를 사용하였다. MAPE ( Mean absolute percentage error ) 는 평균 절대 대비 오차로 예측 모델과 실제 모델간의 예측 정확도를 측정한 값으로 모델들 간의 오차율을 나타낸다. 본 논문에서는 예측 모델은 정수 계획 최적화 모델, 실제 모델은 시뮬레이션 모델로 두 모델 간의 오차율을 나타내었다.

$$MAPE(\%) = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|y_t - f_t|}{y_t} \quad (16)$$

(  $y_t$  : 실측 값,  $f_t$  : 예측 값 )

최적화 계획 값과 시뮬레이션 결과 값의 MAPE 값들이 표준편차가 0.6 이하인 경우를 종료 조건으로 설정하였다. 표준편차의 경험 법칙(The empirical rule)으로써 평균값을 기준으로 경험, 즉 관측 값의 68%는 1 표준편차 범위 안에 존재하는 것을 같은 범위로 판단한다. 따라서 1 표준편차 범위보다 조금 더 낮은 60%를 표준편차 값으로 설정하여 보다 다양한 변동 상황을 포함한 관계식 수립을 목적으로 설정하였다.

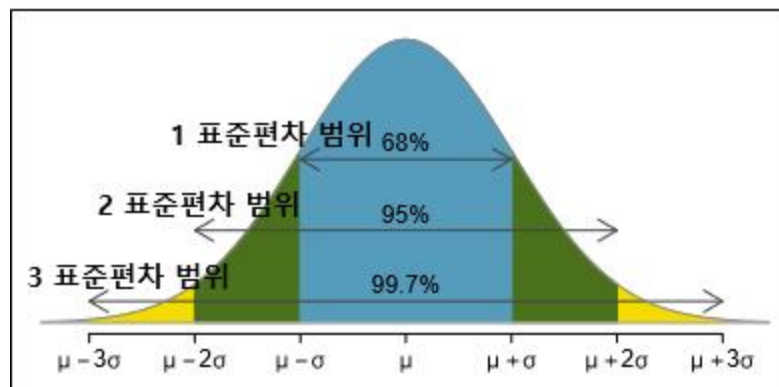


Fig. 25 The empirical rule of standard deviation

또한, MAPE의 표준편차 값이 수립된 경향을 띄울 때 종료하도록 설정하기 위하여 반복 작업에 따른 표준편차의 차이가 30% 이내일 때 종료를 수행하도록 하였다.

### 4.3.2 Case 1 반복 작업

Table 9 Case 1 : Simulation result value with optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	14	220	208	210	206	207	215	212	204	213	203	211	5.35
2	14	275	221	229	223	218	218	229	232	221	228	222	22.77
3	8	255	158	148	153	157	155	159	151	149	169	152	64.63
4	6	249	118	115	122	117	124	112	122	112	119	115	111.98
5	6	249	112	120	119	114	113	113	118	118	118	118	114.23
6	6	249	118	117	122	117	113	124	120	107	121	111	113.22
												표준 편차	44.72

시물레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 17,18이다.

$$y = 4.3259x + 152.89 \quad (\text{for period 1}) \quad (17)$$

$$y = 8.2341x + 84.224 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (18)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

Table 10-(a) Case 1 : The integer optimization plan established by 2 times relational equations (17),(18)

$y = 4.3259x + 152.89 \quad (\text{for period 1})$ $y = 8.2341x + 84.224 \quad (\text{for period 2~6})$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	20	239	250	0	11	1760	20000	43020
2	21	257	250	0	4	640	21000	46260
3	21	257	250	3	0	240	21000	46260
4	20	248	250	1	0	80	22000	44640
5	20	248	250	0	1	160	20000	44640
6	20	248	250	0	3	480	20000	44640

**Table 10-(b)** Case 1 : Simulation result value with 2 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	20	239	258	258	278	272	282	270	267	249	278	275	10.92
2	21	257	314	304	308	284	280	300	311	306	298	287	13.98
3	21	257	334	349	326	331	335	328	325	328	343	329	22.74
4	20	248	300	319	315	329	319	317	308	308	318	325	21.42
5	20	248	314	321	310	309	321	304	317	314	311	320	21.02
6	20	248	328	318	328	327	317	324	327	337	314	320	23.43
												표준 편차	4.72

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 19,20 이다.

$$y = 4.1477x + 164.94 \text{ ( for period 1 )} \quad (19)$$

$$y = 10.083x + 82.541 \text{ ( for period 2~6 )} \quad (20)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 11-(a)** Case 1 : The integer optimization plan established by 3 times relational equations (19),(20)

$y = 4.1477x + 164.94 \text{ ( for period 1 )}$ $y = 10.083x + 82.541 \text{ ( for period 2~6 )}$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	16	231	250	0	19	3040	16000	41580
2	18	264	250	0	5	800	18000	47520
3	17	253	250	0	2	320	19000	45540
4	17	253	250	1	0	80	17000	45540
5	17	253	250	4	0	320	17000	45540
6	16	243	250	0	3	480	18000	43740

**Table 11-(b)** Case 1 : Simulation result value with 3 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	16	231	229	232	232	226	233	228	227	229	225	230	1.19
2	18	264	285	271	265	275	269	281	271	282	274	271	3.74
3	17	253	287	287	288	287	288	285	278	283	289	295	11.74
4	17	253	283	288	291	286	280	272	289	270	283	282	10.36
5	17	253	277	267	266	272	277	276	267	284	291	289	8.45
6	16	243	269	268	268	273	265	259	262	272	260	261	8.51
												표준 편차	3.69

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 21,22이다.

$$y = 4.1699x + 164.21 \quad (\text{for period 1}) \quad (21)$$

$$y = 10.173x + 87.931 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (22)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 12-(a)** Case 1 : The integer optimization plan established by 4 times relational equations (21),(22)

$y = 4.1699x + 164.21 \quad (\text{for period 1})$ $y = 10.173x + 87.931 \quad (\text{for period 2-6})$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	15	226	250	0	24	3840	15000	40680
2	17	260	250	0	14	2240	17000	46800
3	17	260	250	0	4	640	17000	46800
4	16	250	250	0	4	640	18000	45000
5	16	250	250	0	4	640	16000	45000
6	16	250	250	0	4	640	16000	45000

**Table 12-(b)** Case 1 : Simulation result value with 4 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	15	226	219	214	234	212	224	226	222	207	223	215	3.72
2	17	260	261	271	263	265	262	276	275	264	259	262	2.21
3	17	260	283	291	289	291	286	287	288	282	284	288	9.37
4	16	250	261	252	267	274	261	254	261	258	270	263	4.56
5	16	250	254	266	266	261	259	267	265	255	255	252	3.80
6	16	250	266	267	259	263	274	259	269	257	271	264	5.59
												표준 편차	2.25

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 23, 24이다.

$$y = 4.2536x + 161.67 \text{ ( for period 1 )} \quad (23)$$

$$y = 10.189x + 90.852 \text{ ( for period 2~6 )} \quad (24)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

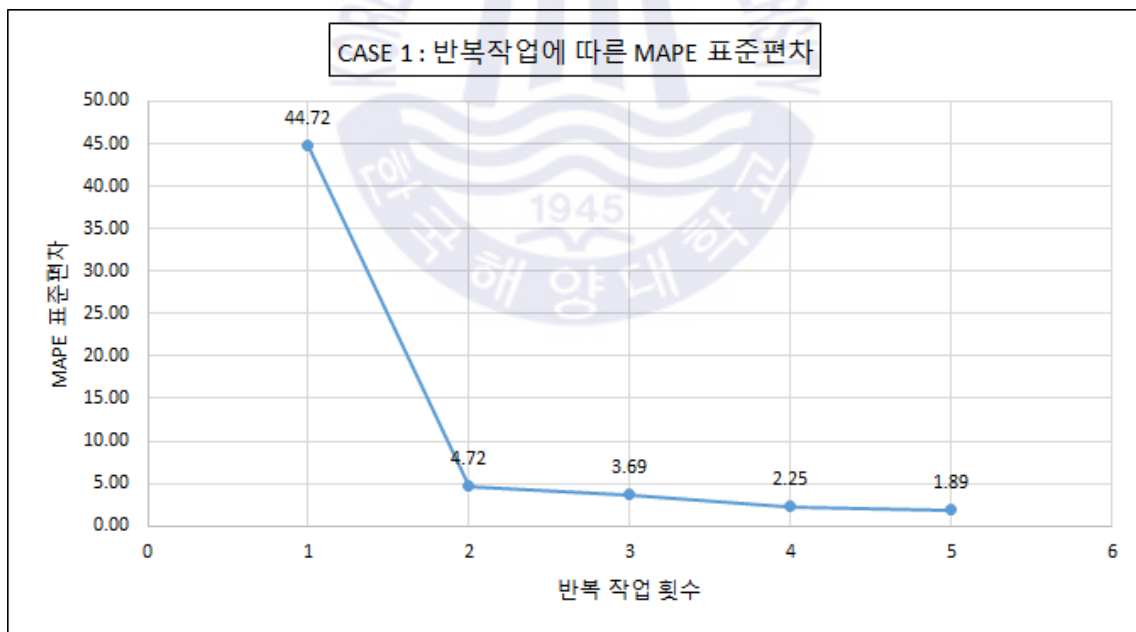
**Table 13-(a)** Case 1 : The integer optimization plan established by 5 times relational equations (23),(24)

$y = 4.2536x + 161.67 \text{ ( for period 1 )}$ $y = 10.189x + 90.852 \text{ ( for period 2~6 )}$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	17	233	250	0	17	2720	17000	41940
2	17	264	250	0	3	480	17000	47520
3	16	253	250	0	0	0	18000	45540
4	16	253	250	3	0	240	16000	45540
5	15	243	250	0	4	640	17000	43740
6	16	253	250	0	1	160	16000	45540



**Table 13-(b)** Case 1 : Simulation result value with 5 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	17	233	231	247	232	241	252	239	240	242	240	228	3.21
2	17	264	275	264	276	264	261	275	265	260	245	269	2.50
3	16	253	276	274	283	274	269	276	278	271	289	270	8.29
4	16	253	262	269	267	263	279	263	264	267	264	258	4.71
5	15	243	264	245	256	252	241	248	254	253	251	247	3.34
6	16	253	259	258	265	261	271	263	267	262	273	260	4.10
												표준 편차	1.89



**Fig.26-(a)** CASE 1 : Standard deviation of MAPE with iterations

반복 작업 5번째에 종료조건을 만족시켜 종료하였다.

### 4.3.3 Case 2 반복 작업

Table 14 Case 2 : Simulation result value with optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	14	220	212	206	210	212	212	210	210	211	215	208	4.48
2	14	275	222	230	236	226	218	222	234	226	220	225	21.81
3	14	275	256	246	234	236	244	242	236	229	239	234	14.88
4	4	243	82	81	92	85	86	86	88	81	87	86	184.95
5	4	243	84	88	81	72	89	84	85	84	82	81	193.68
6	4	243	79	81	84	78	82	81	82	85	80	84	198.00
												표준 편차	89.47

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 25,26이다.

$$y = 4.3024x + 153.65 \quad (\text{for period 1}) \quad (25)$$

$$y = 9.1909x + 70.37 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (26)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

Table 15-(a) Case 2 : The integer optimization plan established by 2 times relational equations (25),(26)

$y = 4.3024x + 153.65 \quad (\text{for period 1})$ $y = 9.1909x + 70.37 \quad (\text{for period 2-6})$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	5	175	150	25	0	2000	5000	31500
2	26	309	440	0	106	16960	26000	55620
3	26	309	180	23	0	1840	26000	55620
4	26	309	330	2	0	160	26000	55620
5	24	290	350	0	58	9280	28000	52200
6	4	107	50	0	1	160	44000	19260

**Table 15-(b)** Case 2 : Simulation result value with 2 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	5	175	82	80	80	87	79	79	88	87	84	83	111.43
2	26	309	355	380	373	314	359	357	340	340	356	342	11.89
3	26	309	372	353	358	370	367	366	356	363	366	353	14.71
4	26	309	341	336	302	338	309	319	349	317	337	325	5.87
5	24	290	310	317	339	292	336	324	322	315	321	314	8.95
6	4	107	84	82	94	93	89	89	84	83	81	92	23.19
												표준 편차	37.11

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 27,28이다.

$$y = 6.9943x + 81.644 \quad (\text{for period 1}) \quad (27)$$

$$y = 10.453x + 60.671 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (28)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 16-(a)** Case 2 : The integer optimization plan established by 3 times relational equations (27),(28)

$y = 6.9943x + 81.644 \quad (\text{for period 1})$ $y = 10.453x + 60.671 \quad (\text{for period 2~6})$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	16	193	150	43	0	3440	16000	34740
2	23	301	440	0	96	15360	23000	54180
3	23	301	180	25	0	2000	23000	54180
4	23	301	330	0	4	640	23000	54180
5	23	301	350	0	53	8480	23000	54180
6	4	102	50	0	1	160	42000	18360

**Table 16-(b)** Case 2 : Simulation result value with 3 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	16	175	226	224	217	218	229	207	213	237	230	236	21.63
2	23	309	328	328	344	359	347	351	345	315	327	340	8.56
3	23	309	341	345	349	349	347	349	351	360	375	359	12.28
4	23	309	342	329	338	326	331	327	320	337	343	310	6.37
5	23	309	333	335	332	335	328	352	336	328	313	343	7.27
6	4	102	82	87	85	86	87	90	92	86	87	90	17.09
												표준 편차	5.54

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 29,30이다.

$$y = 6.9343x + 88.364 \text{ ( for period 1 )} \quad (29)$$

$$y = 11.158x + 56.787 \text{ ( for period 2~6 )} \quad (30)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 17-(a)** Case 2 : The integer optimization plan established by 4 times relational equations (29),(30)

$y = 6.9343x + 88.364 \text{ ( for period 1 )}$ $y = 11.158x + 56.787 \text{ ( for period 2~6 )}$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	15	192	150	42	0	3360	15000	34560
2	22	302	440	0	96	15360	22000	54360
3	22	302	180	26	0	2080	22000	54360
4	22	302	330	0	2	320	22000	54360
5	22	302	350	0	50	8000	22000	54360
6	4	101	50	1	0	80	40000	18180

**Table 17-(b)** Case 2 : Simulation result value with 4 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	15	192	209	220	226	221	228	228	229	223	208	197	12.09
2	22	302	324	315	328	331	322	302	310	314	329	347	6.14
3	22	302	353	349	340	329	344	355	332	349	358	352	12.68
4	22	302	340	334	333	334	337	337	337	338	323	317	9.27
5	22	302	314	311	316	341	312	329	325	311	335	352	6.80
6	4	101	95	92	88	89	98	89	84	91	93	91	11.17
												표준 편차	2.52

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 31,32이다.

$$y = 6.8232x + 95.438 \quad (\text{for period 1}) \quad (31)$$

$$y = 11.506x + 55.456 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (32)$$

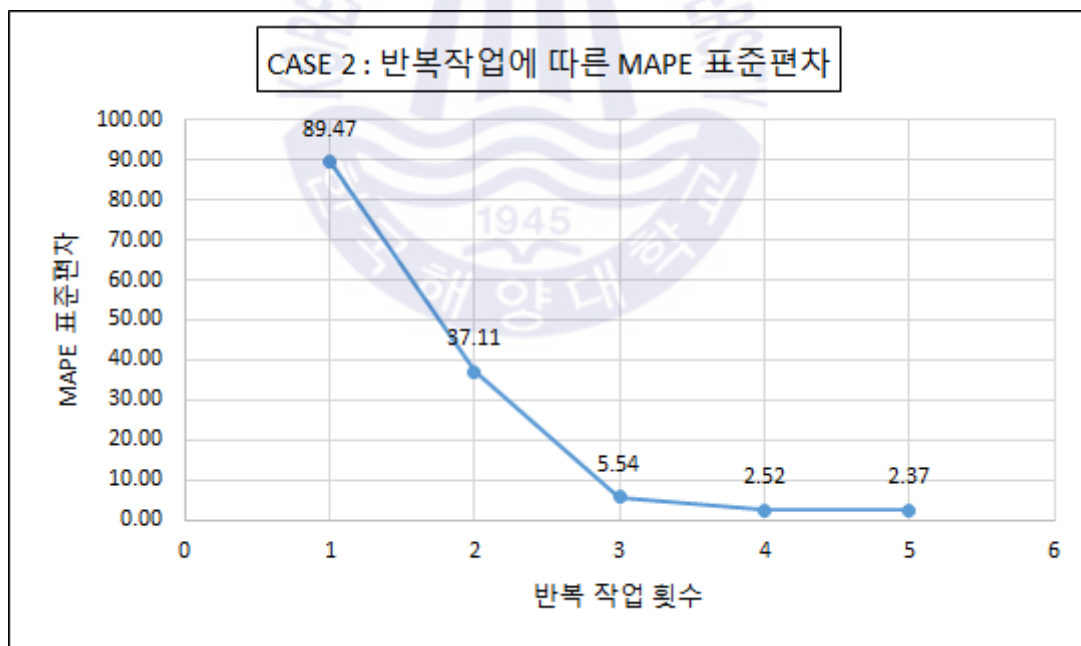
개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 18-(a)** Case 2 : The integer optimization plan established by 5 times relational equations (31),(32)

$y = 6.8232x + 95.438 \quad (\text{for period 1})$ $y = 11.506x + 55.456 \quad (\text{for period 2-6})$									
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost	
1	17	211	150	61	0	4880	17000	37980	
2	21	297	440	0	82	13120	21000	53460	
3	21	297	180	35	0	2800	21000	53460	
4	21	297	330	2	0	160	21000	53460	
5	21	297	350	0	51	8160	21000	53460	
6	4	101	50	0	0	0	38000	18180	

**Table 18-(b)** Case 2 : Simulation result value with 5 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	17	211	242	244	239	235	246	243	243	227	236	243	11.96
2	21	297	313	298	311	337	302	318	313	326	309	304	5.03
3	21	297	333	332	344	324	341	337	330	341	325	334	11.07
4	21	297	316	330	328	323	320	317	340	320	335	330	8.82
5	21	297	329	311	316	329	322	332	320	316	323	323	7.76
6	4	101	90	91	99	95	90	95	90	99	99	98	6.94
												표준 편차	2.37



**Fig.26-(b)** CASE 2 : Standard deviation of MAPE with iterations

반복 작업 5번째에 종료조건을 만족시켜 종료하였다.

### 4.3.4 Case 3 반복 작업

Table 19 Case 3 : Simulation result value with optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	14	220	213	207	202	207	210	209	204	208	204	203	6.46
2	14	275	222	225	224	235	228	228	226	224	232	226	21.18
3	14	255	245	244	241	235	240	238	237	244	249	245	5.49
4	4	243	81	84	88	90	85	81	80	83	84	83	189.99
5	4	243	84	85	84	77	84	84	85	81	81	83	193.73
6	4	243	83	79	83	86	82	83	74	82	78	88	197.72
												표준 편차	91.55

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 33,34이다.

$$y = 4.3848x + 150.98 \quad (\text{for period 1}) \quad (33)$$

$$y = 9.1714x + 70.641 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (34)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

Table 20-(a) Case 3 : The integer optimization plan established by 2 times relational equations (33),(34)

$y = 4.3848x + 150.98 \quad (\text{for period 1})$ $y = 9.1714x + 70.641 \quad (\text{for period 2-6})$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	23	251	500	0	249	39840	23000	45180
2	23	281	0	32	0	2560	23000	50580
3	23	281	500	0	187	29920	23000	50580
4	23	281	0	94	0	7520	23000	50580
5	23	281	500	0	125	20000	23000	50580
6	6	125	0	0	0	0	40000	22500

**Table 20-(b)** Case 3 : Simulation result value with 2 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	23	251	275	278	290	272	293	303	270	311	312	287	12.95
2	23	281	291	301	294	309	291	291	321	292	291	311	5.97
3	23	281	347	361	352	350	346	350	348	344	340	340	19.18
4	23	281	342	331	342	332	333	342	326	335	347	321	16.10
5	23	281	331	316	308	339	311	295	321	311	302	326	10.93
6	6	125	122	122	121	120	120	115	117	130	127	124	3.83
												표준 편차	5.35

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 35,36이다.

$$y = 4.5142x + 157.21 \quad (\text{for period 1}) \quad (35)$$

$$y = 10.461x + 64.978 \quad (\text{for period 2-6}) \quad (36)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 21-(a)** Case 3 : The integer optimization plan established by 3 times relational equations (35),(36)

$y = 4.5142x + 157.21 \quad (\text{for period 1})$ $y = 10.461x + 64.978 \quad (\text{for period 2-6})$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	22	256	500	0	244	39040	22000	46080
2	22	295	0	51	0	4080	22000	53100
3	22	295	500	0	154	24640	22000	53100
4	20	274	0	120	0	9600	24000	49320
5	20	274	500	0	106	16960	20000	49320
6	4	106	0	0	0	0	36000	19080



**Table 21-(b)** Case 3 : Simulation result value with 3 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	22	256	280	294	266	285	281	295	279	276	295	267	9.04
2	22	295	274	284	313	307	295	281	307	298	289	329	4.35
3	22	295	344	326	338	331	337	336	336	343	331	328	11.92
4	20	274	325	320	310	298	321	316	326	333	313	304	13.37
5	20	274	326	310	315	313	315	312	318	312	306	316	12.80
6	4	106	94	95	93	95	95	98	96	92	104	100	10.32
												표준 편차	3.03

시뮬레이션 결과 데이터를 반영하여 개선한 관계식은 식 37,38이다.

$$y = 4.5012x + 163.28 \text{ ( for period 1 )} \quad (37)$$

$$y = 10.981x + 62.995 \text{ ( for period 2~6 )} \quad (38)$$

개선한 관계식을 최적화 모델에 반영하여 최적화 계획을 수립한다.

**Table 22-(a)** Case 3 : The integer optimization plan established by 4 times relational equations (37),(38)

$y = 4.5012x + 163.28 \text{ ( for period 1 )}$ $y = 10.981x + 62.995 \text{ ( for period 2~6 )}$								
Period	Worker	production	demand	Inventory	Shortage of inventory	Cost of inventory	Hiring cost	Production cost
1	27	284	500	0	216	34560	27000	51120
2	27	359	0	143	0	11440	27000	64620
3	27	359	500	2	0	160	27000	64620
4	12	194	0	196	0	15680	42000	34920
5	12	194	500	0	110	17600	12000	34920
6	4	106	0	0	4	640	20000	19080

Table 22-(b) Case 3 : Simulation result value with 4 times improved optimization plan

Simulation result													
Period	Worker	plan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MAPE
1	27	284	304	257	312	279	291	283	294	291	307	295	4.76
2	27	359	326	358	309	334	308	329	345	311	317	320	10.47
3	27	359	344	349	374	343	360	359	352	356	358	346	2.30
4	12	194	185	205	189	198	210	191	188	200	192	209	3.85
5	12	194	231	234	226	228	222	218	222	228	221	219	13.70
6	4	106	96	99	98	100	92	96	98	98	95	99	9.23
												표준 편차	4.04

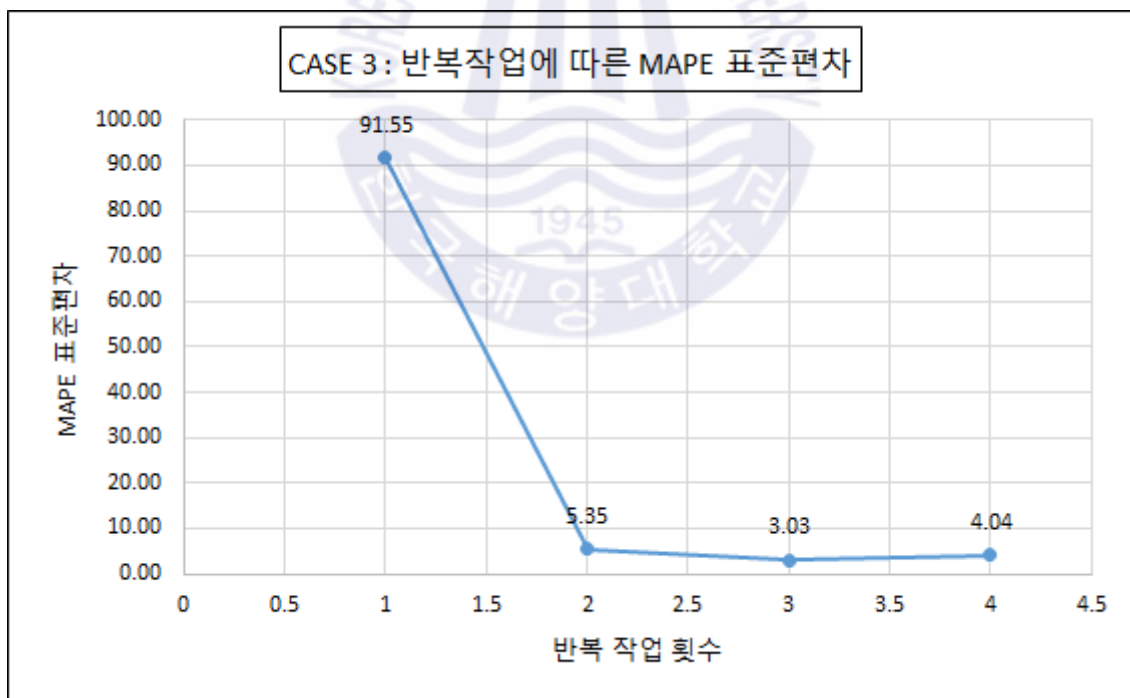


Fig.26-(c) CASE 3 : Standard deviation of MAPE with iterations

반복 작업 4번째에 종료조건을 만족시켜 종료하였다.

## 제 5 장 결과 분석 및 결론

각 케이스별 모델 안정화 반복 작업을 통해 수정된 기간별 작업 인원 계획 및 관련 비용을 확인해봄으로써 결과 분석을 수행하였다.

### 5.1 각 CASE별 반복 작업에 따른 MAPE 비교

반복 작업에 따른 MAPE의 총 합을 비교해보았다. MAPE의 합이 크면 클수록 계획 값과 시뮬레이션 모델 결과 값의 차이가 큰 것을 의미하며, 이는 생산 능력 계획과 실제 생산 현장 간 차이의 크기를 의미한다. 모든 케이스에서 모델 안정화 반복 작업을 수행함에 따라 총 MAPE의 합이 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 표 23-(a), 23-(b), 23-(c)와 그림 28-(a), 28-(b), 28-(c)의 그래프로 확인할 수 있다.

**Table 23-(a)** Case 1 : MAPE comparison by iterations

Number of iterations	1	2	3	4	5
Period 1	5.35	10.92	1.19	3.72	3.21
Period 2	22.77	13.98	3.74	2.21	2.50
Period 3	64.63	22.74	11.74	9.37	8.29
Period 4	111.98	21.42	10.36	4.56	4.71
Period 5	114.23	21.02	8.45	3.80	3.34
Period 6	113.22	23.43	8.51	5.59	4.10
표준편차	44.72	4.72	3.69	2.25	1.89
합	432.18	113.51	43.99	29.25	26.14

**Table 23-(b)** Case 2 : MAPE comparison by iterations

Number of iterations	1	2	3	4	5
Period 1	4.48	111.43	21.63	12.09	11.96
Period 2	21.81	11.89	8.56	6.14	5.03
Period 3	14.88	14.71	12.28	12.68	11.07
Period 4	184.95	5.87	6.37	9.27	8.82
Period 5	193.68	8.95	7.27	6.80	7.76
Period 6	198.00	23.19	17.09	11.17	6.94
표준편차	89.47	37.11	5.54	2.52	2.37
합	617.79	176.02	73.19	58.15	51.58

**Table 23-(c)** Case 3 : MAPE comparison by iterations

Number of iterations	1	2	3	4
Period 1	6.46	12.95	9.04	4.76
Period 2	21.18	5.97	4.35	10.47
Period 3	5.49	19.18	11.92	2.30
Period 4	189.99	16.10	13.37	3.85
Period 5	193.73	10.93	12.80	13.70
Period 6	197.72	3.83	10.32	9.23
표준편차	91.55	5.35	3.03	4.04
합	614.56	68.97	61.79	44.31



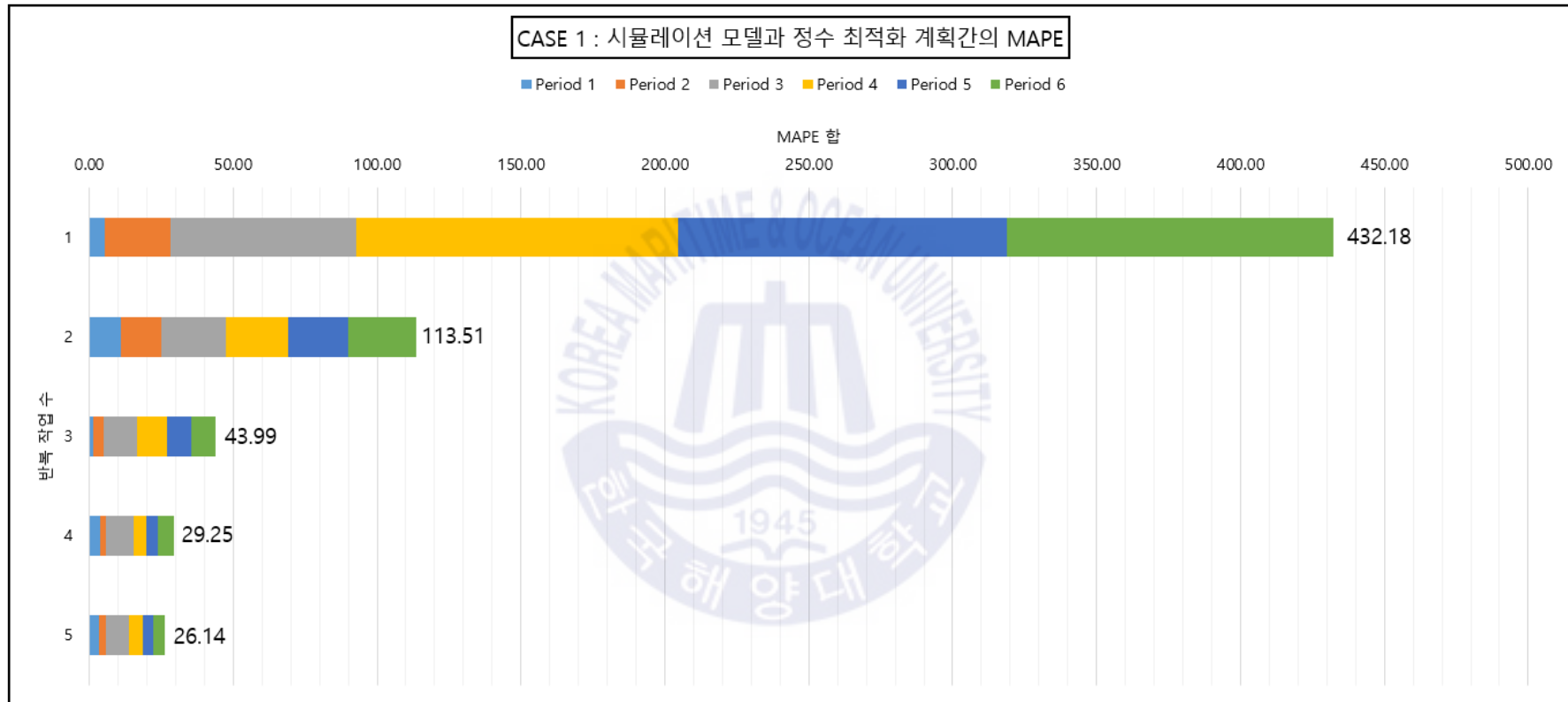


Fig. 27-(a) Case 1 : MAPE between simulation model and optimization plan

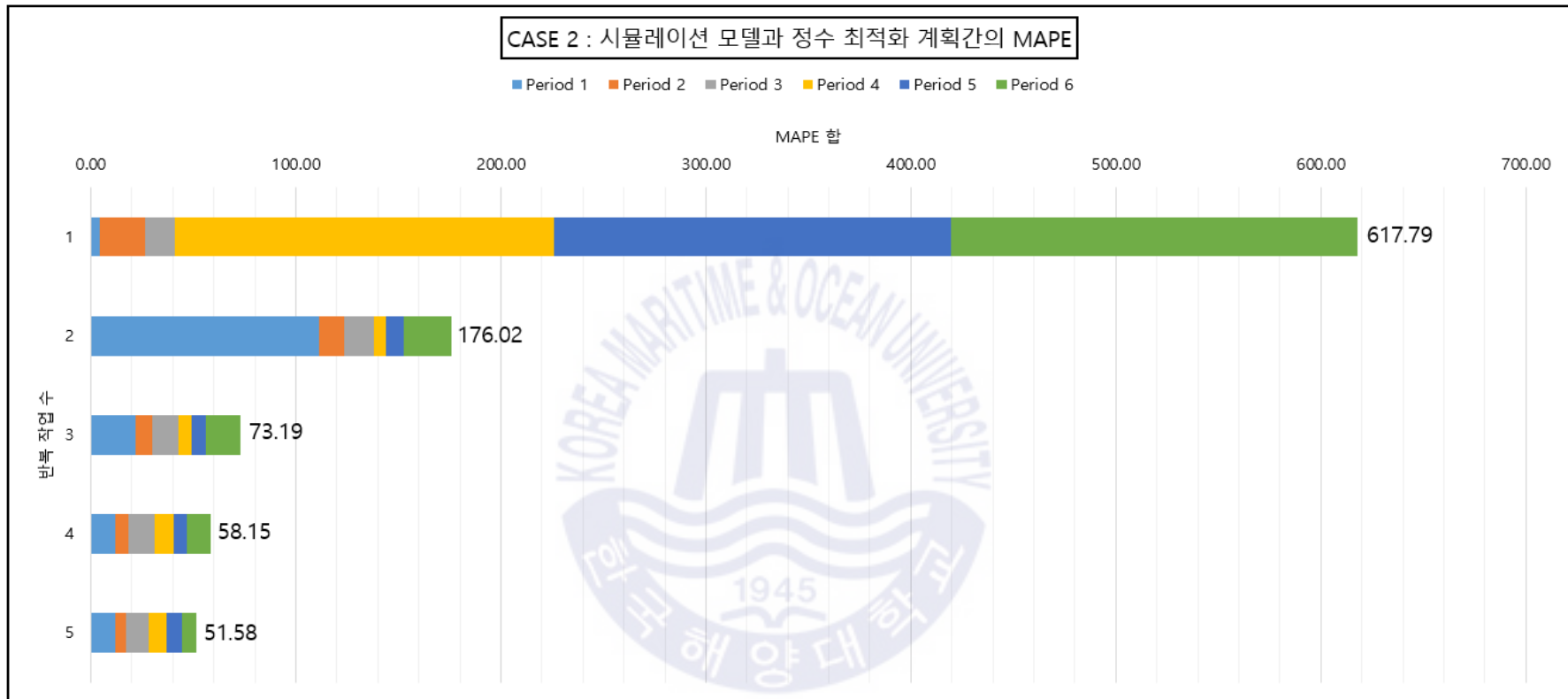


Fig. 27-(b) Case 2 : MAPE between simulation model and optimization plan

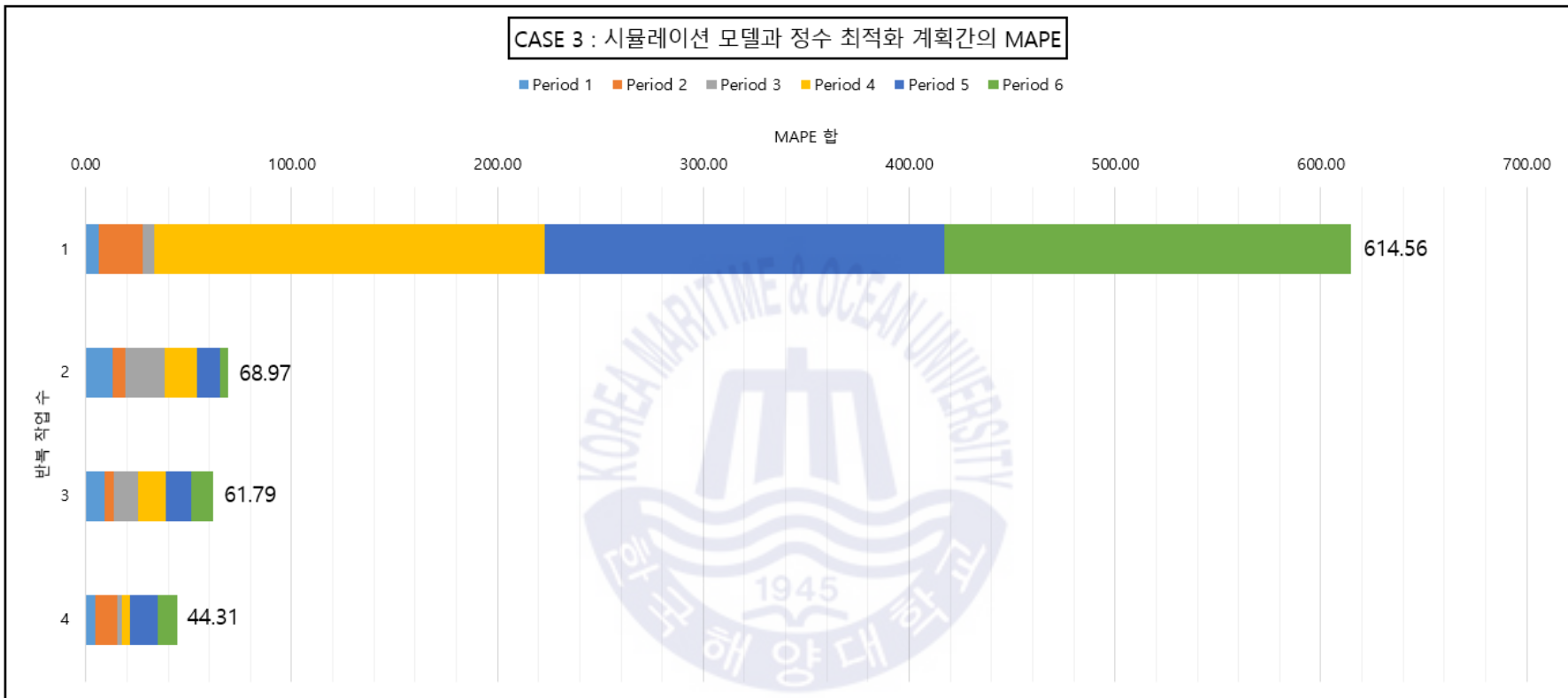


Fig. 27-(c) Case 3 : MAPE between simulation model and optimization plan

## 5.2 각 CASE별 공정 관련 비용 비교

Case별 공정 관련 비용에 대하여 최적화 계획과 시뮬레이션 모델 결과 값을 모델 안정화 작업 전과 후를 비교해 봄으로써, 모델 안정화 작업을 통해 정수 최적화 계획이 현장을 잘 반영하도록 개선되었는지 확인해보았다. 이를 통해 보다 정확한 공정 관련 비용을 예측할 수 있으며 나아가 생산 현장에 알맞은 수요 전략을 수립할 수 있다.

표 24-(a), 24-(b), 24-(c)는 case별 모델 안정화 작업 전과 후의 공정 관련 비용을 나타낸다.

**Table 24-(a)** Case 1 : Process related costs about before and after model enhancement

Case1						
	반복 작업 전			반복 작업 후		
	재고 비용	고용 비용	생산 비용	재고 비용	고용 비용	생산 비용
Plan	6560	70000	269460	4240	101000	269820
sim 1	371040	70000	168300	118000	101000	282060
sim 2	368160	70000	169020	116800	101000	280260
sim 3	369760	70000	170100	117680	101000	284220
sim 4	375040	70000	167400	117920	101000	279900
sim 5	366240	70000	168840	118000	101000	283140
sim 6	361760	70000	170820	117680	101000	281520
sim 7	366400	70000	170460	117760	101000	282240
sim 8	350720	70000	164880	118480	101000	279900
sim 9	360320	70000	172440	121920	101000	281160
sim 10	371840	70000	167220	122320	101000	275760



**Table 24-(b)** Case 2 : Process related costs about before and after model enhancement

Case2						
	반복 작업 전			반복 작업 후		
	재고 비용	고용 비용	생산 비용	재고 비용	고용 비용	생산 비용
Plan	65920	74000	269820	29120	139000	270000
sim 1	336160	74000	168300	92400	139000	292140
sim 2	340800	74000	167760	90480	139000	289080
sim 3	336320	74000	168660	94480	139000	294660
sim 4	348320	74000	163620	97600	139000	295740
sim 5	343040	74000	167580	91120	139000	291780
sim 6	344800	74000	166500	94640	139000	295560
sim 7	337600	74000	168300	96480	139000	294480
sim 8	350720	74000	164880	94720	139000	293220
sim 9	343840	74000	166140	95440	139000	292860
sim 10	349920	74000	165240	94080	139000	293760

**Table 24-(c)** Case 3 : Process related costs about before and after model enhancement

Case3						
	반복 작업 전			반복 작업 후		
	재고 비용	고용 비용	생산 비용	재고 비용	고용 비용	생산 비용
Plan	132320	74000	266220	90160	145000	269640
sim 1	342080	74000	167040	81040	145000	286020
sim 2	344960	74000	166320	73680	145000	287280
sim 3	350240	74000	165960	81040	145000	289620
sim 4	341280	74000	167400	78640	145000	287460
sim 5	341600	74000	167220	78560	145000	283680
sim 6	345600	74000	166140	79840	145000	283860
sim 7	354240	74000	163080	74880	145000	287820
sim 8	346080	74000	165960	73040	145000	288180
sim 9	340480	74000	167040	83360	145000	280260
sim 10	347040	74000	167040	77120	145000	283680

그림 23-(a),23-(b),24-(a),24-(b),25-(a),25-(b)를 통해 모델 안정화 반복 작업 후 정수 최적화 계획과 실제 현장간의 공정 관련 비용 차이가 모든 case에서 개선됨을 확인할 수 있다. 모델 안정화 반복 작업 전과 후를 비교해보았을 때, 재고, 생산 비용에서 최적화 계획과 시뮬레이션 모델 간의 차이가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

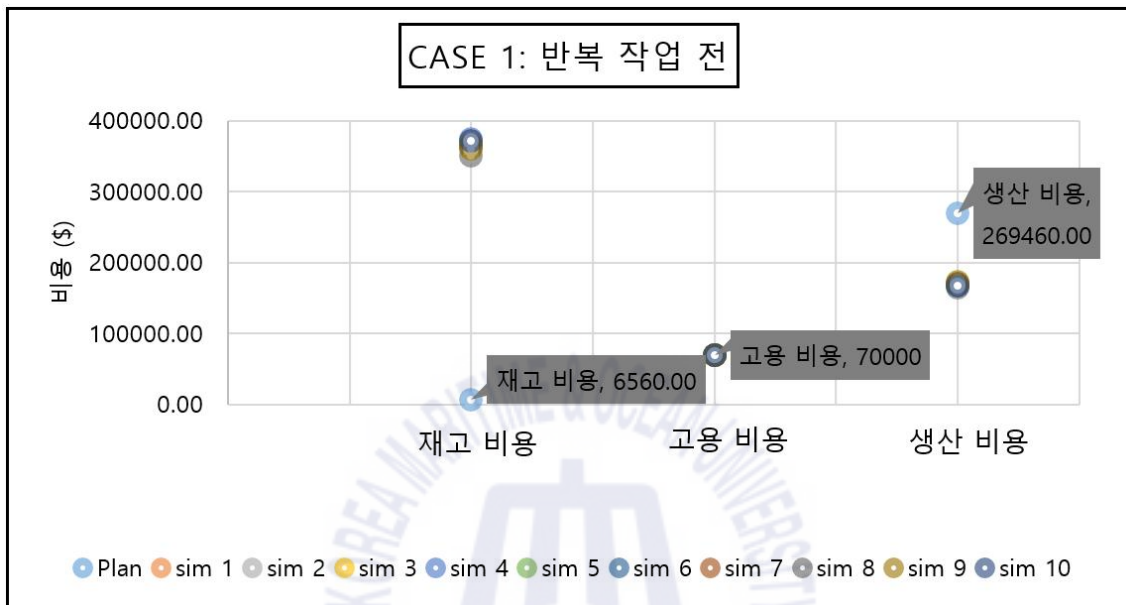


Fig. 28-(a) Case 2 : Process cost before iterations

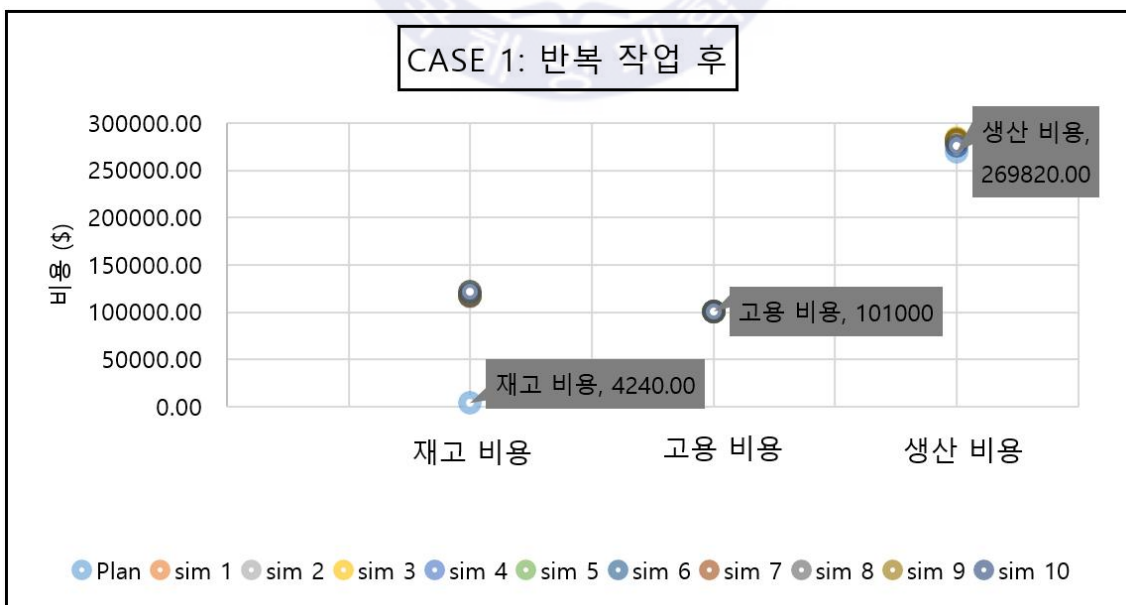


Fig. 28-(b) Case 1 : Process cost after iterations

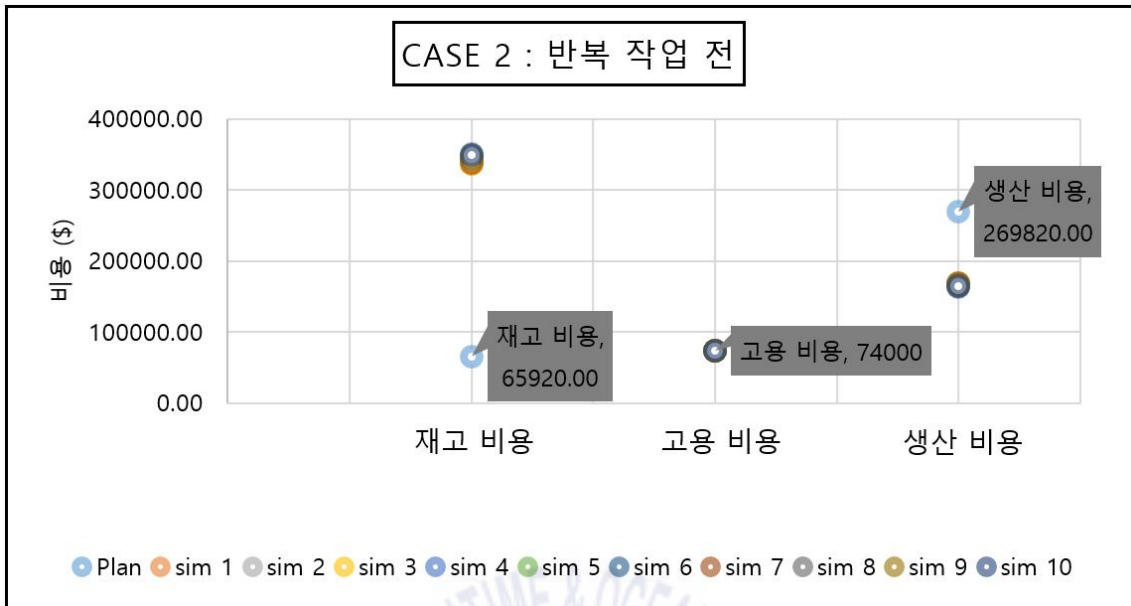


Fig. 29-(a) Case 2 : Process cost before iterations

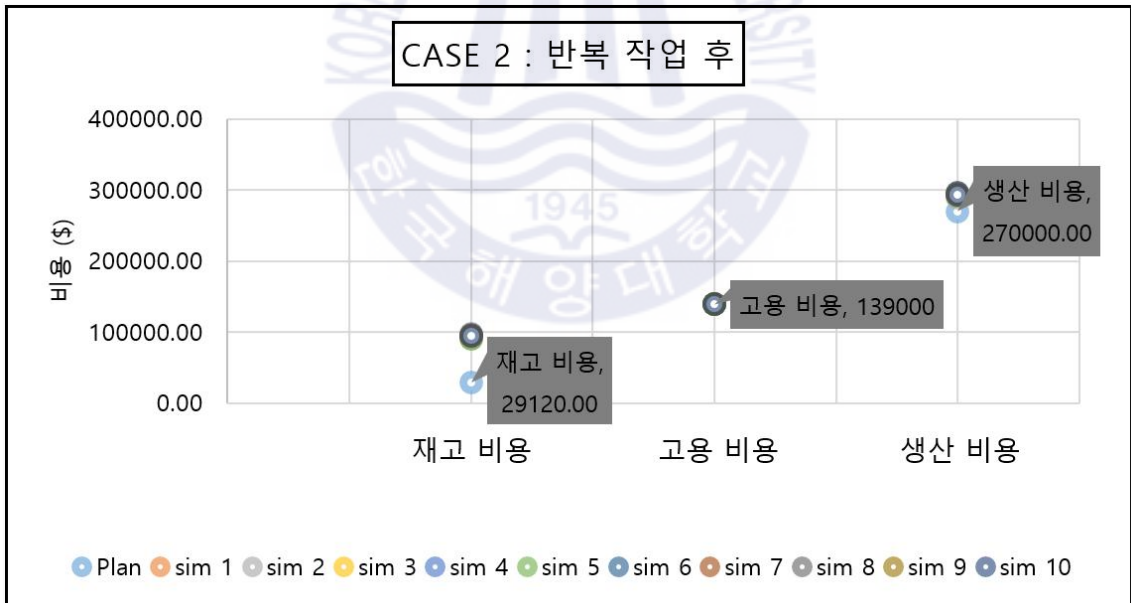


Fig. 29-(b) Case 2 : Process cost after iterations

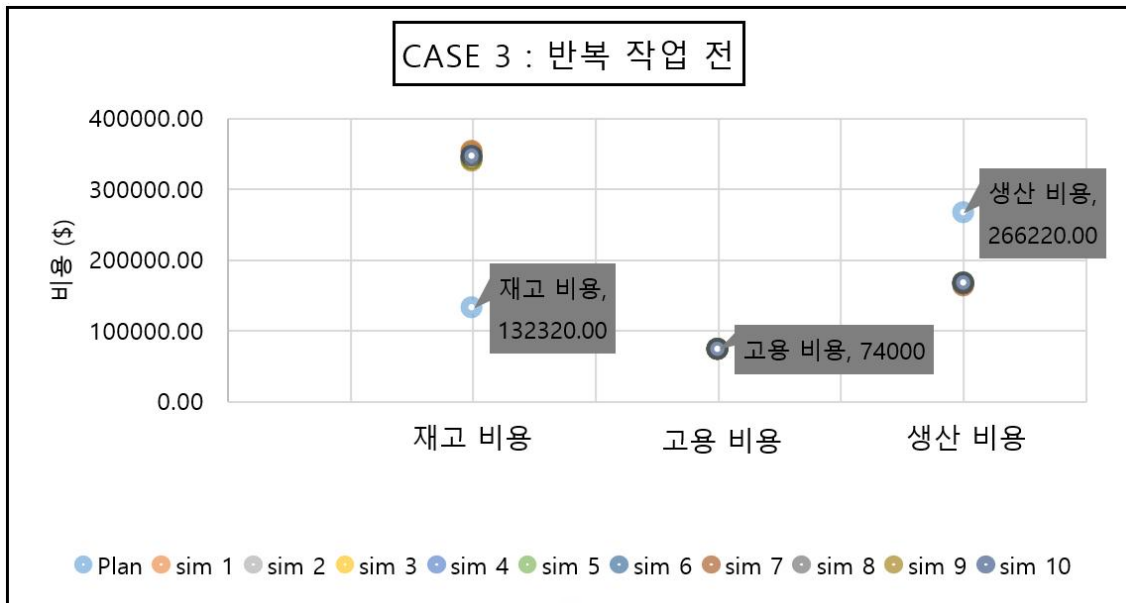


Fig. 30-(a) Case 3 : Process cost before iterations

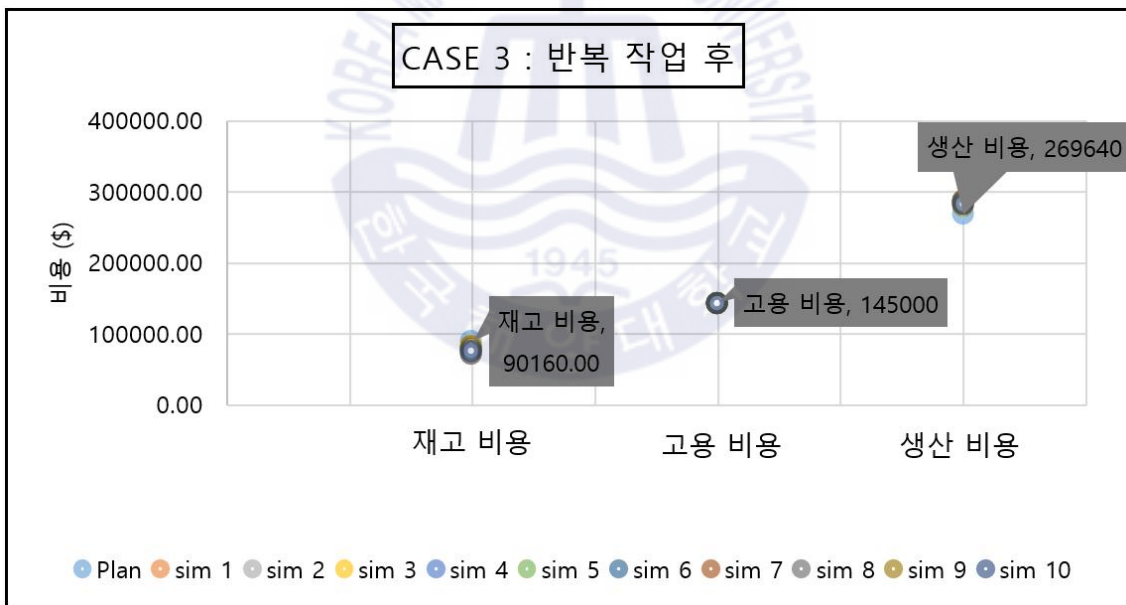


Fig. 30-(b) Case 3 : Process cost after iterations

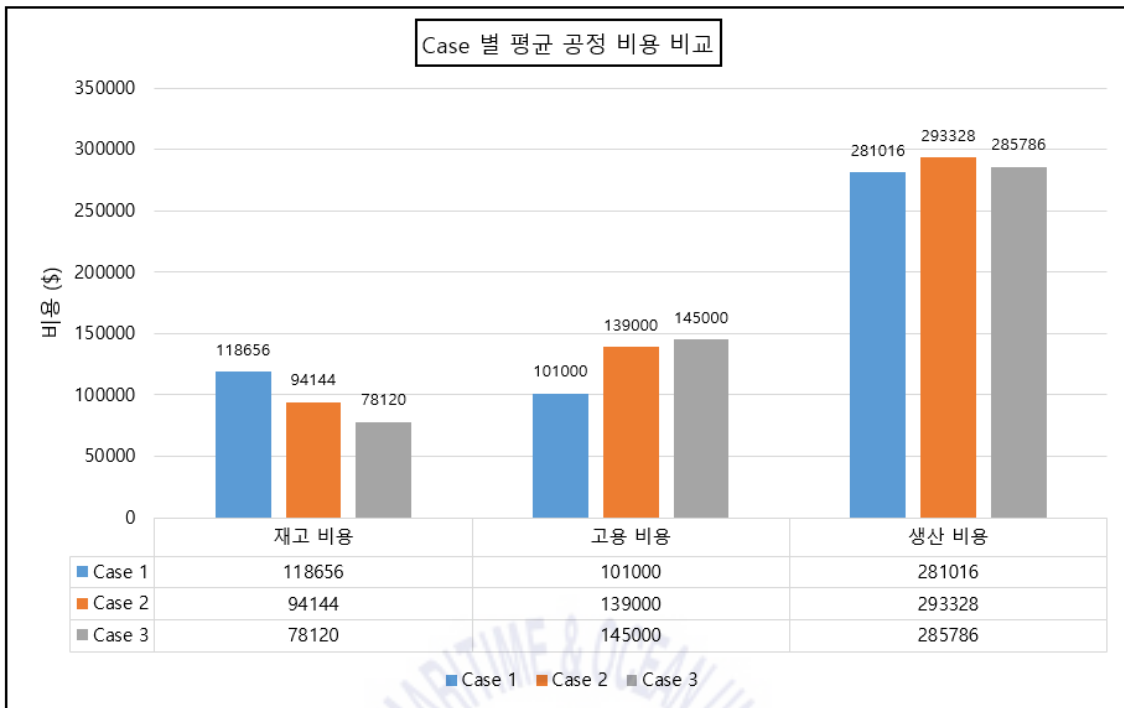


Fig. 31 Average process cost comparison by case

Table 25-(a) Case 1 : The number of product demand

Period ( 7 일씩 )	Demand
1	250
2	250
3	250
4	250
5	250
6	250

Table 25-(b) Case 2 : The number of product demand

Period ( 7 일씩 )	Demand
1	150
2	440
3	180
4	330
5	350
6	50

Table 25-(c) Case 3 : The number of product demand

Period ( 7 일씩 )	Demand
1	500
2	0
3	500
4	0
5	500
6	0

기간별 설정한 수요량에 따른 Case별 공정 평균 비용을 비교해보았다. 일정한 수요량을 설정한 case 1에서는 재고비용이 가장 높고, 기간별 수요량을 극대화한 case 3에서는 고용비용이 가장 큰 것으로 확인할 수 있었다. 생산 비용의 경우 수요량을 무작위로 설정했던 case 2에서 가장 높은 것으로 확인할 수 있었다. 모델 안정화 작업을 통해 보다 정확한 정보를 바탕으로 공정의 실제 운영 정보를 바탕으로 실질적인 계획을 수립할 수 있다.

### 5.3 연구 결론

본 논문에서는 정수 계획 최적화를 통해 수립된 계획과 실제 현장간의 차이를 줄이기 위함을 목적으로 하였다. 이는 실제 현장의 공정 정보를 반영하여 모사한 시뮬레이션 모델과 정수 최적화 모델을 통해 반복 작업인 모델 안정화 작업 ( Model enhancement )을 수행하였다. 그 대상은 조선소의 성형 공정으로 설정하였다. 노동집약적 특성이 짙은 조선소 성형 공정은 데이터의 수집이 어려운 특징으로 인해 기간별 수요량에 알맞은 생산 계획 및 인력 고용이 모두 작업자의 경험으로 수립되고 있는 실정이다. 따라서 현장의 다양한 특성을 반영한 계획을 수립하기 위해 계획하고자 하는 변수에 대한 관계식을 설정하여 이를 최적화 모델에 제약조건으로 적용하고, 시뮬레이션 결과 데이터를 관계식 수립에 추가하는 작업을 반복함으로써 모델 안정화 작업을 수행하여 생산 현장에 대한 전략 및 계획을 기존보다 정확하고 효율적으로 수립하여 관리할 수 있는 방안을 제시해 보고자 하였다.

조선소 성형공장의 작업 변동성을 고려한 모델 안정화 기법 기반 인력 계획 연구는 다음과 같은 3가지 관점에서 의의가 있다.

첫 번째, 조선소 성형 공정의 자재데이터 바탕으로 구현한 자재데이터가 포함되어있는 자재 입고를 바탕으로 각 작업장 당 분류되도록 설계하였다. 또한, 작업자와의 인터뷰를 통해 파악한 작업 및 공정 특성을 적합한 확률 특성으로 반영하여 현장의 변동성을 모사한 성형 공정 시뮬레이션 모델을 설계하였다.

두 번째, 모델 안정화 작업을 최적화 설계와 시뮬레이션 모델의 연계를 통한 반복 작업으로 수행하였으며, 이를 통해 기존보다 현장의 변동성을 잘 반영한 계획 수립이 가능할 수 있음을 반복 작업에 따른 MAPE의 합과 표준편차로 증명하였다.

세 번째, 모델 안정화 반복 작업을 통해 수립된 계획을 통하여 생산 현장에 알맞은 생산 능력 계획을 수립할 수 있으며, 해당 기간에 대한 과학적인 생산 전략 고용 인원을 설정할 수 있다.

본 연구를 기반으로 향후에는 조선소의 성형 공정과 같이 데이터가 희박한 다른 생산 공정에 대해서도 작업자와의 인터뷰 및 자재 데이터를 통해 시뮬레이션 모델을 설계하고, 시뮬레이션 모델 결과 데이터를 바탕으로 현장의 변동성을 반영한 실질적인 생산 능력 계획을 수립할 수 있을 것이라 예상된다.

## References

- 김상태, 신문수, 조용주, 2015. 이산사건 시뮬레이션을 활용한 생산성 개선 사례 연구. 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, pp.3287-3294.
- 박성혁 등, 2016. 디지털 조선소 구축을 위한 시뮬레이션 요구사항 분석 시스템 설계. 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, pp.559-536.
- 박종식, 2015. [이슈페이퍼] 조선 산업 위기와 고용규모의 변화 [Online] (Updated 27 November 2015) Available at : [http://www.metalunion.re.kr/bbs/board.php?bo\\_table=B04&wr\\_id=97](http://www.metalunion.re.kr/bbs/board.php?bo_table=B04&wr_id=97)
- 문덕희, 김대경, 1999. 작업자 공유가 가능한 병렬기계작업장에서 작업자 부하 균형을 고려한 작업할당 문제. 대한산업공학회 12권 2호, pp.166-173.
- 양현준, 2017. 최적화와 시뮬레이션을 활용한 항공화물터미널인력 스케줄링 방법 연구. 석사학위논문. 서울:광운대학교.
- 우중훈, 2005. 제품, 공정, 설비와 일정 정보를 통합한 선박 건조 내업 시스템의 모델링 및 시뮬레이션. 박사학위논문. 서울:서울대학교.
- 이홍철, 안재명, 김성식, 1997. 작업효율을 만족하고 작업량 평준화를 고려한 작업자 할당 방법에 관한 연구 ( The work Scheduling Scheme for Maximum Work Efficiency with Workloads Balancing Consideration ). 한국경영과학회지, 22(4), pp.115-131.
- 한국노동연구원, 2014. 조선 업종 일자리 대책 마련 연구, 세종:한국노동연구원
- Bang, J.Y & Kim, Y.D., 2010. Hierarchical production planning for semiconductor wafer fabrication based on linear programming and discrete-event simulation. IEEE transactions on automation science and engineering 7(2), pp.326-336.
- Bachelet.B. & Yon, L. ,2007. Model enhancement: Improving theoretical optimization with simulation. Simulation Modelling Practice and Theory 15, pp.703-715.
- Beliën, J. et al., 2012. Improving workforce scheduling of aircraft line maintenance at Sabena Technics. Interfaces, 42(4), pp.352-364.
- Byrne, M.D, and Bakir, M.A.,1999. Production planning using a hybrid simulation - analytical approach. International journal of production economics 59 (1-3), pp.305-311.
- De Bruecher, P. et al., 2015. A model enhancement heuristic for building robust aircraft maintenance personnel rosters with stochastic constraints. European journal of operational

research 246, pp.661-673 .

Grieves, M., 2006. *Product life cycle management*. The McGraw-Hill Companies:Unite states of America.

Kulkarni, K., & Venkateswaran, J.,2014. Iterative simulation and optimization approach for job shop scheduling. In Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, pp. 1620-1631.

Lee, Y.H. & Kim, S.H., 2000. Optimal production-distribution planning in supply chain management using a hybrid simulation-analytic approach. In proceedings of the 2000 winter simulation conference, pp.1252-1259.

Mahdavi, I., Shirazi, B. & Solimanpur, M.,2010. Development of a simulation-based decision support system for controlling stochastic flexible job shop manufacturing systems. *Simulation modelling practice and theory* 18(6), pp.768-786.

Roeder, T.M.K., et al., 2016. Framework for standardization of simulation integrated production planning. *Proceeding of the 2016 winter simulation conference*.

Van den Bergh, J. et al., 2013. Personnel scheduling: A literature review. *European journal of operational research*, 226(3), pp.367-385.

Singh, N., Aneja, Y. P., &Rana, S. P.,1992. A bicriterion framework for operations assignment and routing flexibility analysis in cellular manufacturing systems. *European Journal of Operational Research* 60(2), pp.200-210.



## Bibliography

Tolk, A. et al., 2014. Iterative simulation and optimization approach for job shop scheduling. Proceeding of the 2014 winter simulation conference.

