



FOM 기반 PCB 생산 공장의 KPI 향상을 위한 What-If 시뮬레이션 모델 개발 및 적용에 관한 연구

최성우^{a,*}

A Study on the Development and Application of a FOM-based What-If Simulation Model to Improve KPIs of PCB Production Plant

Seong-Woo Choi^{a,*}^a Department of Business Administration, College of Software Management, Kyonggi University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	August	2024
Revised	3	October	2024
Accepted	8	October	2024

Keywords:

FOM(smart-factory operation management)
What-If simulator
KPI(key performance indicator)
Scheduling

ABSTRACT

This study aims to improve the KPIs of manufacturing plants by benchmarking an FOM model. This involves designing a scheduling algorithm for the shop floor; developing and testing a simulation model that reflects information such as equipment, orders, and process times identical to those of the factory; and selecting a scheduling algorithm that is appropriate for the factory. To this end, we designed the architecture (framework) of the information exchange and performance evaluation process between the MES, what-if simulator, production operation information, KPI, rule tuning, and advanced planning and scheduling (APS), targeting factories of domestic PCB manufacturers. Consequently, several scheduling methodologies were found, which improved the KPIs (lead time, tardiness, equipment utilization, and productivity) compared to the scheduling methodologies currently used in the process.

1. 서론

제조기업은 공장의 생산 종합효율 향상을 위해 Q/C/D(quality, cost, delivery) 측면에서 다양한 제조 KPI(key performance index)들을 발굴하여 활용한다. 제조 KPI 관점에서 적용되고 있는 혹은 추후 적용할 생산관리 방법론, 예를 들어, 자재 투입방법, 일정계획 수립 방법 등의 해당 시나리오가 얼마나 유효하고 효과적인지 객관적으로 예측할 수 있는 분석 도구가 필요한데, 이러한 제조 KPI 값들을 예측하기 위해서 다양한 상업용 Simulation Solution들이 존재한다. 이러한 Simulation Solution들의 구동을 위해서는 기본적으로 “기준정보”와 “상태정보”, “생산계획정보”,

“운영 규칙”, 다양한 “제약사항”들이 하기 Fig. 1과 같이 Input Data로 존재해야 한다.

본 연구에서는 Simulation을 위해 필요한 다양한 Input Data Set들을 실제 제조라인 MES로부터 생성하고, 이를 기반으로 Simulation을 수행하고 미래의 제조 KPI 예측하여 다양한 일정계획 방법론을 평가하는 시스템을 구축/제안하고 이를 “What-If Simulation Solution or What-If Simulator”로 정의한다.

즉, 공장의 신축, 증축, 개축 등 공장기획 단계에서도 다양한 “기획안”을 확장된 개념의 “대체 시나리오”로 생각할 수 있으며, What-If Simulator를 활용하여 기획안을 비교평가 할 수 있다. 공정 및 설비 Layout, 반입 설비의 수량 및 성능, 생산할 제품들에

* Corresponding author. Tel.: +82-31-249-9249

E-mail address: swchoi@kyonggi.ac.kr (Seong-Woo Choi).

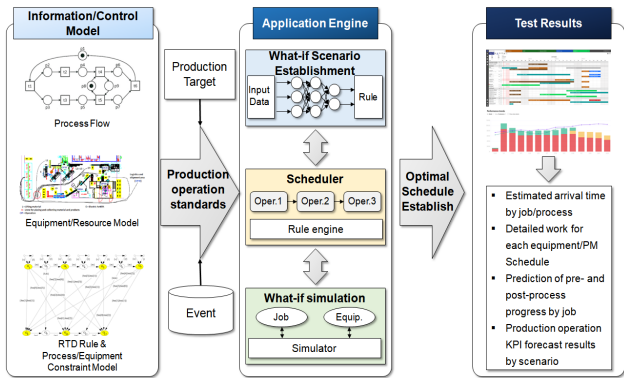


Fig. 1 Factory simulation solution diagram for manufacturing KPI prediction

대한 Product Mix, 목표 생산 Capacity 등 공장기획 단계에서 고려해야 할 다양한 의사결정 사항들을 고려하여 유효한 기획안들을 구성하고, 이에 상응하는 Input Data Set을 생성하고 What-If Simulator를 통해 해당 방법론을 개선하여 최종 기획안을 확정할 수 있지만, 본 연구에서는 일정계획 방법론을 대상으로 실제 제조 라인에 적용한 Case Study 사례에 한정하여 기술하였다.

최근, FOM(smart factory operation management) 기반의 기존 연구 및 현장 제조혁신에 관한 사례와 같이 현장의 Input Data를 분석하고 Simulation Test 결과를 통해 효율적인 생산관리 방법론 (본 연구에서는 일정계획 방법론)들을 현장에 활용하기 위한 데이터 수집 체계 및 Simulation Test 결과에 따른 KPI 분석 시스템의 중요성이 대두되고 있으며^[1,2], 생산방법론 선택의 디지털화를 통한 모니터링 및 관리^[3]와 생산효율 향상 및 다양한 소비자의 요구에 맞는 유연 생산 방식의 도입으로 부가가치 창출이 가능하도록 제조 현장에서 수집한 데이터를 4M(man, machine, material, method) 기반으로 다차원 분석하고 변화 관리가 가능한 시스템이 요구된다^[4-6].

본 연구에서는 PCB 제품을 생산/조립하는 국내 중견기업(사)의 제조공장을 대상으로 일정계획 방법론들을 디자인하고 현장의 설비, 작업, 생산계획 등을 Input Data로 설정하여 Simulation Test를 통해 Output으로 우수한 KPI들의 일정계획을 수립하는 일정계획 방법론들을 제시하는 과정을 기술하였다.

2. PCB 제조라인 사례분석

2.1 제조공정 분석

본 연구 대상의 사례 기업(사)은 오디오, 영상, CCTV 등에 사용되는 PCB부품을 생산하는 기업으로 하기 Fig. 2와 같은 공정들로 이루어져 있으며, Job-Shop(제품 혹은 부품의 종류마다 공정순서와 공정 별 시간이 서로 상이한 특성을 갖고 있는 제조 라인)

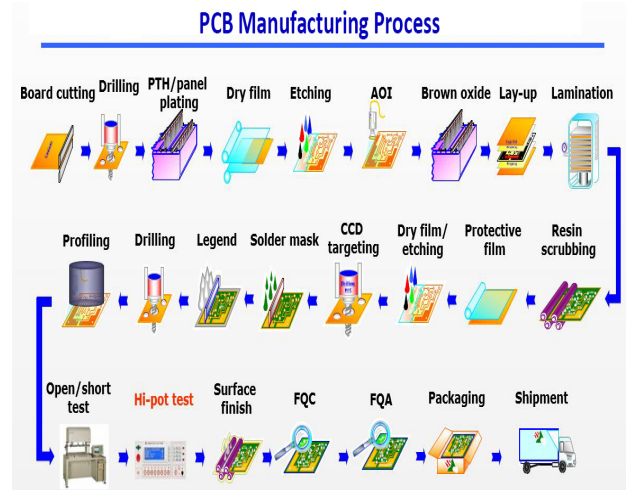


Fig. 2 Flow for PCB manufacturing process

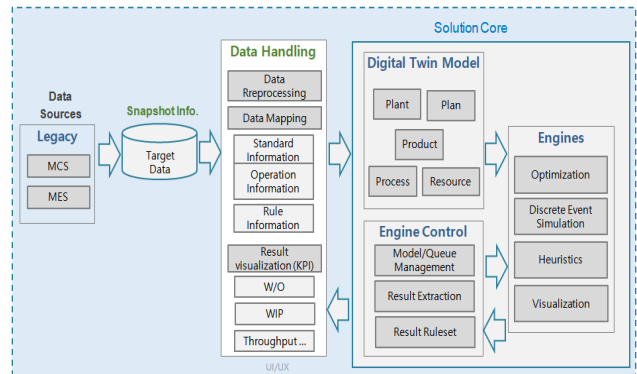


Fig. 3 What-If simulator solution architecture

형태의 공정이라고 정의할 수 있다.

2.2 What-If Simulator Solution

본 연구의 중심이 되는 What-If Simulation Solution은 제조 현장의 MCS(material control system) 및 MES(manufacturing execution system)에서 수집한 데이터(공정정보, 설비정보, 자재정보, 납기정보 등)들을 Data Handling 시스템에서 전처리하여 Simulator(Digital Twin Model: 공장과 동일한 상태의 가상 Digital 공장 모델, In-House S/W)에서 필요한 정보를 제공한다 (Fig. 3 참조). 그 뒤 Solution 코어에서 Fig. 3과 같이 Section 2.2에서 기술할 input data, Section 2.3에서 제시할 일정계획 방법론을 기반으로 시뮬레이션 Test를 수행한 뒤 제안된 방법론에 따라 수립된 일정계획 결과 값들을 Data Handling 시스템에 제공하고 그것을 가시화하여 최종적으로 효율적인 일정계획 방법론을 선택한다.

즉, 위와 같은 input data들과 공장현황을 반영한 Twin Digital 모델을 개발하여 Fig. 4와 같이 공장을 3D 그래픽으로 표현할 수 있고 Section 2.3에서 제시 할 일정계획 방법론을 Test 수행한 후

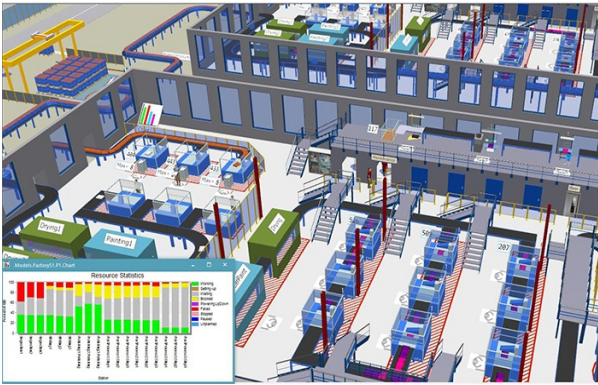


Fig. 4 3D simulation model snapshot

KPI 결과 값을 검증할 수 있다.

2.3 일정계획 방법론(scheduling algorithm)

본 연구에서는 What-If Simulator와 연계되는 디스패칭 (dispatching) 규칙을 조합하는 형태의 Rule Set을 제시한다. 디스패칭은 현 공정에서 완료됐을 때 후 공정의 어느 설비에서 진행할 것인가의 결정과 설비 별 할당된 lot(작업)들의 공정 우선순위를 결정하는 방법론이다. 중소 규모의 제조업체에서는 사람의 작업 비중이 높고 자동화 수준이 낮으므로, 작업자가 직관적으로 이해하고 조정할 수 있는 우선순위 규칙 기반의 디스패칭이 적합한 방법론이라고 판단하였다.

본 연구에서 사용할 디스패칭 규칙들은 납기준수관련 규칙들^[7-9], 적정 재공량을 조절할 수 있는 규칙들^[10-12] 그리고 생산성 및 설비 효율성을 높일 수 있는 규칙들^[13-15]로, 기존 연구들을 Table 1과 같이 조사하여 발췌하였다.

즉, 설비가 가용 가능한 시점에 해당 설비에서 진행 가능한 Lot들의 우선순위를 계산한 다음 가장 높은 우선순위 Lot을 선택하여 공정에 투입하는 방식이다. 만약, 우선순위가 동일(tie)한 경우, 그 다음 우선순위 규칙을 차례로 적용하는 Tie-breaking방식을 적용한다. 이러한 Tie-breaking 방식의 디스패칭 Rule Set 적용은 E사의 S소프트웨어(What-If simulator)에 기능을 추가하여 개발/적용하였다. 다음은 디스패칭 Rule Set을 구성하는 프로시저를 Step별로 정리한 내용이다.

Rule Set 구성 Procedure

Step 1. N개의 Dispatching Rule들을 고려 할 경우 N개의 Single Rule(ex. EDD-FIFO-Random)들을 모두 테스트 해본다.

Step 2. 흐름시간(flowtime), 납기준수(on time delivery), 생산량, 가동률 등의 결과를 분석하여 각 KPI의 상위 3개의 Dispatching Rule들을 선택(KPI 별 상위 3개

Table 1 Applied dispatching rule list

Rule	Full name	Explanation
SPT	Shortest Processing Time	Prioritize tasks with short process times
EDD	Earliest Due Date	Priority is given to tasks with early delivery dates.
FIFO	First In First Out	Priority order of arrival at work site
LWKR	Least Work Remaining	Priority is given to orders with the smallest total remaining processing time
MTWK	Most Total Work	Orders with a larger total processing time take priority
MST	Minimum Slack Time	Orders with a small margin (delivery date - current time - remaining processing time) take priority
SLACK_TWKR	Slack time / Total Work Remaining	The one with the smallest (free time/remaining work time) takes priority
LTWK	Least Total Work	Select the task with the shortest overall processing time for the order
CR	Critical Ratio	Handle the least urgent items first

Rule들 중 중복 가능성 존재)한다.

Step 3. Step 2에서 선택 된 Rule들의 Set을 R이라고 지정하면, Set의 개수=|R|.

Step 4. |R|개의 Single Rules, (|R|×|R-1|)개의 Double Rules, (|R|×|R-1|×|R-2|)개의 Triple Rules들을 Test 한다.

Step 5. Step 4의 결과를 보고 KPI 별 상위 5개의 Rule들을 선택한다.

본 연구에서는 총 3가지 Type(single/double/triple)의 Rule Set을 고려하였다. Single Rule Set의 경우 디스패칭 Rule 한개를 사용하고 Tie가 발생할 경우 FIFO로 Tie Breaking을 하며 그 다음에도 Tie가 발생할 경우 Random하게 Lot (작업물)을 선택한다. Double Rule Set의 경우 2개의 디스패칭 Rule들을 선택하고 우선순위에 따라 선택된 디스패칭 Rule들로 Tie Breaking, Tie가 발생할 경우 FIFO로 Tie Breaking을 하며 그 다음에도 Tie가 발생할 경우 Random하게 Lot을 선택한다. 같은 방식으로 Triple Rule Set의 경우 3개의 디스패칭 Rule들을 선택하고 우선순위에 따라 선택된 디스패칭 Rule들로 Tie Breaking, Tie가 발생할 경우 FIFO로 Tie Breaking을 하며 그 다음에도 Tie가 발생할 경우 Random하게 Lot을 선택한다.

Table 2는 Triple Rule Set을 정의한 예시이다. Table 3의 우선순

Table 2 Triple rule set example

Rule	Priority (adjustable)
SPT	2
EDD	1
MST	-
LWKR	-
LTWK	3

Table 3 Simulation model reflected P4R information

Class	Highlights
Product	Product, material, BOM structure
Process	Process, transfer, input, lot size, item replacement
Plan	Operation plan, maintenance plan (PM, Preventive maintenance), procurement plan, shipment plan, worker work plan, warehouse management, user settings
Plant	WIP status by facility/buffer, breakdown status by facility, inventory status by warehouse, transfer status, transfer relationship
Resource	Common characteristics of facilities, buffers, warehouses, MHV (Material Handling Vehicle, AGV, OHT, etc.), MHC (Material Handling Conveyor), and MHR (Material Handling Robot)
Plant	Facility/warehouse/buffer/transfer device location, logistics relationships and characteristics
Resource	Common characteristics of facilities, buffers, warehouses, MHV, MHC, MHR
Sch_Result	Production planning and scheduling, Gantt chart
Sim_Result	Production volume by product, UPH (Unit Per Hour) by facility, operation rate by facility, number of inventory by warehouse, setup time by product/facility (including item replacement), Tardiness by order

위 항목에서 디스패칭 Rule의 우선순위를 의사결정변수로 지정한다. 해당 예시에서는 EDD → SPT → LTWK 순서로 작업물에 우선순위를 할당 및 동물이 발생할 경우 Tie Breaking 한다. 3단계 적용해도 Tie가 발생할 경우 FIFO → Random Selection 순서로 Tie Breaking을 하여 공정 진행 할 Lot을 최종 선택하게 된다.

기존의 디스패칭 Rule을 이용한 일정계획 방법론과의 차별점은 기존의 방식은 일반적으로 각각의 디스패칭 Rule을 적용하여 테스트 후 가장 좋은 디스패칭 Rule을 선택하는 방식이었다면, 본 연구에서는 다품종 소량생산이라는 제조라인의 특성을 고려하여 디스패칭 Rule을 적용하더라도 tie가 발생하는 경우를 제거 및 해결하기 위해 순차적으로 디스패칭 Rule들을 적용, 즉, 디스패칭 Rule들의 조합을 일정계획 Solution으로 선택했다는 점이다.

Table 4 Part of MES ordering information for simulation test

Order ID	Item ID	Item number	Lot ID	Due-date	Order quantity
ORD001	6	123123	60001	2023-11-24 17:00	20
ORD002	8	127637	80001	2023-11-22 17:00	15
ORD003	10	162662	100001	2023-11-23 17:00	25
ORD004	9	176278	90001	2023-11-23 17:00	18
ORD005	7	182821	70001	2023-11-22 17:00	12
ORD006	1	213123	10008	2023-11-24 17:00	10
ORD007	4	219922	40001	2023-11-24 17:00	15
ORD008	5	222832	50001	2023-11-22 17:00	15
ORD009	2	237821	20001	2023-11-24 17:00	15
ORD010	3	282762	30001	2023-11-23 17:00	15
ORD011	13	300188	130001	2023-11-22 17:00	23
ORD012	15	332132	150001	2023-11-24 17:00	23
ORD013	12	381882	120001	2023-11-23 17:00	23
ORD014	14	382881	140001	2023-11-23 17:00	23

Table 5 KPIs for schedule planning performance evaluation

Evaluation items	Objective function
Lead time	Mean flowtime: Sum of (completion time - input time) of all tasks / number of lots
On time delivery rate	(Number of orders produced beyond the order delivery date / Total order quantity) × 100%
Equipment utilization	(Actual equipment operation time / Available work time × 100) / Total Number of equipment × 100%
Productivity	Number of lots processed per hour

3. Simulation Test 결과

현재, I사의 제조라인에서는 단순히 FIFO 디스패칭 Rule에 의해 일정계획을 수립하고 있다. 따라서, 본 연구의 Simulation Test 결과에서는 현재 적용하고 있는 FIFO 디스패칭 Rule을 적용한 일정계획 대비 본 연구(Section 2.3)에서 제시한 일정계획 방법론을 적용하였을 때 KPI의 향상율을 비교하여 보여준다.

제시한 일정계획 방법론의 성능평가를 위한 Digital Twin What-If Simulator는 제조라인의 제품(product), 공정(process), 생산계획(plan), 공장(plant), 자원(resource) 등 P4R 스냅샷 정보를 반영하여 앞서 제시한 Fig. 4와 같이 구축하였다. Table 3은 What-If Simulator에 반영한 P4R 정보를 정리하여 보여준다.

본 시뮬레이션 Test에서 사용한 사례기업의 데이터는 MES 데이터베이스로부터 추출한 2023년 11월의 주문(제품종류, 주문수량, 납기) 정보를 바탕으로 수행되었다. Table 4는 해당 데이터의 일부분을 예시로 보여준다. Order ID는 주문, Item ID는 제품의 종류, Item Number는 제품종류의 Code, Lot ID는 주문의 각 작

Table 6 Improvement rate by KPI of scheduling methodologies

No.	Rule set	KPI improvement rate (%)			
		Lead time	On time delivery rate	Productivity	Equipment utilization
1	SPT	31.9%	29.4%	29.2%	5.2%
2	EDD	22.7%	32.7%	-15.7%	7.3%
3	LWKR	39.9%	33.4%	4.8%	-1.2%
4	MTWK	-6.1%	-18.8%	-192%	-3.5%
5	MST	3.8%	20.8%	5.9%	2.1%
6	Slack/TWKR	-7.0%	8.3%	-37.2%	2.8%
7	LTWK	39.4%	33.4%	3.2%	-1.3%
8	LPT	-16.5%	-7.2%	-105%	-11.5%
9	CR	-7.0%	8.3%	-37.2%	2.8%
10	SPT+EDD	17.7%	32.4%	53.5%	7.3%
11	SPT+LWKR	39.9%	33.3%	4.8%	-1.2%
12	SPT+MST	3.8%	20.8%	0.0%	2.1%
13	SPT+LTWK	39.4%	33.4%	3.2%	-1.3%
14	EDD+SPT	24.6%	36.5%	-11.5%	8.9%
15	EDD+LWKR	27.1%	36.6%	3.4%	8.4%
16	EDD+LTWK	26.3%	36.5%	4.0%	8.1%
17	LWKR+SPT	39.9%	34.1%	52.8%	-1.7%
18	LWKR+EDD	39.4%	33.4%	3.2%	8.4%
19	LTWK+EDD	36.6%	34.0%	30.2%	-0.9%
20	SPT+EDD+LWKR	27.9%	36.8%	4.0%	8.4%
21	SPT+EDD+LTWK	27.3%	36.9%	4.0%	8.4%

업물들을 묶음으로 Code화 시킨 것이며 Due-date은 주문의 납기, Order Quantity는 각 주문에 속한 제품수를 의미한다.

제시한 Rule Set들의 시뮬레이션 성능평가 결과 도출을 위해 본 Test에서는 복수의 KPI(Lead Time, 준수율, 설비가동률, 생산량)들을 고려하였고 그 각 KPI의 설명 및 산식은 Table 5와 같다.

본 연구에서는 Table 1의 9개의 디스패칭 Rule들과 섹션 2.3의 Rule Set 구성 Procedure를 바탕으로 일정계획 방법론들을 구성한 뒤 Test하였지만, Rule Set 조합의 수가 너무 많아 예비 Test를 통해 좋은 성과의 KPI를 보여주는 Rule Set들을(21개: Table 6 참고) 대상으로 시뮬레이션 Test 결과를 기술하기로 하였다. 즉, Single Rule, Double Rule, Triple Rule들의 모든 조합을 발생시켜 일정계획 규칙을 수립한 뒤 우수한 Rule Set들만 선택하였다.

한편, 현재 I사의 제조라인에서는 앞서 설명한 바와 같이 FIFO 디스패칭 Rule을 사용하여 일정계획을 수립하고 있어, 앞서 설명한 주요 KPI를 기준으로 FIFO 대비 본 연구에서 제시한 Tie Breaking Rule Set으로 일정계획을 수립할 경우 KPI들의 개선 정도를(%) Table 6과 같이 기술하였다.

Table 7 Best rule sets for KPIs

Order	Leadtime	On time delivery rate	Productivity	Equipment utilization
1	LWKR	SPT+EDD+LTWK	SPT+EDD	EDD+SPT
2	SPT+LWKR	SPT+EDD+LWKR	LWKR+SPT	EDD+LWKR
3	LWKR+SPT	EDD+LWKR	LTWK+EDD	LWKR+EDD
4	LTWK	EDD+SPT	SPT	SPT+EDD+LWKR
5	LWKR+EDD	EDD+LTWK	MST	SPT+EDD+LTWK

Test 결과는 Table 6과 같이 KPI별 효율적인 퍼포먼스를 보여주는 Tie Breaking Rule Set들은 서로 상이함을 확인 할 수 있었다. 해당 지표는 현재 I사의 제조라인에서 일정계획 수립 시 적용되고 있는 FIFO대비 KPI의 개선율을 나타내는 숫자이다. 즉, 개선율이 양수인 경우 FIFO 대비 해당 Tie Breaking Rule Set이 향상된 KPI를 보여주는 것이고 음수인 경우 FIFO 대비 오히려 하락된 KPI를 의미한다.

즉, 기존 일정계획 수립 방법인 FIFO로 일정계획을 수립하였을 때 대비 각 KPI 별 향상정도를 표시한 숫자이며 각 KPI 별로 뛰어난 개선율을 보이는 Rule Set들을 표시한 것이다. Lead Time은 약 40%, 납기준수율은 약 37%, 생산성은 약 53% 그리고 장비 가동률은 약 9%까지 향상 가능성을 확인 할 수 있다.

본 Test결과를 KPI별로 우수한 퍼포먼스를 보여주는 상위 5(Table 6에서 음영으로 표시)개의 Rule Set들을 정리하여 Table 7과 같이 정리하였다. 직관적으로 판단해 보면 모든 KPI에서 상대적으로 우수한 결과를 보여주는 SPT+EDD 와 LWKR+EDD Rule Set이 효율적인 일정계획을 수립한다고 판단된다. 하지만, 제조라인의 생산방식(Make-to-Stock/Make-to-Order 등) 및 제조 환경에 따라 중요시 하는 KPI를 선정 혹은 가중치를 두어 적합한 Rule Set을 선택하는 것이 바람직 할 것이라고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 FOM 모델을 벤치마킹하여 제조공장의 KPI 개선에 대해 다루었다. 개선 프로세스에는 작업 현장에 적합한 일정 계획 방법론을 설계하고, 공장내 동일한 장비, 주문, 공정 시간 등의 정보를 반영한 시뮬레이션 모델을 개발 및 Test 수행 후 해당 제조라인의 KPI의 개선율을 높일 수 있는 일정계획 방법론을 선택하는 과정이 포함된다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해 국내 PCB 제조업체의 공장을 대상으로 MES - What If Simulator 개발 - 적용 - KPI - Rule

Tuning - APS 간의 정보 교환 및 성능 평가 프로세스의 아키텍처(프레임워크)를 설계하였다. 그 결과, 여러 일정계획 방법론들이 현재 프로세스에서 사용하는 일정계획 방법론(FIFO 디스패칭 Rule)보다 향상된 KPI(리드타임, 납기준수, 생산성, 설비 가동률)를 보이는 것으로 나타났다.

제조라인의 KPI를 고려한 적합한 일정계획 방법론 적용은 제조기업의 경쟁역량을 높일 수 있는 중요한 요소이다. 고객사를 대상으로 공급사는 고객의 요구 사항에 맞는 품질의 제품을 적시에 제조하고 공급할 수 있도록 제조라인 및 시스템을 구축하여 효율적인 관리를 수행해야 한다. 이러한 의미에서 실제 제조라인을 대상으로 수행되었던 본 연구는 의미가 있다고 판단된다.

한편, 사례기업(I사)과 같은 제조라인에 반영할 적합한 일정계획 수립을 위해서는 Twin Digital What-If Simulator의 예측 정확도를 높여야 하며 이를 위해 Simulation model에 반영할 설비, 작업자, 자재 보유 현황, 공정시간, 작업교체 시간 등과 같은 다양한 기준정보들의 전산화가 필요하다. 즉, 생산/공급/제조라인의 현황을 분석/전산화 하여 다양한 생산경영 방법론을 검증 할 수 있는 시스템을 구축하여야 한다.

본 연구의 연장선으로 차년도 연구계획은 현재보다 더 정밀한 기준정보 시스템의 구축과 효율적이고 주문/자재/설비상태 등의 변화에 빠르게 대처할 수 있는 일정계획 수립을 위해 강화학습(reinforcement learning) 기반의 일정계획 수립 방법론을 개발하여 공정 별 Tie Breaking Rule들의 우선순위를 결정할 수 있는 Solution의 연구/개발을 수행 할 계획에 있다.

후 기

본 연구는 2024학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음. This work was supported by Kyonggi University Research Grant 2024.

References

- [1] Kim, S. Y., 2018, A Case Study of the Introduction of Smart Factory Operation Management(FOM) in the Fourth Industrial Revolution Era, Korean Association of Computers and Accounting, 16:1 43-62.
- [2] Kim, S. Y., 2015, Study of Digital Factory FOM Solution on Software-based : Applied Case to Heat-Treatment Company, Korean Institute of Industrial Engineers Spring Joint Conf., 2855-2863.
- [3] Ko, D. B., Park, J. M., 2018, A Study on the Visualization of Facility Data Using Manufacturing Data Collection Standard, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, 18:3 159-166, <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.3.159>.
- [4] Park, T. K., Im, S. J., Kang, Y. S., Noh, S. D., 2019, Service-oriented Platform for Smart Operation of Dyeing and Finishing Industry, Int. J. Comput. Integr. Manuf., 32:3 307-326, <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1572225>.
- [5] Suri, K., Cadavid, J., Alferrez, M., Dhouib, S., Tucci-Piergiannil, S., 2017, Modeling Business Motivation and Underlying Processes for Rami 4.0-aligned cyber-physical Production Systems, 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1-6, <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247702>.
- [6] Kim, J. H., Kim, S. Y., 2021, Productivity Analysis Method based on Manufacturing Big-data using the FOM System in the FOMs Package, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 30:4 259-268, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.259>.
- [7] Jeong, B.-J., Han, J.-H., Lee, J.-Y., 2021, Metaheuristics for a Flow Shop Scheduling Problem with Urgent Jobs and Limited Waiting Times, Algorithms, 14:11 323, <https://doi.org/10.3390/a14110323>.
- [8] Lee, J.-Y., Jeong, B.-J., 2020, Heuristic Algorithms for a Two-Machine Flowshop Scheduling Problem with Urgent Jobs and Sequence-Dependent Setup Times, Korean Management Science Review, 37:1 47-60, <https://doi.org/10.7737/KMSR.2020.37.1.047>.
- [9] Jeong, B.-J., Kim, Y.-D., Shim, S.-O., 2020, Algorithms for a two-machine Flow Shop problem with jobs of two classes, International Transactions in Operational Research, 27:6 3123-3143, <https://doi.org/10.1111/itor.12530>.
- [10] Beykal, B., Avraamidou, S., Pistikopoulos, E. N., 2022, Data-driven Optimization of Mixed-integer Bi-level Multi-follower Integrated Planning and Scheduling Problems Under Demand Uncertainty, Comput. Chem. Eng., 156 107551, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107551>.
- [11] Shiue, Y.-R., Lee, K.-C., Su, C.-T., 2020, A Reinforcement Learning Approach to Dynamic Scheduling in a Product-Mix Flexibility Environment, IEEE Access, 8 106542-106553, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000781>.
- [12] Jeong, G. -C., Park, M.-W., 2017, A Progress Management based Daily Production Planning Method for Improving the Production Linearity of Semiconductor Fabs, Journal of the

Korean Society of Industrial Engineers, 43:4 264-275,
<https://doi.org/10.7232/JKIE.2017.43.4.264>.

- [13] Lee, J.-Y., Kim, Y.-D., Lee, T.-E., 2018, Minimizing Total Tardiness on Parallel Machines Subject to Flexible Maintenance, *Int. J. Ind. Eng.-Theory Appl. Pract.*, 25:4 472-489, <https://doi.org/10.23055/ijietap.2018.25.4.3130>.
- [14] Lee, J. -Y., Kim, Y. -D., 2017, Minimizing Total Tardiness in a Two-machine Flow Shop Scheduling Problem with Availability Constraint on the First Machine, *Comput. ind. Eng.*, 114 22-30, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.004>.
- [15] Lee, J.-Y., Kim, Y.-D., 2015, A Branch and Bound Algorithm to Minimize Total Tardiness of Jobs in a Two Identical-parallel-machine Scheduling Problem with a Machine Availability Constraint, *J. Oper. Res. Soc.*, 66:9 1542-1554, <https://doi.org/10.1057/jors.2014.122>.



Seong-Woo Choi

Professor in the Department of Business Administration, Kyonggi University.

His research interest is Production Management.

He has experience in Charge of Production Management Automation System Development at an Wafer FAB Line of Samsung Electronics' Semiconductor Division.

E-mail: swchoi@kyonggi.ac.kr