

Simulation Modeling for Production Scheduling under Make-To-Order Production Environment : Focusing on the Flat Glass Production Environment

Yong-Hee Choi* · Seung-June Hwang**†

*Department of Management Consulting, Hanyang University

**Department of Business Administration, Hanyang University ERICA

주문생산 방식의 생산계획 수립을 위한 시뮬레이션 모델 설계 : 판유리 제조 공정을 중심으로

최용희* · 황승준**†

*한양대학교 일반대학원 경영컨설팅학과

**한양대학교 경상대학 경영학부

The manufacturing companies under Make-To-Order (MTO) production environment face highly variable requirements of the customers. It makes them difficult to establish preemptive production strategy through inventory management and demand forecasting. Therefore, the ability to establish an optimal production schedule that incorporates the various requirements of the customers is emphasized as the key success factor.

In this study, we suggest a process of designing the simulation model for establishing production schedule and apply this model to the case of a flat glass processing company. The flat glass manufacturing industry is under MTO production environment. Academic research of flat glass industry is focused on minimizing the waste in the cutting process. In addition, in the practical view, the flat glass manufacturing companies tend to establish the production schedule based on the intuition of production manager and it results in failure of meeting the due date. Based on these findings, the case study aims to present the process of drawing up a production schedule through simulation modeling. The actual data of Korean flat glass processing company were used to make a monthly production schedule. To do this, five scenarios based on dispatching rules are considered and each scenario is evaluated by three key performance indicators for delivery compliance. We used B2MML (Business To Manufacturing Markup Language) schema for integrating manufacturing systems and simulations are carried out by using SIMIO simulation software. The results provide the basis for determining a suitable production schedule from the production manager's perspective.

Keywords : Make-To-Order(MTO), Production Schedule, Simulation, Flat Glass

1. 서론

주문생산(Make-To-Order : 이하 MTO) 방식의 제조 환경에서는 계획생산(Make-To-Stock : 이하 MTS) 방식과 비교했을 때 수요예측 및 재고보유로 고객 주문에 선제적으로 대응하는 것이 상대적으로 어렵다. 따라서 MTO 방식에서는 주문 수령 후의 즉각적인 생산계획 수립이 핵심 성공요인으로 꼽힌다. MTO 방식은 품목의 이동경로(Routings)가 매우 복잡하고 소량의 주문이 산발적으로 들어와 이에 대응적으로 생산계획을 도출하는 것이 매우 어려운 경향이 있다. 이처럼 공정 내·외부적으로 생산계획에 영향을 미치는 요인들의 변동성이 클 경우, 시물레이션 모델 설계 방법은 그 변화를 즉각적으로 반영할 수 있다는 점에서 효과적이다[5].

판유리 공정은 MTO 방식을 채택하고 있는 공정이다. 판유리는 단일 제품마다의 고객사 세부 요청이 매우 상이하기 때문에 이를 반영한 생산계획 수립 능력이 필수적이다. 하지만 국내 판유리 가공기업은 생산관리자의 직관에 의존하여 작업 우선순위를 결정하고 있어 생산계획 수립 과정 및 고객사 납기 충족에 문제를 안고 있다. 또한, 판유리 산업과 관련한 기존 연구는 원판을 일정 크기로 자르는 재단 공정에서의 낭비 최소화 문제를 다루는 것에 집중되어 있으며 생산계획 관련 연구는 전무한 수준이다.

이에, 판유리 생산계획 결정을 둘러싼 학술적·실무적 한계를 인지하고 시물레이션 모델링을 활용하여 중소기업이 더욱 체계적인 방법으로 생산계획을 수립할 수 있는 방안을 제시하기 위해 본 연구를 진행했다.

MTO 방식의 제조 환경에서, 생산 시스템 모델링 기준 B2MML을 활용한 시물레이션 모델 설계 프로세스를 기초분석, 시물레이션 모델링, 결과분석 등 3단계로 나누어 제시하였다. 국내 판유리 가공기업을 사례로 적용하였으며 작업 우선순위규칙(Dispatching Rule)을 기준으로 시나리오를 도출하였다. 또한, 납기준수 관련 핵심 성과지표 3가지를 통해 각 시나리오를 평가 및 분석하였다. 본 연구결과는 시물레이션을 활용한 생산계획 수립 방법을 고안해야 할 MTO 방식의 제조 기업에 도움을 줄 것이다.

2. 선행연구

2.1 판유리 산업의 현황 및 가공 공정

판유리(Flat Glass)는 판상으로 성형된 유리 제품으로, 가공되어 건물 내·외부와 자동차유리 등으로 쓰이고 있다. 판유리 산업에 관한 기존 연구를 <Table 1>에 정리하였다. 기존 연구에서는 주로 판유리 원판을 고객사의 요구에 맞게 일정 크기로 자르는 재단 공정에서의 원판

낭비 최소화 문제(Cutting Stock Problem : 이하 CSP)를 다루고 있다[1, 3, 12, 14, 15]. CSP는 2차원 평면을 규칙적이거나 비규칙적인 형태의 모양으로 나누는 문제로 나누어 볼 수 있다. CSP 관련 해법 도출에는 수리접 접근법, 휴리스틱 알고리즘 등이 활용될 수 있으며 평면 형태를 가진 원재료를 가공하는 생산 공정이라면 다양한 분야에 걸쳐 광범위하게 적용 가능하다.

<Table 1> Literature Review on the Flat Glass Industry

Research Objective	Methods	Reference
Minimize the Flat Glass Scrap	Heuristic Algorithm	[1, 12, 14, 15]
	Mathematical Modeling & Heuristic Algorithm	[3]
Develop the Optimal Replacement Period of Manufacturing Line	Mathematical Modeling	[20]
Develop the Rack Design for Flat Glass	Mathematical Modeling	[6]

판유리 원판은 정해진 구성에 맞춰 원료를 배합하여 ‘원료 투입(Batch Plant)-용해(Furnace)-성형(Tin Bath)-서냉(Annealing Lehr)’ 등의 프로세스를 거쳐 얻을 수 있다. 원판 단면의 면적에 관한 단위로는 주로 1829×3048, 2134×3048, 2438×3048(세로×가로, 단위 : mm) 등이 쓰인다.

판유리 원판 제조 후 원판을 가공 전문 업체로 운반했다고 가정할 경우, 원판 가공은 <Table 2>와 같이 ‘재단(Cutting)-가공(Decorated)-강화(Tempered)-복층(Insulated)/접합(Laminated)’ 등의 공정을 거친다.

<Table 2> Description for Flat Glass Processing Process

Flat Glass Processing Process	Description
Cutting	Cutting the Flat Sheet Glass into a Useable Glass Product
Decorated	Cutting or Patterning the Edges of Glass to Make Shape
Tempered	Making the Glass More Soild through Reinforcement Facilities
Insulated	Sealing the Edges of Two Sheets of Glass with Putting an Air Space between Them
Laminated	Attaching Two Sheets of Glass Together

2.2 시물레이션을 이용한 생산계획 수립

제조업의 생산전략은 고객 주문에 대한 이행 방식을 기준으로 MTS와 MTO로 나누어 볼 수 있다. MTS는 정확한 수요 예측 및 적정한 수준의 제품 재고 유지가 성공의 핵심 요인이다[11, 16]. 반면에, MTO는 수요예측이나 재고보유

<Table 3> Literature on the Production Scheduling with Simulation Modeling

Production Strategy	The Object of Simulation Modeling	Reference
MTO	Manufacturing System for Shipbuilding Plant	[8]
	Operation of Machines and Automated Guided Vehicle(AGV)	[10]
MTS	Semiconductor Back-end Assembly	[11]
	Medical Supplies Manufacturing Plant	[16]

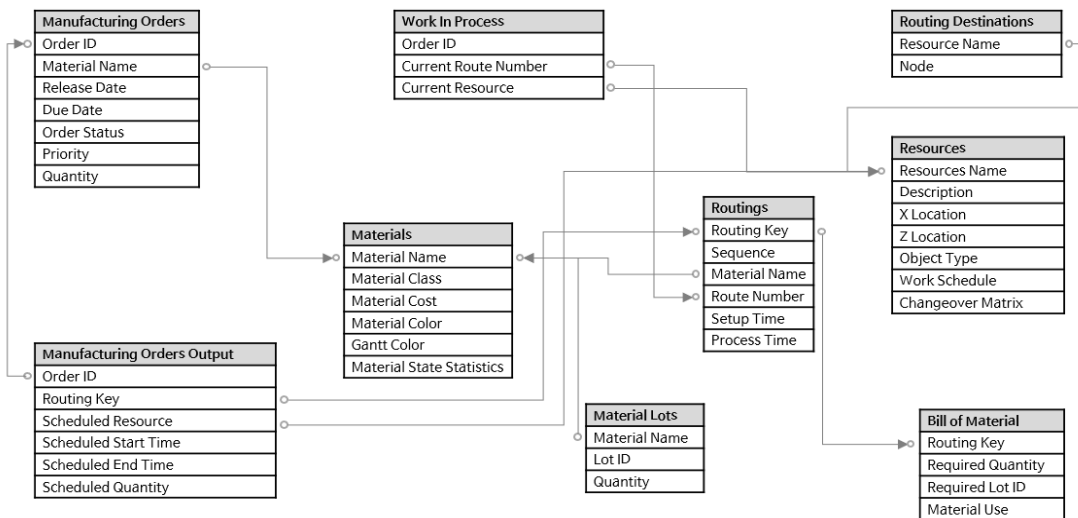
가 어려워 고객으로부터 주문 수령 후 이를 통합한 생산계획 도출이 핵심적이다[8, 10]. 즉, 납기관리를 위한 체계적인 작업 일정계획 수립은 MTO 방식을 따르는 기업이 갖춰야 할 핵심 역량이다. MTO 방식의 스케줄링 문제는 공정설계(Layout) 기준, 혼합 흐름 공정(Hybrid Flow Shop) 또는 개별 공정(Job Shop)으로 정의하여 접근 가능하다. 이에 관한 생산계획 수립 시에는 다양한 문제에 직면하게 된다. 첫째, 고객의 주문시점 변동성이 크며 이는 작업 우선순위에 대한 잦은 변경을 야기한다. 둘째, 주문에 대한 필요원자재, 필요 작업 및 작업자를 예측하기 어렵다[13]. 이러한 문제들로 MTO 방식의 많은 제조 기업들에게 컴퓨터 모델로 제조 환경을 모방함으로써 생산 계획 관련 의사결정을 지원하는 시뮬레이션 기반 스케줄링 시스템이 효과적으로 쓰일 수 있다[8, 10].

시뮬레이션을 이용하여 생산계획을 수립한 기존 연구들을 <Table 3>에 정리했다. 이를 살펴보면, 일관화된 방법론에 따르기보다는 조선, 반도체, 자동차 등 각 산업에 특화된 연구가 진행된 것을 확인할 수 있다[9]. 그 이유는 각 산업별 특징을 보다 정확하게 시뮬레이션 환경으로 구현하기 위한 목적 때문인 것으로 판단된다.

2.3 생산 시스템 모델링 기준

시뮬레이션 모델 설계의 3단계 중 1단계인 기초분석 단계에서 수집한 공정 관련 데이터를 시뮬레이션 소프트웨어에 적용하는 방식은 매우 다양하다. 이와 관련하여 입력 방식에 대한 통일이 필요하며 표준화된 생산 시스템 모델링 기준을 활용하는 것이 효과적이다. 대표적 생산 시스템 모델링 기준인 Business To Manufacturing Markup Language (이하 B2MML)는 전사적 자원관리(Enterprise Resource Planning : ERP), 제조실행시스템(Manufacturing Execution System : MES) 등의 제조 시스템에서 활용할 수 있도록 데이터를 정의하는 국제 표준 방식 중 하나다. 이는 확장성 마크업 언어(eXtensible Markup Language : XML)를 통해 일반적 제품 속성을 정의하며 미국규격협회(ANSI) 및 국제자동제어협회(이하 ISA-95) 표준에 맞는 데이터 모델을 구현한다. B2MML은 SIMIO 시뮬레이션 소프트웨어와의 호환성이 높다. <Figure 1>은 B2MML 기준에 따라 공정 관련 데이터 정의 및 분류하는 방식[19]을 판유리 산업에 적합하게 변형한 것을 나타낸다.

B2MML과 관련한 기존 연구는 주로 ISA-95에 따른 기업정보시스템 모델링 방법을 밝히고 이를 실제 기업에 적용하여 효율성을 분석하는 방향으로 진행되어 왔다. Pipero and Manjunath[18]은 MES, ERP 등 기업정보시스템 사용자들이 B2MML을 통일된 방식으로 활용할 경우 프로젝트 실행 기간을 단축할 수 있음을 밝혔으며 Lee and Choe [7]는 B2MML을 비롯한 ISA-95 기반 데이터 모델링 방식이 MES를 구축하는 데 미치는 영향을 분석하였다. He et al. [4]은 사례분석을 통해 B2MML 기반 ISA-95 데이터 모델링 방법을 실제 공장에 맞춤화하여 적용하는 과정을 제시하였다.



<Figure 1> An Example of Production System Modeling(B2MML Standard Architecture)

3. 시뮬레이션 모델 설계

3.1 단계별 분석 방법 및 도구

시뮬레이션 모델 설계를 통한 생산계획 도출 과정은 <Table 4>와 같이 기초분석, 시뮬레이션 모델링, 결과분석 등 3단계의 흐름으로 볼 수 있다. 1단계 기초분석 단계에서는 연구 대상 기업의 공정 프로세스 및 기본적인 특성에 관하여 분석한다. 2단계 시뮬레이션 모델링 단계는 생산 시스템 모델링 기준에 기반하여 기초분석 단계에서 얻은 데이터를 시뮬레이션 환경에 적용하는 단계이다. 또한, 분석 목적에 따라 시나리오와 성과지표들을 설정한다. 3단계 결과분석 단계에서는 핵심 성과지표에 기반하여 각 시나리오의 결과값을 평가 및 비교한다.

기초분석 및 시뮬레이션 모델링을 위한 데이터 전처리 과정에서는 Microsoft Excel이 유용하게 쓰일 수 있으며 시뮬레이션 환경 구현 및 결과분석에서는 SIMIO Simulation Software를 활용할 수 있다. SIMIO는 객체지향형 확률기반 시뮬레이션 소프트웨어이다. 이는 객체 재사용을 극대화할 수 있도록 설계되었다. 따라서 확장성이 탁월하여 제조, 물류, 군사, 의료 등 다양한 분야에 걸쳐 적용되고 있다[5].

<Table 4> Description of Methods and Tools in Simulation Modeling Stages

Classification	Details of Analysis	Methods	Tools
Step 1. Basic Analysis	• Manufacturing Process Analysis	Descriptive Statistics Analysis	Microsoft Excel
Step 2. Simulation Modeling	• Establish Simulation Assumptions • Enter the Manufacturing Process Data • Setting the Scenarios • Setting the KPIs	Descriptive Statistics Analysis	Arena Simulation Software, SIMIO Simulation Software
Step 3. Results Analysis	• Evaluation for each Scenario by KPI	Simulation Results Analysis	

3.2 모델 설계 방법

본 연구는 생산 시스템 모델링 기준 B2MML을 따랐을 경우를 기준으로 모델 설계 방법을 제시하였다.

3.2.1 기본 가정 수립

기본적인 가정을 수립하는 것은 시뮬레이션 모델 설계 시 모델의 효력, 투입되는 시간 및 비용을 좌우하는 중요 결정 사안이다. 지나치게 현실성이 떨어지는 가정 속에서

는 모델 상의 값과 실제값과의 편차가 높아지기 때문에 시뮬레이션 자체의 효력을 잃을 수 있다. 반대로, 현실 상황과 거의 동일한 시뮬레이션 모델을 구현하고자 한다면, 막대한 시간 및 비용이 요구되는 문제가 발생한다.

모델 설계 시 적절한 기본 가정을 수립하기 위해 두 가지 측면에서 기존 연구를 참고할 수 있다. 첫째, 일반적인 차원에서 공정 특성을 반영한 작업 스케줄링 문제를 다룬 연구이다. 기존 연구는 흐름 공정(Flow Shop) 또는 개별 공정(Job Shop)의 성격을 띠는 특정 공장을 대상으로 작업 배정에 관한 가정 수립 과정 및 근거를 밝힌 바 있다. 둘째, 자동차, 전자, 조선 등 특정 산업 및 공정이 지니는 고유한 특징을 분석한 연구를 참고할 수 있다.

3.2.2 공정 데이터 입력

시뮬레이션 모델 설계 과정에서는 설비, 품목의 이동 경로, 원재료 및 완제품, 주문량, 작업자 등과 관련된 데이터를 필수적으로 고려해야 한다.

첫째, 설비(Machines) 및 재공품 적재 공간의 물리적 위치, 처리시간 및 셋업시간 등을 결정해야 한다. 먼저, 물리적 위치는 2차원 평면 상 각각의 중심점 거리를 기준으로 산정할 수 있다. SIMIO 등 시뮬레이션 소프트웨어는 일반적으로 센티미터(cm), 미터(m) 등의 거리 단위를 제공한다. 다음, 설비의 처리시간 및 셋업시간과 관련하여 각각의 입력 요소에 대한 확률분포를 결정해야 한다. 확률분포 추정시 정규분포, 삼각분포, 와이블분포, 베타분포 등이 주로 쓰인다[5].

둘째, 품목의 이동경로(Routings)를 입력해야 한다. 이는 완제품이 되기 전, 원재료 및 재공품이 거치는 중간 단계의 작업흐름을 뜻한다. 활동 다이어그램(이하 Activity Diagram)을 활용한다면, 품목의 이동경로에 관하여 쉽게 이해할 수 있다. Activity Diagram은 원료 투입 지점을 시작점, 작업 완료 지점을 끝점으로 하여 그 사이의 작업흐름을 단계별로 도식화하여 표현하는 방법이다. Activity Diagram에 대한 분석을 통해 모델링하고자 하는 공정 상 품목 이동경로의 총 경우의 수를 얻을 수 있다.

셋째, 원재료(Materials) 및 완제품(Finished Goods)에 관하여 고려해야 한다. 완제품이 생산되는 것을 다양한 원재료 및 가공 작업의 총합으로 볼 수 있다. 비용 측면에서 보면, 필요 원재료들의 가격과 세부 가공 작업에 필요한 작업자들의 시간을 비용으로 산출한 값 등을 모두 합함으로써 해당 완제품 생산에 관한 총 비용을 산출할 수 있다. 또한, 시간적인 측면에서 완제품 생산까지 필요한 모든 공정 단계의 처리시간과 셋업시간을 합함으로써 완제품 생산을 위한 총 시간을 얻을 수 있다.

넷째, 주문량(Manufacturing Orders)은 시뮬레이션 목표

기간에 따라 결정될 수 있다. 시물레이션 목표 기간은 언고자 하는 생산계획의 총 기간을 의미하며 일반적으로 분기, 월간, 주간, 일간 등이 있다. 목표 기간을 결정 후 세부 품목별 주문량을 구체적으로 입력할수록 시물레이션의 효력을 높일 수 있다.

마지막으로, 작업자(Workers)의 근무시간 및 공정 내 작업자 수를 고려해야 한다. 시물레이션의 목표 기간에 따라 작업자 근무 일수 및 날짜별 근무시간을 알 수 있다. 여기서 추가 근무 시간, 휴식시간 등을 모두 고려하여 입력할 필요가 있다. 만약 정해진 근무 시간 외에 추가 근무를 고려할 경우에는 해당 시간에 대해 근무 수당을 높게 설정해야 한다. 또, 각 공정 단계별, 설비별 작업자 수를 정확히 산정해야 한다.

3.2.3 시나리오 설정

시물레이션 기반 생산계획 시나리오를 구성하는 방식으로는 크게 세 가지를 고려할 수 있다. 첫째, 시나리오별로 설비 및 작업자의 처리능력에 차이를 두는 것이다. 이는 병목공정 혹은 비병목공정을 찾아 그에 대한 해결 방안을 모색하고자 할 경우 유용하다. 둘째, 작업 우선순위규칙(Dispatching Rule)에 차이를 두는 것이다. 즉, 시나리오별로 작업장의 대기행렬 상에 있는 작업의 우선순위 결정 규칙을 다르게 하는 것이다. 대표적인 예로, 선입선출법은 대기행렬에 가장 먼저 도착한 작업부터 처리하며 반대로 후입선출법은 가장 늦게 도착한 작업부터 처리한다. 셋째, 시나리오별로 기존 주문사항 변경, 추가 주문 등 상황적 요인에 차이를 두는 방법이 있다.

3.2.4 성과지표 설정

Beamon[2]에 따르면, 생산계획 관련 성과지표는 주문별 납기지연의 확률, 납기준수 주문량 등 납기에 영향을 미치는 요인들로 선정할 수 있다. 이에, 본 연구에서의 핵심 성과지표(Key Performance Indicators : 이하 KPI)로 납기준수시간 관련 지표 3가지를 설정하였다. KPI 정의에 앞서, 관련된 기본 변수의 정의에 대해 <Table 5>로 정리하였다. KPI는 <Table 6>를 통해 정의하였다.

납기준수율($\overline{N_{on}}$)은 전체 주문 건에 대하여 납기를 얼마나 잘 충족할 것인지 판단 가능하게 한다. 이는 총 주문 건에 대한 납기준수 주문 건의 비율로 얻을 수 있다. 이 값이 1에 가까울수록 납기 충족한 주문(On-Time)이 많음을 뜻한다. 반대로, 0에 가까우면 여러 주문 건에 대한 생산을 아예 하지 못했거나(Incomplete) 생산 후 출하지 못한 주문(Late)이 많다는 것을 의미한다.

주문별 정시 출하율의 평균(\overline{OT})은 납기 충족이 예상되는 주문들의 납기충족 확률을 평균화한 것이다. 이는 납기 충족 주문 건 정시출하가능률을 모두 더한 다음,

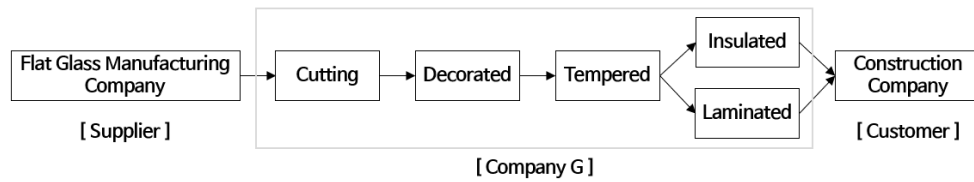
<Table 5> Definition of the Variables Related to KPIs

Variable	Definition	Description
C_i	Completion Time	• Completion Time of Order i
d_i	Due Date	• Due Date of Order i
L_i	Lateness	• Lateness of Order i • $L_i = C_i - d_i$
T_i	Tardiness	• Tardiness of Order i • $T_i = \max\{0, L_i\}$
N_T	The Number of Tardy Orders	• $N_T = \sum_{i=1}^N \delta(T_i)$ where $\delta(x) = 1$ if $x > 0$ and $\delta(x) = 0$ otherwise
N_{on}	The Number of Orders to be Shipped Out On Time	-
N_{IC}	The Number of Orders not to be Manufactured	-
N	The Number of Total Orders	• $N = N_T + N_{on} + N_{IC}$
$P1_i$	Probability for Order i (whose Simulation Result is "On-Time") to be Shipped Out On Time	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Order i</div> <div style="font-size: 2em;">{</div> <div style="margin-right: 10px;">On time</div> <div style="margin-right: 10px;">[</div> <div style="margin-right: 10px;">Probability to ship out on time ($P1_i$)</div> <div style="margin-right: 10px;">Probability to ship out late ($P2_i$)</div> <div style="margin-right: 10px;">Late</div> <div style="margin-right: 10px;">[</div> <div style="margin-right: 10px;">Probability to ship out on time ($P3_i$)</div> <div style="margin-right: 10px;">Probability to ship out late ($P4_i$)</div> <div style="margin-left: 10px;">]</div> <div style="margin-left: 10px;">]</div> </div>
$P2_i$	Probability for Order i (whose Simulation Result is "On-Time") to be Shipped Out Late	
$P3_i$	Probability for Order i (whose Simulation Result is "Late") to be Shipped Out On Time	
$P4_i$	Probability for Order i (whose Simulation Result is "Late") to be Shipped Out Late	

<Table 6> Definition of KPIs

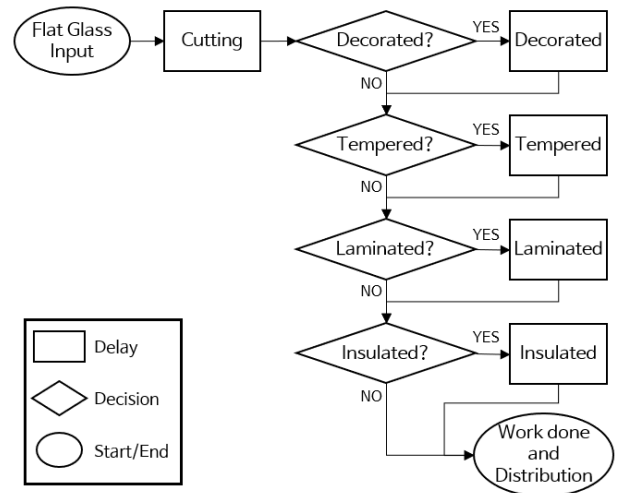
KPI	Description
$\overline{N_{on}}$	• $\overline{N_{on}} = \frac{N_{on}}{N}$ • Percentage of On-Time Delivery Orders out of All Orders
\overline{OT}	• $\overline{OT} = \frac{\sum_{i=1}^N P1_i}{N_{on}}$ • Average On-Time Delivery Probability out of On-Time Delivery Orders
\overline{T}	• $\overline{T} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^N T_i$ • Average Delay Time in the Delivery Delay Orders (Considering Working Hours Only)

그 값을 납기 충족 주문 건수의 합으로 나누어 구할 수 있다. 이 값이 1에 가까울수록 납기 충족을 확실히 보장할 주문이 많음을 알 수 있다. 반대로 0에 가까울수록 납기일 내 출하될 것으로 예상되긴 하지만 이를 확실히 보장하기 어려운 주문이 많다는 것을 의미한다.



<Figure 2> Flat Glass Processing Process

Mean Tardiness(\bar{T})는 납기 미충족이 예상되는 주문에 대하여 납기 지연의 정도를 평균화한 지표이다. 이 값은 납기 미충족 주문 각각의 지연시간을 합한 후 납기 미충족 주문 건수로 나누어 구할 수 있다. 이 때, 지연시간을 산정하는 과정에서 작업자들이 실제로 근무하는 시간만을 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그 이유는 비 근무시간까지 고려한다면 납기 지연 정도가 과대 측정될 가능성이 농후하기 때문이다. 예컨대, 한 공장에서의 시뮬레이션 결과, 평일 근무 마감시간이 오후 7시인데 특정 작업이 오후 7시 10분에 마칠 것으로 예상되는 상황이 있다. 이 때 오로지 근무시간만을 고려한다면 납기 지연 시간은 10분이다. 하지만, 비 근무시간까지 포함한다면 당일 오후 7시부터 다음 날 아침 작업이 시작되는 시간까지 더하게 되어 납기 지연 시간이 과대 측정된다.



<Figure 3> Activity Diagram for Flat Glass Processing Process

4. 사례분석

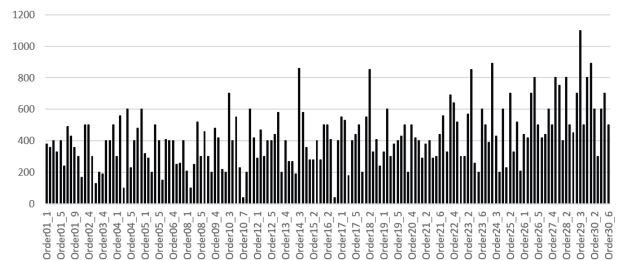
4.1 G사 적용사례

G사는 국내 판유리 가공 전문 업체다. 판유리 원판 제조사로부터 원판을 매입하여 주요 고객사라고 할 수 있는 건설사의 요청 사항에 맞춰 가공처리 후 이를 납품한다. 판유리 가공은 고객사의 요청 사항에 맞춰 작업이 시작될 수 있기 때문에 MTO 방식을 따르는 대표적인 작업 중 하나다. G사는 2016년 12월 기준으로 42명이 종사하고 있으며 약 120억 원의 연 매출을 달성한 중소기업이다.

<Figure 2>는 G사의 판유리 가공 프로세스를 표현한 것이다. 재단, (면취)가공, 강화, 복층, 접합 등과 관련한 판유리 가공 설비를 보유하고 있다. G사의 연 평균 주문량을 기준으로 했을 때 주력 공정은 재단, 강화, 복층 공정이라고 할 수 있다.

<Figure 3>는 G사의 Activity Diagram을 나타낸 것이다. 고객사, 납기일, 유리 품목 등을 기준으로 주문 사항을 세부적으로 나누면 G사가 2018년 9월 내 생산해야 하는 주문 건은 총 161건이다. <Figure 4>는 161개 각각의 주문 건에 대한 목표 생산량을 나타낸 것이다.

본 사례분석은 2018년 9월 1일부터 9월 30일까지의 월간



<Figure 4> Manufacturing Orders in September 2018

생산계획 수립을 목표로 진행되었다. 고객사의 주문량, 판유리 원판 구매량 등의 생산 관련 데이터를 바탕으로 하였으며 이를 시뮬레이션 모델링 과정에 활용하였다.

공정 설계(Layouts) 기준으로 보았을 때 G사의 공정은 혼합 흐름 공정(Hybrid Flow Shop)으로 볼 수 있다. 따라서, 모델 설계 시 혼합 흐름 공정에 관한 일정계획 관련 연구 및 판유리 생산계획 수립에 관한 연구를 중점으로 하여 타당한 가정 사항을 수립하고자 하였다[17, 20].

혼합 흐름 공정과 관련한 가정은 다음과 같다.

- 설비는 일정 시점에 하나의 작업만을 수행한다.
- 선점형 작업계획(Preemption)이 존재하지 않는다.
- 재작업(Rework)이 존재하지 않는다.
- 설비의 고장은 고려하지 않는다.
- 설비의 처리시간은 삼각분포를 따른다.

사례기업 G사와 관련된 기본 가정은 다음과 같다.

- 시뮬레이션 적용 기간의 최초 시점 이전, 공정 상 재고(WIP)는 존재하지 않는다.
- 재단, 가공, 복층, 접합 공정은 병렬 설비를 가지며 한 공정 내 두 설비의 생산 능력은 동일하다.
- 재단 공정에서 유리 두께 변화에 따른 셋업시간(Thickness Changeover)과 색상 변화에 따른 셋업시간(Color Changeover)이 발생한다.
- 재단 공정에서 두께와 색상이 모두 동일한 품목으로 전환할 때 셋업시간은 발생하지 않는다.

<Table 7>은 시뮬레이션 모델 설계 시 입력한 G사의 공정 관련 투입 요소와 그에 대한 대응치를 나타낸다.

<Table 7> Input Elements for Simulation Modeling

Input Elements	Proxy
Manufacturing Orders	Orders for Finished Goods(Sheet)
Monthly Output by Item	(Average Annual Production by Item)/12
Price of Raw Material	Price of Flat Glass(Price per Sheet, \$)
	Price of Total Amount of Processing Materials required(Price per Sheet, \$)
Location of Machines	The Center Position of Machines(Meter)
Facility Performance	Processing Time(Minute), Estimated by Triangular Distribution
	Setup Time(Minute)
Monthly Working Day	20 Days
Daily Working Hours	10 hours
Simulation Starting Time	September 1, 2018 08:00:00
Simulation Ending Time	September 30, 2018 20:00:00

<Table 8>은 G사의 2018년 9월 목표 생산 주문 총 161건에 대한 생산 품목, 작업시작 가능 시점, 납기일, 생산량 등을 나타낸다. 각 주문별 작업소요시간은 판유리 원판 종류, 특정 가공 처리 여부, 각 공정 단계에서의 셋업시간 등에 의해 결정된다.

<Table 8> An Example of Input Data for Monthly Manufacturing Orders

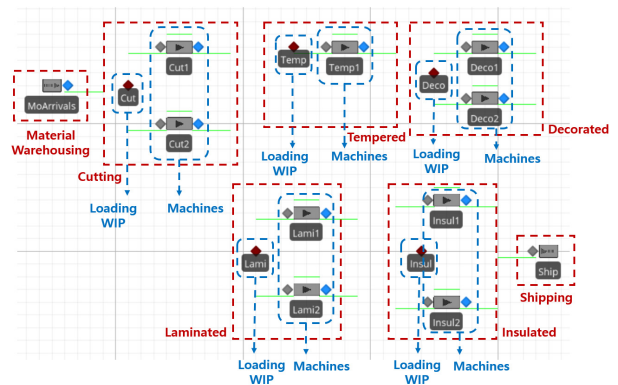
No.	Order ID	Item	Release Date	Due Date	Quantity
1	Order01_1	FinishedGoodA	2018-09-01 12:00	2018-09-05 17:00:00	380
2	Order01_2	FinishedGoodB	2018-09-01 12:00	2018-09-05 17:00:00	360
3	Order01_3	FinishedGoodC	2018-09-01 12:00	2018-09-05 17:00:00	400
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	Order04_1	FinishedGoodA	2018-09-01 12:00	2018-09-10 17:00:00	330
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
161	Order30_6	FinishedGoodS	2018-09-01 12:00	2018-09-28 17:00:00	500

본 사례분석에서 생산계획 시나리오는 <Table 9>과 같이 작업 우선순위규칙(Dispatching Rule)을 기반으로 하였다.

<Table 9> Scenarios based on Dispatching Rule

Scenario No.	Dispatching Rule	Description
1	FIFO (First In First Out)	• Start with the Oldest Job in the Queue
2	LIFO (Last In First Out)	• Start with the Youngest Job in the Queue(FIFO's Opposite)
3	EDD (Earliest Due Date)	• Start with the Job with the Earliest Due Date
4	CR (Critical Ratio)	• Start with the Urgent Job based on Delivery Date (High CR) • $CR = \frac{Actual\ Time\ Remaining}{Lead\ Time\ Remaining}$
5	LST (Least Setup Time)	• Start with the Same Type of Job as Previously so that it Leads to Minimize Setup Time

시나리오 1번은 선입선출법(FIFO)으로 대기열 상 가장 먼저 도착한 작업부터 처리하며 2번은 후입선출법으로 대기열 상 가장 늦게 도착한 작업부터 처리한다. 시나리오 3번은 대기열에서 납기일이 가장 빠른 작업부터 시작하는 방법(EDD)이며 4번은 잔여납기일수와 잔여작업일수를 비교하여 긴급한 작업부터 처리하는 방법(CR)이다. 마지막으로 시나리오 5번은 셋업시간 최소화 방법(LST)으로 현재 시점에 생산 중인 품목과 동일한 종류의 품목부터 처리하는 방식이다.



<Figure 5> Location of Machines and Work Load Space Implemented by SIMIO

<Figure 5>는 시뮬레이션 소프트웨어 SIMIO를 통해 G사의 공정 환경을 입력한 모습이다. 생산계획 도출에 시뮬레이션 프로그램 SIMIO University Enterprise Version 10.174를 이용하였으며 사용된 PC 사양은 CPU : Intel(R) Core(TM) 2.4GHz, 메모리 : 8GB이다.

4.2 시뮬레이션 결과

우선순위규칙 기반 시나리오 5가지에 대해 시뮬레이션 반복횟수는 각각 50회, 신뢰수준 95%로 설정했다. 시뮬레이션 총 소요 시간은 약 107.5초로 산출되었다. <Table 10>는 G사의 2018년 9월 목표 생산 주문 총 161건의 납기준수 여부에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 예컨대, <Table 10>에서 첫 번째 시나리오는 161건의 주문 중 납기 충족 주문 12건(74.53%), 가공 작업은 마쳤지만 납기를 지키지 못한 주문 9건(5.59%), 가공을 시작조차 하지 못한 주문 32건(19.88%)으로 예상 결과를 보였다.

<Table 10> Simulation Results for Delivery Compliance

Scenario No.	N_{on}		N_T		N_{IC}	
	Total	Percent	Total	Percent	Total	Percent
1	120	74.53%	9	5.59%	32	19.88%
2	118	73.29%	12	7.45%	31	19.25%
3	116	72.05%	13	8.07%	32	19.88%
4	118	73.29%	11	6.83%	32	19.88%
5	95	59.01%	36	22.36%	30	18.63%

시뮬레이션 결과에 관한 간트 차트를 통해 각 설비별 할당 작업 종류 및 작업량을 알 수 있다. <Figure 6>는 다섯 번째 시나리오의 간트차트 예시를 나타낸다. <Figure 6>를 보면, ①은 공장 내 설비 종류를 나타내며 ②는 작업 종류(색상)가 바뀔 경우 셋업시간이 발생함을 내포하고 있다. ③과 같이 이를 연속으로 작업 종류가 바뀌지 않고 유지되는 것은 휴일(토·일요일)임을 뜻한다. ④는 작업이 없는 유휴시간을 의미하며 ⑤는 시뮬레이션 적용 총 시간(Run Time, 2018년 9월 1일~9월 30일)을 뜻한다. 마지막으로, ⑥을 통해 시뮬레이션 적용 기간 내 처리능력이 부족함을 알 수 있다.

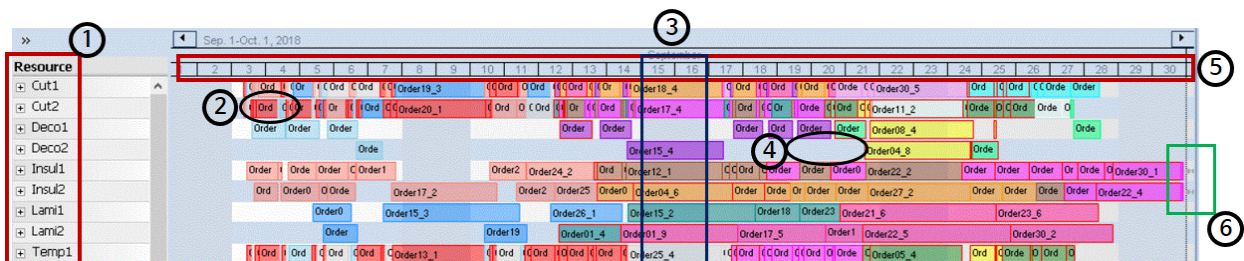
<Table 11>은 시나리오별 KPI를 적용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 본 시뮬레이션 결과를 통해 생산관리자는 상황별 중요 요인에 따라 생산계획 시나리오를 유연성 있게 선택할 수 있다는 이점이 있다.

먼저, 납기준수율($\overline{N_{on}}$) 기준, 시나리오 1번이 가장 높은 납기준수율(74.53%)을 보였으며 차등으로 시나리오 2번과 4번이 거의 같은 결과값(73.29%)을 나타냈다. 시나리오 5번은 가장 낮은 납기준수율(59.01%)을 보였다. 그 이유는 작업 우선순위규칙이 셋업시간 최소화 기준이므로 납기준수에 따르는 작업 우선순위가 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

납기준수율과 관련한 전반적인 결과치에 관하여, 일반적인 제조업 대비 납기준수율이 상대적으로 낮은 것으로 평가할 수도 있다. 하지만, 이는 실제 G사의 상황을 반영한 값으로 판단된다. 즉, G사는 정시 근무만으로는 납기 충족이 어려운 상황에 놓여있어 추가 근무를 자주 단행하는 실정에 있어 결과치는 이를 반증하는 것으로 판단된다.

다음, 주문별 정시 출하율의 평균(\overline{OT})을 중심으로 보면, 시나리오 1번이 최상위 값(82.14%)을 보였다. 이는 시나리오 1번과 같이 작업 우선순위규칙으로서 선입선출법을 따랐을 경우 납기 충족을 확실히 보장할 수 있는 주문 건수가 많음을 뜻한다. 반대로, 시나리오 5번은 납기준수율($\overline{N_{on}}$) 결과와 마찬가지로 주문별 정시 출하율의 평균(\overline{OT}) 측면에서도 가장 열등한 값(67.09%)을 보였는데 이 또한 작업이 셋업시간을 최소화하는 방식으로 이루어지기 때문인 것으로 볼 수 있다.

마지막으로, Mean Tardiness(\overline{T})을 중심으로 보면 시나리오 3번과 5번이 각각 최상위, 최하위 값을 보였다. 하지만 시뮬레이션 상세 결과를 참고한다면, Mean Tardiness(\overline{T})만을 기준으로 하여 생산계획 시나리오를 선택하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단된다. 왜냐하면 소수의 납기 지연 주문 건의 지연 정도가 지나치게 크기 때문에 평균값에 편의를 주기 때문이다. 이와 같이 납기 지연 시간이 상대적으로 긴 주문 건을 파악하여 타당한 해결 방안을 고안할 필요가 있다. 실천가능한 대응책은 크게 3가지로 볼 수 있다. 첫째, 추가 근무 등을 통해 G사가 직접 생산하는 방법이 있다. 둘째, 아웃소싱을 통해 납기 지연 주문 건에 대한 리스크를 절감할 수 있다. 셋째, 특정 주문 건에 대한 계약 취소를 고려해 볼 수 있다.



<Figure 6> An Example of Task-based Gantt Chart on Production Scheduling

<Table 11> Simulation Results by KPIs

Scenario No.	KPI	$\overline{N_{on}}$	\overline{OT}	\overline{T}
1		74.53%	82.14%	17h 21m
2		73.29%	80.30%	53h 42m
3		72.05%	80.39%	13h 9m
4		73.29%	81.59%	18h 23m
5		59.01%	67.09%	171h 2m

— : The Best Scenario for Each KPI.

5. 결론

본 연구는 MTO 방식의 제조 환경에서 시뮬레이션 모델 설계를 통해 생산계획을 도출하는 과정을 제시하였다. 이는 국제 표준 생산 시스템 모델링 방식인 B2MML을 기준으로 공정 데이터를 전처리하며 시뮬레이션 소프트웨어 SIMIO를 통해 시나리오별 예상 성과를 파악하는 모델이다. 또한, 이 과정에 따라 국내 판유리 가공기업을 대상으로 한 사례연구를 진행하였다. 작업 우선순위규칙 (Dispatching Rule) 기반 시나리오 5가지에 납기준수시간 관련 핵심 성과지표 3가지를 적용 및 평가함으로써 본 연구는 두 가지 시사점을 제공한다. 첫째, MTO 방식의 제조 공정 특성을 반영하여 시뮬레이션 모델 설계 프로세스를 제시하였다는 점이 있다. 둘째, 판유리 가공기업에 대한 분석을 통해 판유리 산업과 관련한 연구의 폭을 확장하였다.

다만 시뮬레이션 적용 기간을 단기간(1개월)으로 한정하였으므로 향후에는 보다 긴 기간을 기준으로 하여 모델을 테스트 및 확장할 필요가 있다. 또한 비교적 단순한 형태의 성과지표를 적용했다고 평가할 수 있으므로 납기준수시간 관련 지표 외, 다양한 시각에서 시나리오를 평가할 수 있는 성과지표의 적용이 필요하다. 이러한 향후 연구 방향을 고려하여 연구를 확장한다면 MTO 방식의 생산계획 수립에 관한 전략을 더욱 고도화할 수 있을 것이다.

References

- [1] Arbib, C. and Marinelli, F., An Optimization Model for Trim Loss Minimization in an Automotive Glass Plant, *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 183, No. 3, pp. 1421-1432.
- [2] Beamon, B.M., Measuring Supply Chain Performance, *International Journal of Operations & Production Management*, 1999, Vol. 19, No. 3, pp. 275-292.
- [3] Dyson, R.G. and Gregory, A.S., The Cutting Stock Problem in the Flat Glass Industry, *Journal of the Operational Research Society*, 1974, Vol. 25, No. 1, pp. 41-53.
- [4] He, D., Lobov, A., and Lastra, J.M., ISA-95 Tool for Enterprise Modeling, *Proceeding of ICONS*, 2012, pp. 83-87.
- [5] Kelton, W.D., Smith, J.S., and Sturrock, D.T., *Simio and Simulation : Modeling, Analysis, Applications, Learning Solutions*, 2011.
- [6] Kwon, K.J., Hong, S.D., and Kim, K.H., Designing Racks for Transporting Flat Glass Products in a Construction Industry, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2016, Vol. 42, No. 4, pp. 270-279.
- [7] Lee, C.S. and Choe, K.I., A Manufacturing Execution System based on ISA-95, *Proceedings of the Conference on Korean Operations Research and Management Society*, 2007, pp. 1092-1096.
- [8] Lee, D.K. and Oh, D.K., A Study on Simulation based Manufacturing in Shipyards : Focused on a Long-term Plan Verification, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 2014, Vol. 20, No. 1, pp. 86-95.
- [9] Lee, J.Y. and Shin, M.S., Research Trends of Scheduling Techniques for Domestic Major Industries, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2018, Vol. 41, No. 1, pp. 55-69.
- [10] Lee, S.W., Kim, H.S., and Cho, S.Y., A Study on Dynamic Scheduling in Flexible Manufacturing System Environment, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2004, Vol. 27, No. 2, pp. 17-23.
- [11] Lin, J.T. and Chen, C.M., Simulation Optimization Approach for Hybrid Flow Shop Scheduling Problem in Semiconductor Back-end Manufacturing, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, Vol. 51, pp. 100-114.
- [12] Madsen, O.B., Glass Cutting in a Small Firm, *Mathematical Programming*, 1979, Vol. 17, No. 1, pp. 85-90.
- [13] Mun, J.S., Park, S.Y., and Lee, D.H., A Study on the Productivity Improvement of the Dicing Blade Production Process, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2016, Vol. 39, No. 3, pp. 147-155.
- [14] Na, B., Ahmed, S., Nemhauser, G., and Sokol, J., A Cutting and Scheduling Problem in Float Glass Manufacturing, *Journal of Scheduling*, 2004, Vol. 17, No. 1, pp. 95-107.
- [15] Na, B., Ahmed, S., Nemhauser, G., and Sokol, J., Op-

- timization of Automated Float Glass Lines, *International Journal of Production Economics*, 2013, Vol. 145, No. 2, pp. 561-572.
- [16] Papavasileiou, V., Koulouris, A., Siletti, C., and Petrides, D., Optimize Manufacturing of Pharmaceutical Products with Process Simulation and Production Scheduling Tools, *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, Vol. 85, No. 7, pp. 1086-1097.
- [17] Pinedo, M.L., *Scheduling : Theory, Algorithms, and Systems*, Springer, 2016.
- [18] Pipero, C. and Manjunath, K., ISA 95 Implementation Best Practices : Workflow Descriptions using B2MML, WBF North American Conference, Atlanta, GA, 2006.
- [19] Smith, J.S., Sturrock, D.T., and Kelton, W.D., *Simio and Simulation : Modeling, Analysis, Application*, Simio LLC, 2017.
- [20] Taskin, Z.C. and Unal, A.T., Tactical Level Planning in Float Glass Manufacturing with Co-production, Random Yields and Substitutable Products, *European Journal of Operational Research*, 2009, Vol. 199, No. 1, pp. 252-261.

ORCIDYong-Hee Choi | <http://orcid.org/0000-0003-0757-2178>Seung-June Hwang | <http://orcid.org/0000-0003-2692-0043>