



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](#)

경영학박사학위논문

스마트 공장 도입으로 인한 하청제조기업의 운영 성과  
향상 추정: 시뮬레이션 기법의 활용을 중심으로

Operation Performance Improvement through Smart Factory  
by A Subcontract Manufacturer: Applying System Simulation  
to Operation Performance Estimation

울산대학교 대학원  
경영학과  
이 승 도

스마트 공장 도입으로 인한 하청제조기업의 운영 성과  
향상 추정: 시뮬레이션 기법의 활용을 중심으로

지도교수 김 상 원

이 논문을 경영학박사학위 논문으로 제출함

2022년 2월

울산대학교 대학원  
경영학과  
이 승 도

이승도의 경영학박사학위 논문을 인준함

심사위원장      장 길 상



심사위원      김 도 일



심사위원      김 병 인



심사위원      김 상 원



심사위원      홍 윤 숙



울 산 대 학 교    대 학 원

2022년 2월

## 국문 초록

스마트 공장 (smart factory)은 현재 제조업 전반에 확산되고 있는 ‘현장 지능화 운동’이다. 정부에서는 디지털 전환 (digital transformation)의 시대에 발맞춰 제조업 경쟁력을 강화하고자 ‘스마트제조혁신추진단’을 매개로 하는 스마트 공장 구축 지원 사업을 진행하고 있다.

한편, '하청제조업'은 자동차, 조선, 전자 산업에서 흔히 발견되고 있는 업태로서 중소기업 숫자 중 상당 비율을 차지한다. '사급자재'를 취급한다는 점, 판매가격 및 수량을 결정하지 못하는 공급사슬내 위상 등의 요인이 수익성을 제약한다. 이러한 특성으로 인하여 하청제조기업은 비용절감과 매출확대에 구조적 한계가 있으며 이는 대규모의 정보기술 투자를 (예, ERP, 스마트 공장) 어렵게 한다.

본 연구의 목적은 하청제조기업이 스마트 공장을 추진하고자 할 때 기대할 수 있는 운영 상의 성과를 추정하고 재무적으로 환산하는 프레임워크를 제시하는 것이다. 이를 통해 비용효과적인 스마트 공장 프로젝트를 선택하도록 돕고자 한다. 연구의 목적을 달성하기 위해 제조기업에 해당하는 디지털 전환 후 운영성과를 산정하는 프레임워크를 제시하였다. 프레임워크에 기반하여 어느 하청제조기업의 운영 시스템을 수리적으로 모형화하고 운영 성과척도를 정립한 결과, 스마트 공장 도입 이후 운영 성과의 향상 정도를 정량적으로 산출할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발할 수 있었다. 시뮬레이션 모델은 스마트 공장의 구축으로 운영 시스템의 모수가 변화한다면 운영 성과척도에 어떤 변화가 있는지 예측할 수 있도록 만들어졌다.

본 연구는 실제 기업의 데이터를 이용해 프레임워크의 적용 사례를 제시하였으며 그 결과 스마트 공장 구축으로 인해 발생한 운영 성과가 재무적 성과에 이르는 과정을 명확히 보여줄 수 있었다. 따라서 다른 하청제조기업도 본 연구의 사례를 참고하면 스마트 공장 구축의 기대효과를 정량적으로 추정할 수 있을 것이다.

다양한 연구 방법들이 본 연구의 목적을 달성하기 위해 사용되었다. 먼저, 프레임워크 개발을 위해서는 정보기술의 (IT) 기업성과 관련 문헌연구를 진행하였고 운영모델의 수립을 위해서는 운영분야 수리모델에 관한 문헌을 참고하였다. 또한, 사례 개발을 위해서는 사례기업 관리자 인터뷰, 워크숍, 관찰 등을 실시하여 정성적 데이터와 생산실적 데이터 등을 수집, 분석하였다. 마지막으로 예측모델의 개발에는 시스템다이내믹스 시뮬레이션이 사용되었다.

본 연구를 통해 살펴본 바 하청제조기업이 스마트 공장 구축을 통해 기대할 수 있는 추가적인 이익은 재무적으로 크다고 할 수 없었다. 이는 장기간 사업을 영위해 온 하청제조기업의 경우 기존에 확립된 프로세스를 오랜 기간 반복, 개선하면서 이미 상당한 운영성과를 달성했기 때문에 스마트 공장 구축을 통해 추가적인 개선의 여지가 크다고 볼 수 없는 것으로 설명할 수 있다. 본 연구에서는 스마트 공장의 도입 후에도 기업이 기존의 운영 방식을 유지한다고 가정하였다. 그러므로 도입 효과는 운영모델의 모수 변화에 집중되었다. 따라서 장기간 운영해 온 하청제조기업의 경우 모수의 변화를 일으키는 정도의 프로젝트로는 큰 구축 효과를 기대하기 어렵다는 점을 알게 되었다.

추가적으로 본 연구의 결과물인 시뮬레이션 모델을 활용하면 모수 변화에 따라 운영성과 척도의 변화를 파악할 수 있으므로 공장관리자는 관리지표 간 상관관계에 대한 통찰력을 향상할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 기존 중소벤처기업의 연구에서 더 나아가 하청제조기업의 일반적인 운영모델과 운영 성과 척도를 정립하였으며, 제시한 운영모델의 시뮬레이션을 통해 디지털 전환에 따른 운영 성과의 재무적 효과를 확인할 수 있는 방법을 제시하였다는 점에서 학문적 의의가 있다고 할 것이다.

# 목 차

1. 서 론 .....	1
1.1 스마트 공장의 배경 .....	1
1.2 하청제조기업의 스마트 공장 .....	1
1.2.1 하청제조업의 분류 .....	1
1.2.2 하청제조업의 거래 특징 .....	2
1.2.3 하청제조기업의 운영위기 .....	3
1.2.4 스마트 공장 : 하청제조업의 위기극복 방안 .....	4
1.2.5 4차 산업혁명과 하청제조기업의 미래 .....	4
1.3 연구의 방향 .....	5
1.3.1 연구의 방향 .....	5
1.3.2 본론의 구성 .....	6
2. 디지털 전환 운영성과 추정 프레임워크 .....	8
2.1 기업의 운영 성과와 정보기술의 효과에 관한 기존 연구 .....	8
2.2 재고-생산 모형에 대한 기존 연구 .....	11
2.3 IT 신기술과 재고-생산 모형 .....	13
2.3.1 IT 신기술이 재고-생산 문제의 해법에 사용된 연구 .....	13
2.3.2 IT 신기술로 제기된 새로운 문제들에 대한 연구 .....	14
2.4 디지털 전환 운영성과 추정 프레임워크 .....	14
2.4.1 디지털 전환 프로젝트의 채택 기준 .....	14
2.4.2 프레임워크 구성요소 .....	15
2.5 스마트 공장의 디지털 기술효과 .....	18
2.5.1 스마트 공장 구축의 효과와 발전단계형 모델 .....	19
2.5.2 우수구축사례와 디지털 기술효과 .....	21
2.5.3 하청제조기업의 스마트 공장 구축 방향 .....	24
3. 하청제조기업 운영 시스템의 모형화 .....	27
3.1 사례 개발의 의의 .....	27

3.2	하청제조기업 사례 개발 .....	28
3.2.1	하청제조기업 Hankoat의 운영 프로세스 .....	28
3.2.2	수리모형의 수립 .....	30
3.2.3	수리모형의 고찰 .....	33
3.2.4	단일 기수 가정 시 수리모형의 해 .....	34
3.3	하청제조기업 시뮬레이션 모델 수립 .....	36
3.3.1	모델의 기술방법: 시스템다이내믹스 .....	36
3.3.2	Hankoat 내부의 운영관리 체계 .....	39
3.3.3	단순 모델 .....	39
3.3.4	Simple Model의 총생산량 결정 방식: 뉴스벤더모형 .....	41
3.4	하청제조기업의 운영성과척도 .....	42
3.4.1	대기행렬 이론의 성과 척도 .....	42
3.4.2	대기행렬 모형의 적용 .....	43
3.4.3	재고-생산 이론에서의 운영 성과 척도 .....	45
3.4.4	데이터 수집 방법 .....	49
3.5	확장모델의 개발 .....	49
3.5.1	운영 성과 척도 계산식의 반영 .....	49
3.5.2	재고-생산 이론의 산출율과 대기행렬 이론의 입고율 .....	51
3.5.3	산출율 (TH) 계산 방식의 검토 .....	52
3.5.4	하청제조기업의 수익극대화 전략 .....	52
3.6	운영성과척도의 재무적 성과척도 변환 .....	53
3.6.1	운영-재무 성과척도 간 변환의 어려움 .....	53
3.6.2	재무적 성과척도로서의 현금전환주기 .....	53
3.6.3	운영성과척도 - 현금전환주기 관계식 .....	55
4.	적용 사례 - Hankoat 스마트 공장 운영성과 산정 .....	57
4.1	데이터 수집 .....	57
4.1.1	입고 데이터의 기초 분석 .....	57
4.1.2	생산 데이터의 기초 분석 .....	59
4.1.3	데이터 기초 분석 종합 .....	59
4.2	Hankoat의 운영 성과 측정 .....	60
4.2.1	시스템 운영 성과 분석 .....	61
4.2.2	하청제조기업의 생산전략 .....	63
4.3	스마트 공장 구축 방향성 설정 .....	63
4.3.1	생산 현장의 제약요소 .....	63
4.3.2	솔루션의 목표 이미지 .....	63



4.4	디지털 기술효과와 시스템 설정 변화 .....	66
4.4.1	현실적 최대생산량의 계산원리 .....	67
4.4.2	현실적 최대생산량의 계산 .....	67
4.4.3	계획가능생산량과 최대생산량 .....	70
4.4.4	계획가능생산량의 증대 방법 .....	70
4.4.5	스마트 공장의 구축 효과 추정 .....	72
4.5	시뮬레이션 결과 .....	73
4.6	재무적 성과 향상의 계량 .....	75
4.6.1	운영 성과 척도의 재무적 성과 척도 전환 .....	75
4.6.2	기대 재무성과 .....	76
4.7	적용 결과 .....	76
5.	결 론 .....	77
5.1	연구의 요약 .....	77
5.2	연구의 시사점 .....	79
5.3	연구의 한계점 및 향후 연구 방향 .....	80
	참고문헌 .....	82
	부 록 .....	87
A1.	스마트 공장 우수구축 사례 분석 .....	87
A2.	단계별로 본 스마트 공장 .....	91
A3.	확장모델 소스코드 (R) .....	92
A4.	Hankoat의 작업 스케줄링 프로세스 .....	94
	Abstract .....	95

## 표 목차

[표 1] 스마트화 수준, CMM, 정보화 수준 비교 .....	19
[표 2] 스마트 공장 우수구축사례 분석 결과 예시 .....	22
[표 3] 스마트 공장의 디지털 기술효과 .....	23
[표 4] Hankoat의 주간생산계획 예시 .....	31
[표 5] 일반화된 주간생산계획 .....	32
[표 6] 하청제조기업의 운영 성과 척도 .....	46
[표 7] 입고량의 기초 자료 요약 .....	57
[표 8] 생산량의 기초 자료 요약 .....	59
[표 9] 생산 제약 요소 파악을 위한 인터뷰 결과 요약 .....	64

## 그림 목차

[그림 1] 본론의 구성 .....	6
[그림 2] 디지털 전환 운영성과 추정 프레임워크 .....	17
[그림 3] VSM 으로 표현한 Hankoat의 운영관리 환경 .....	29
[그림 4] Simple Model SFD .....	40
[그림 5] 운영성과척도 산출로직을 포함한 확장모델 .....	50
[그림 6] 연중 입고량의 기초 시계열 분석 .....	58
[그림 7] 연중 생산량의 기초 시계열 분석 .....	60
[그림 8] 재고와 생산량의 산점도 .....	62
[그림 9] 재고와 사이클타임의 산점도 .....	62
[그림 10] Hankoat 스마트 공장 사용자 인터페이스 모크업 .....	66
[그림 11] 다양한 최대생산량과 계획가능생산량의 관계도 .....	70
[그림 12] 계획가능생산량 증대의 개념 .....	71
[그림 13] 시뮬레이션 결과 비교 : 현재-구축이후 일일생산량 .....	74
[그림 14] 시뮬레이션 결과 비교 : 현재-구축이후 사이클타임 .....	74

# 1. 서 론

## 1.1 스마트 공장의 배경

전 세계 주요 국가들은 이른바 ‘4차 산업혁명’을 효과적으로 대응해 미래의 경제 주도권 경쟁에서 우위에 서기 위한 전략을 수립, 추진하고 있다. 미국의 ‘산업인터넷’, 중국의 ‘made in china 2025’, 독일의 ‘industrie 4.0’ 등과 같은 구호는 제조업 부흥을 위한 각국의 전략을 잘 반영하는 것으로서 정보기술과 제조업의 결합을 혁신의 중요한 축으로 삼는다 (Tao, Zhang, 2017). 제조업의 디지털 전환 (digital transformation)은 현재 업계 전반에 확산되고 있는 ‘현장 지능화 운동’의 일환으로서 IoT/IoS<sup>1)</sup>, 클라우드 컴퓨팅 같은 새로운 조류의 정보통신 기술의 발달로 대용량의 데이터가 자원이 되는 4차 산업혁명 시기를 대비한 활동이며 우리 정부는 ‘스마트제조혁신추진단’을 매개로 스마트 공장 (smart factory) 구축 지원 사업을 진행하고 있다 (조지훈, 신완선, 2019).

스마트 공장 구축 지원 사업은 특정 표준 솔루션의 대규모 도입을 목표로 하던 이전 정보화 사업과는 달리 지원기업의 요구에 맞게 다양한 하드웨어 및 소프트웨어의 조합을 제공하는 것이 특징이다. 따라서, 정부 입장에서는 한정된 예산으로 최대 효과를 얻어야 하므로 현장자동화, 공장운영, 기업자원관리, 제품개발, 공급사슬관리 등의 다양한 개선 영역 중 지원 기업이 가장 큰 고도화를 이룰 수 있는 소수 영역에 집중하고자 하는 반면 지원의 대상이 되는 중소기업은 전반적이고 실질적 운영 성과개선을 약속할 수 없다면 최신의 추가적 정보기술 도입 프로젝트는 아무리 소규모라도 부담스러운 입장이다. 한편, 제조업 환경은 사업의 지속성 향상을 위한 방향으로 그 변화가 가속되어 왔다. 노동시간 및 노동환경을 개선하는 법·제도의 준수, 거래기업의 경쟁적 납기 단축/ 단가 인하 압력 등이 중소기업의 시의적절한 기술혁신 투자를 어렵게 하고 있다.

## 1.2 하청제조기업의 스마트 공장

### 1.2.1 하청제조업의 분류

하청제조업(subcontract manufacturing)은 대기업이나 규모가 큰 중견기업으로부터 제조나 용역을 위탁받아 처리하는 전문 제조업을 말하며, 우리나라 중소기업의 적지 않은 숫자가 이러한 거래방식을 갖는다.

---

1) Internet of Things / Internet of Services

하청제조기업은 자동차, 조선, 전자 산업에서 다수 발견되고 있다. 특히 자동차 산업은 소수의 자동차 메이커를 정점으로, 다수의 기업이 피라미드처럼 정연한 수직계열 속에 소속되어 하위 업체로부터 부품을 공급받고 상위 업체에 부품을 납품하는 거대한 공급망을 가진 산업이다. 그러므로 한 자동차 메이커에 부품을 공급하는 비교적 소수의 기업을 (1차업체, tier 1) 제외하면 다수의 자동차 부품 제조기업은 하청제조 형태로 위탁제조 물량을 수급하고, 어떤 경우에는 도급하는 입장이 되는 복잡한 관계망에 속해 있다고 할 수 있다 (강선민, 2012).

일반적인 상거래에서 도급-수급 관계는 자연스러운 구조이므로 이를 별도로 구분해서 생각할 필요는 없다. 다만 우리나라의 많은 중소기업이 몇몇 거래기업에 매출 대부분을 의존하는 전속거래 관계에 있다. 이러한 전속거래에서 하청제조기업은 발주사업자(원청)에 대해 절대적인 열위에 있을 수밖에 없으며 이런 상황은 구조적으로 여러 가지 문제를 일으킨다.

### 1.2.2 하청제조업의 거래 특징

하청제조기업은 발주기업과의 거래에서 운영관리 상 몇 가지 공통적인 특징을 가진다. 첫 번째는 '사급자재'의 취급이다. 자재의 선택권이 하청제조기업에 있지 않고 발주기업에서 선정·공급하는 자재를 '사급자재'라고 하며, 하청제조기업의 매출에 자재의 가격이 포함되면 '유상사급', 포함되지 않으면 '무상사급'이라고 한다. 사급이 이뤄지면 하청제조기업이 생산·공급하는 품목이라 하더라도 발주기업이 자재 공급에 있어 사실상의 주도권을 가진다 (강선민, 한기원, 2015).

두 번째는 판매가격과 수량을 결정할 수 없다는 점이다. 기업의 수익성을 결정하는 3대 요인인 가격(price), 비용(cost), 판매수량(quantity) 중 가격과 판매수량을 하청제조기업 스스로 결정할 수 없다. 그러므로 하청제조기업이 수익을 높이기 위해서는 오로지 비용 절감만이 유일한 수단으로 남는다.

세 번째는 지속적인 가격인하를 (cost reduction, CR) 수용해야 한다는 점이다. 산업보국을 지향하던 시기를 지나 이익의 극대화가 기업 목표로 확립되면서 발주사업자는 구매비용 절감의 한 방편으로 하청제조기업에게 매년 공급가 인하를 요구한다. 매출에 절대적인 의존관계가 형성되어 있는 하청제조기업은 그러한 요구를 거절할 수 없으며, 덧붙여 발주사업자는 주기적인 감사를 통해 하청제조기업이 기 확보한 이익마저도 다양한 명분으로 회수해 간다.

이러한 불평등 관계가 야기하는 문제를 막기 위해 정부에서는 공정거래법, 하도급법 등 여러 종류의 법·제도를 제정·집행하고 있지만, 이런 현실이 우리나라 기업의 압축성장 과정에서 형성된 관행의 부산물임을 고려하면 단기간에 해결되기는 어렵다고 보는 것이 타당하다.

### 1.2.3 하청제조기업의 운영위기

#### 가. 비용절감의 한계

전술한 특징들은 구조적으로 하청제조기업의 낮은 수익성을 유발한다. 우선, 구매 개선으로 기대할 수 있는 원가절감이 제한적이다. 하청제조기업의 구매부문 성과가 크게 제약받는 이유 중 한 가지는 사급자재의 특성 때문이다. 그나마 위탁생산에 필요한 제품이나 자재가 유상사급인 경우, 가격결정권이 하청제조기업에 있으므로 대량구매에 의한 절감전략 (volume discount strategy), 구매선 다변화에 따른 절감전략(multi-sourcing strategy) 등을 구사할 수 있는 여지가 있다. 하지만 그 조차도 발주기업이 기대 절감분을 이미 파악하여 공급가에 반영하기 때문에 절감분 전체가 하청제조기업의 이익으로 실현되기는 어렵다. 제품이나 자재가 무상사급인 경우, 재고에 투자된 비용이 없으므로 유상사급 대비 비교적 작은 운전자본으로 기업을 운영할 수 있어 리스크가 작은 반면 제품 입고의 지시나 중단 권한이 없기 때문에 재고 유지비용이 지속적으로 발생하고 경제적인 규모의 생산수준을 유지하는 것이 어렵다.

하청제조기업의 구매 부문 성과가 제약받는 또 다른 이유는 정보력이나 협상력 측면에서 원청의 구매조직과 비교할 수 없는 열위에 있다는 점이다. 원청은 도급 중인 하청제조기업이 필요로 하는 모든 자재구매 수요를 합산한 총수요를 가정한 상태에서 가장 낮은 공급가를 제시하는 자재공급자에게 공급 자격을 부여하는 방법으로 구매정책을 실행할 수 있다. 이런 상황에서 하청제조기업은 자신의 정보력만으로 원청이 인정한 공급 적격업체보다 더 나은 업체를 찾는 것이 매우 어려워진다. 그러므로 원청에 대해 청구하는 자재비에서 이익을 남기려면 부적격 업체로부터 더 낮은 가격으로 자재를 공급받는 방법밖에 없다. 이는 생산품의 품질을 저하시킬 수 있기 때문에 신뢰상실의 위험을 감수해야 하므로 하청제조기업으로서 취하기 어려운 전략이다.

#### 나. 매출확대의 한계

발주 제품에 대해 공급가격을 인상하는 것은 수익성을 개선하는 가장 좋은 방법이다. 그러나 하청제조업의 경우 수급 가격에 경직성이 심한 편이다. 수급 가격의 경직성이란 하청제조기업과 원청이 단위제품 가격을 비용과 차익의 합계로 계약한 상태이므로 임금, 재료비 등 생산 요소에서 비용 상승 요인이 발생하여도 이를 가격에 반영하기까지 장기간이 걸려 한번 단가가 결정되면 쉽게 바뀌지 않는다는 속성을 말한다. 원청이 가격반영을 늦출 수 있는 이유는 하청제조기업이 원청의 권력 행사에 적절히 대처할 방법이나 보호책이 없기 때문이다 (김광명 외, 2019). 하청제조기업이 원청의 도급 대가 동결 의지에 대항하는 방법은 자동 연장되는 위탁 공급 계약의 자진 종료가 유일한 정도로 원청이 해당 제품의 유일한 수요자인 경우도 적지 않다 (정종채, 2017).

#### 1.2.4 스마트 공장 : 하청제조업의 위기극복 방안

지금까지 자동화 투자는 하청제조기업에서 환영받지 못하는 주제였다. 투자의 여력이 부족했을 뿐만 아니라 사소한 경영활동까지 발주사업자의 통제를 받는 현실이 그럴 필요성을 크게 느끼지 못했기 때문이기도 하다. 그러나 COVID-19로 외국인 입국이 어려워지면서 심화된 인력 수급 문제로 인하여 자동화 투자는 새롭게 조명되고 있다. 자동화는 투자 규모가 크고 높은 기술력이 필요 하기 때문에 중소기업의 스마트 공장 투자 대안으로 선택받지 못하는 경우가 많았다. 자동화 수준에서 세계적으로 인정받고 있는 우리나라 대기업 대비 중소기업은 현저한 차이를 보인다 (나형배, 황인극, 2018). 그러나 역설적이게도 가장 수익성이 낮은 자동차 하청제조기업이 가장 시급하게 자동화를 검토해야 할 필요성이 대두되고 있으며 그것은 전술한 공장 현장인력 수급의 문제가 향후에도 지속적으로 악화될 것으로 예상되기 때문이다.

외국인 노동자 수급 문제에 더하여, 최근 환경, 사회, 기업 지배구조 경영 (Environmental, social and corporate governance, ESG), 지속가능성 등이 사회적 화두가 되면서 유해 물질 배출 관련 요건이 강화되고 있다. 기존의 화학물질관리 관련법이 강화되어 유독성 물질을 취급할 때 유발되는 환경 및 산업 안전상의 피해를 줄이는 방향으로 노력할 것을 요구하고 있고, 기존 산업안전보건법은 중대재해기업처벌법으로 강화되면서 단시간 내 작업 환경의 개선을 요구하고 있다.

따라서 작업 환경이 상대적으로 열악한 하청제조기업의 경우, 과거처럼 자동화 투자를 투자 대비 수익성 관점으로 판단하던 시기는 지나갔고 이제는 생산 지속성 유지를 위한 필수 도구로서 판단해야 하는 환경이 도래한 것이다.

#### 1.2.5 4차 산업혁명과 하청제조기업의 미래

그렇다면 4차 산업혁명 시대에도 지속 생존하는 하청제조기업은 어떤 조건을 갖추어야 하는가?

첫 번째는 전반적인 업무 자동화라 할 것이다. 일반 사무업무는 단순 반복활동에서 인지적 노동을 자동화하며, 생산 현장은 노동자의 육체적 노동을 감소시키기 위한 협동 로봇 도입 등 물리적, 논리적 자율 로봇이 특정 임무를 사람의 개입 없이 수행하는 장면이 보편화할 것으로 전망된다.

두 번째는 기업의 관리 수준을 높이기 위하여 데이터를 다루는 비중이 현재보다 커지는 데 있다 할 것이다. 데이터의 생성부터 활용까지 전체 생애주기를 체계적으로 관리할 수 있는 역량은 비단 정보기술 (information technology, IT) 전담인력뿐만 아니라 일반 관리자까지 기본적으로 갖춰야 할 소양이 될 날이 머지않았다.

### 1.3 연구의 방향

본 연구는 투자 여력이 한정적인 하청제조기업이 스마트 공장을 구축하여 운영 시스템을 개선하는 방향으로 프로젝트를 추진했을 때 장기적으로 기대할 수 있는 운영관리 효과 및 재무적 효과를 정량적으로 산출하는 방법을 제시하는 것을 목표로 한다. 프로젝트가 달성해야 할 목표를 정량적으로 산출하는 것은 프로젝트 추진 과정에서 놓치지 말아야 할 요소들을 명확히 드러낸다. 나아가 정부로부터 스마트 공장 구축 지원을 받는 상황이라면 한정된 예산을 어느 방면에 집중해야 하는지 파악하는데 활용될 수 있을 것이다.

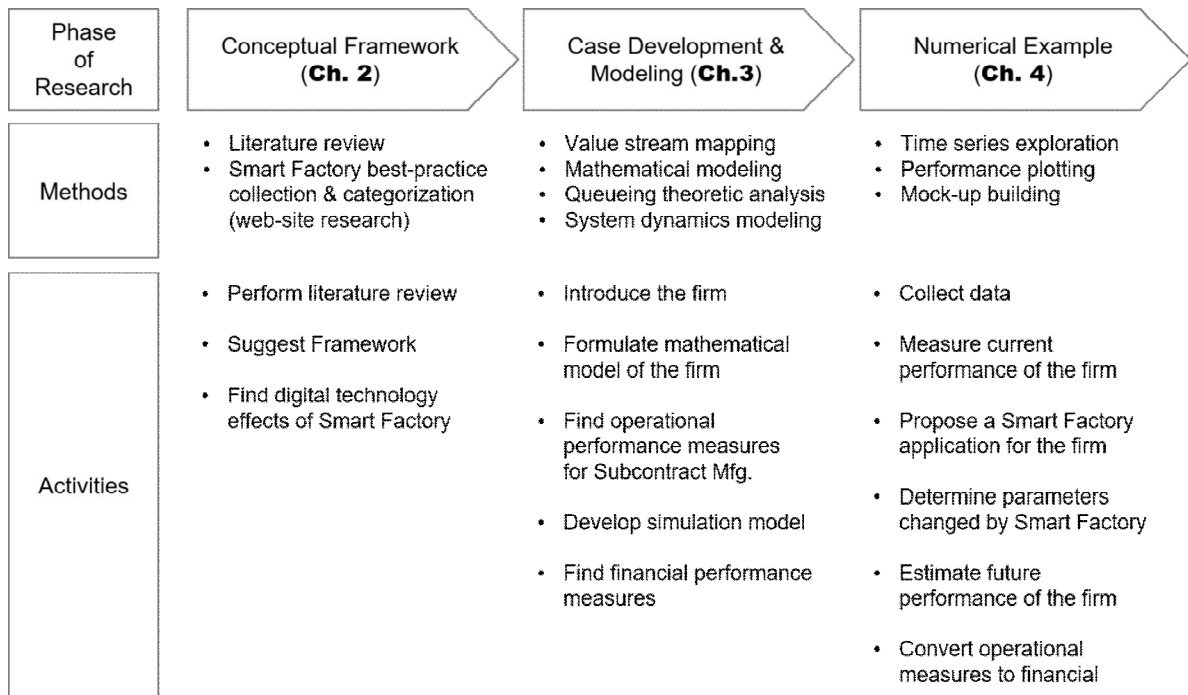
#### 1.3.1 연구의 방향

IT 시스템의 구축이 기업 성과에 미치는 정량적 효과는 1990년대에서 2000년대 초반까지 경영정보시스템 분야에서 활발한 연구가 진행된 바 있다. 해당 연구들을 (이후부터는 IT Value 연구라고 칭함) 종합하면 IT 시스템의 구축으로 기업 성과가 나타나는 과정은 IT 관련 자원과 상보적 자원이 기업에 투입되어 기업의 비즈니스 프로세스가 변화되고 이러한 변화에 이어 기업의 성과가 나타난다는 것이다 (Melville et al., 2004). 본 연구는 IT Value 연구에서 주장하는 IT 시스템 - 기업성과 원리를 참고하여 ‘디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크’를 구성하였다 (제2장 [그림 2] 참고). 그 프레임워크에 따르면 반드시 연구 대상 기업의 운영 시스템을 분석해야 하는데 하청제조업의 운영 관리에 관한 연구가 드문 관계로 본 연구는 연구 대상 기업 한 곳을 선정하여 그 기업의 사례를 바탕으로 하청제조업의 운영 시스템을 연구할 수 있었다.

연구의 대상이 되는 기업은 자동차 산업에 종사하는 하청제조기업 Hankoat로서, 국내 굴지의 자동차회사의 (H사) 계열사인 1차 업체를 (M사) 위해 차체 판넬의 도장 및 포장 작업을 위탁, 수행하는 업체이다. Hankoat의 현장은 중후장대한 설비에 온종일 차체 부품과 같은 중량물을 컨베이어에 매달고, 떼어내고, 옮겨 담거나 팔레트에서 꺼내는 근육노동이 주로 수반되는 곳이며, 현장 노동의 많은 부분을 외국인 노동자들이 담당하고 있다. 최근 최저임금의 상승과 COVID-19 확산으로 인한 인력 수급 문제로 어려움을 겪은 바 있으며, 현재 현장의 대부분을 차지하는 외국인 노동자의 수급은 앞으로도 계속 문제가 될 것으로 예상하고 있다.

### 1.3.2 본론의 구성

본론은 세 개의 장(章, chapters)으로 이루어져 있으며 연구의 목적을 위해 개념적 프레임워크를 제안하고 실제 현장의 데이터로 그 프레임워크를 수행한 예시를 보임으로써 프레임워크의 유용성을 입증하는 구성을 하고 있다. 세부적 사항은 [그림 1]과 같이 개념적 프레임워크를 수립하는 과정 (Conceptual Framework), Hankoat의 사례 개발을 통해 하청제조기업의 수리 모형과 시뮬레이션 모델을 개발하는 과정 (Case Development & Modeling), Hankoat의 운영 현장으로부터 수집된 데이터와 시뮬레이션 모델을 이용해 현재 상태에서 스마트 공장이 도입된다면 나타날 운영 성과와 재무적 성과의 정량적 변화를 산출하는 단계로 (Numerical Example) 이루어진다. 각 단계별로 단계명 하단 괄호 속에 대응되는 본론의 장 번호를 표시하였다.



[그림 1] 본론의 구성

‘서론’ 이후 논문의 구성을 상세히 살펴보면 제 2장에서는 세가지 분야의 문헌연구를 수행하고 그 결과로 수립된 개념적 프레임워크를 제시한다. 첫 번째 분야의 문헌 연구는 (2.1절) IT Value와 관련된 것으로 일반적 제조기업을 위한 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크를 수립하기 위해 수행한다. 두 번째 문헌연구는 (2.2절) 하청제조기업의 특수한 환경을 잘 반영할 수 있는 재고-생산 관리 수리 모형에 관한 논문들을 살펴본다. 마지막 세 번째 문헌연구는 (2.3절) IT 신기술과 재고-생산 모형에 관한 비교적 최근의



연구들을 살펴본다. 이러한 문헌연구를 바탕으로 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크를 수립하고 그 내용을 자세히 살펴본 후 제 2장의 마지막 부분에서 스마트 공장의 현황을 탐구하고 스마트 공장의 도입이 가져다줄 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크의 한 요소로서 '디지털 효과'의 실체에 대해서 상술한다.

제 3장에서는 사례 연구와 수리모형, 성과척도, 시뮬레이션 모델, 운영성과 척도의 재무적 성과 척도 변환 방법이 소개된다. Hankoat의 공정이 린 경영시스템에서 주로 사용하는 공정 시각화 도구인 VSM (value stream mapping) 기법을 사용해 소개되고 생산 계획 예제를 일반화하는 과정을 통해 하청제조기업의 이익극대화 모형이 수리적으로 제시되기에 이른다. 또한, 운영 시스템의 성과 척도에 대해서 규정하고 이어서 시스템다이내믹스를 활용한 시뮬레이션 모델의 개발과정이 소개된다. 또한, 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크의 마지막 단계인 운영 지표의 재무적 지표의 전환방법에 대해서 논한다. 제 4장에서는 Hankoat의 데이터를 활용해 프레임워크를 따라가며 스마트 공장의 도입 시 정량적 효과를 산출하는 예시를 보여준다. 스마트 공장은 다양한 솔루션의 집합체이며 기업은 각자의 상황에 맞춰 정보통신기술을 취사선택 및 조합할 필요가 있다. Hankoat에서는 현장의 상황을 한눈에 보여줄 수 있는 디지털 트윈 기술을 구현하는 방향으로 스마트 공장을 구축할 필요가 있는데 그 배경과 디지털 트윈을 핵심으로 하는 스마트 공장이 구축된 이후 시스템 설정이 어떻게 변화되는지에 대해서 논한다. 재무적 성과로의 환산을 끝으로 제4장을 마무리하고 제 5장에서는 전체 연구의 결론을 도출한다. 본 논문의 결론에서는 연구의 요약, 시사점, 그리고 한계점 및 향후 연구 방향을 논한다.

본 연구에서 수립된 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크는 4차 산업혁명 시대에도 생존하기 위해서 변화를 수용해야만 하는 상황에 놓인 Hankoat같은 하청제조기업들이 비용효과적인 스마트 공장 구축 프로젝트를 기획하고자 할 때 참고할 수 있을 것이다. 또한, 프레임워크를 수행하는 과정에서 개발한 하청제조기업의 이익극대화 수리 모형은 운영 관리의 다양한 관점에서 (즉, 제품대기 공간의 경제적 가치 산출, 임가공 수요 예측 정확도 향상 방법, 최대생산능력에 영향을 주는 작업자 및 설비 이슈 등) 후속 연구의 여지가 있어 관련 연구의 활성화에 기여할 것으로 전망된다.

## 2. 디지털 전환 운영성과 추정 프레임워크

### 2.1 기업의 운영 성과와 정보기술의 효과에 관한 기존 연구

기업에서 프로젝트를 진행할 때는 기업의 현재 상태와 구축 후 미래 상태를 비교할 수 있는 척도의 필요성이 대두된다. 많은 경영 전략 문헌이 기업의 성과 측정에 활용 가능한 도구들을 제안하고 있다. 먼저, Kaplan과 Norton (1996)은 경영 전략의 일관된 실행이라는 관점에서 유용한 균형성과지표를 (balanced score card, BSC) 개발하였다. 이는 경영 전략을 조직의 상부에서부터 탑다운 방식으로 전개하여 최종적으로 조직구성원 개인 단위의 핵심성과지표 (key performance index, KPI)까지 도출할 수 있는 프레임워크를 제시한다. Storey (1994)는 BSC가 중소기업에 적용되기에는 너무 방대한 프레임워크임을 지적하였다. Bianchi (2015)는 중소기업들도 경제적 전환기에 생존하기 위해서는 시스템을 도입하여 성과관리를 체계적으로 수행해야 한다고 주장했다. 특히 중소기업의 성과관리 시스템은 작은 조직 내 개인 간의 긴밀한 공조와 시간적인 행동의 변화를 성과와 잘 연결할 수 있어야 한다고 보았다. 박기석, 이갑두 (2017)는 기업특성과 성과관리시스템의 영향관계를 검증한 결과 기업 특성에 따른 적절한 성과 척도의 수립은 긍정적 경영 성과를 불러온다는 실증적 근거를 제시하였다. 황규선 등 (2012)은 제조실행시스템 (manufacturing execution system, MES)의 성과 측정을 위한 프레임워크를 개발함으로써 중소기업의 성과관리 범위를 현장으로 축소하는 것이 가능함을 보였다.

IT 시스템의 구축에 따른 운영 성과 (operational performance)의 변화는 학계의 지속적인 관심 분야였다. 전사적자원관리 시스템 (enterprise resource planning, ERP) 도입이 운영 성과에 미치는 영향을 탐구한 실증 연구들은 ERP의 구축이 시간이 경과함에 따라 구축 기업의 운영 성과에 긍정적인 영향을 주며 (McAfee, 2002), 생산성의 증가와 자본 시장에서 기업 가치의 증가를 증명하였다 (Hitt et al., 2002).

McAfee (2002)는 미국의 한 첨단기술 제조회사의 ERP 도입 사례를 자연실험 (natural experiment) 과정으로 인식하였는데, ERP 도입이라는 전격적이고 전사적인 사건을 '처리'로, 고객 주문 충족 정도를 '효과'로 간주하였다. McAfee (2002)는 사례 기업이 큰 폭의 비즈니스 프로세스 변화를 수반하지 않은 상태에서 ERP를 도입하자 도입 직후에는 리드 타임 및 적시 공급 부문에서 새 설비를 작업 현장에 도입했을 경우와 유사한 "성과 저하(performance dip)"를 겪었지만 몇 개월이 지난 후에는 해당 영역의 운영 성과에 있어 도입 이전 대비 상당한 개선을 달성하였음을 확인하였고, 이러한 패턴이 주문, 생산 및 재고량, 인원수, 신제품 출시건수와 같은 다른 요인으로는 설명할 수 없음을 보였다. 이로써 ERP의 도입이 운영 성과 향상이라는 결과의 원인이었음을 입증하였다.

Cotteleer와 Bendoly (2006)는 ERP 시스템 도입이 운영 성과에 미친 영향을 파악하기

위한 실증적 연구를 수행하였다. 저자들은 사례기업의 중단 데이터 분석을 실시하여 사례기업이 추구한 ERP 구축 목표 즉, '주문 리드 타임 (order lead time)' 의 향상<sup>2)</sup>이 시스템 구축 직후부터 나타났음을 증명했다. Cotteleer와 Bendoly (2006)는 두 가지 원천의 데이터를 수집 하였다. 첫째는 회사 문서 검토 및 현업 담당자, 프로젝트 참가자, 시스템 사용자 등과의 반구조화 면접을 (semi-structured interview) 통해 시스템 개발, 교육, 구축 및 구현 후 지원 등의 분야에 관한 것이었으며 이러한 인터뷰는 사례를 개발하는 데 사용되었다. 두 번째는 회사의 운영 성과 척도들이었다. 사례에서는 해당 기업이 ERP 시스템 도입을 통해 가장 큰 변화를 준 글로벌 판매-재고-생산 업무 프로세스를 소개하였다. 이 연구에서 사용된 정량적 운영 성과 척도들은 ERP 구축 전 12개월, 구축 후 24개월간의 리드 타임과 재고 데이터 등이다. 요인형 변수만 사용하는 분산분석법(analysis of variance, ANOVA) 대신 일일주문량, 일평균주문량 및 일평균주문금액과 같은 연속형 변수 또한 모델에 포함할 수 있는 공분산 분석법을 (analysis of covariance, ANCOVA) 사용하여 사전, 사후 차이를 명확히 보임으로써 ERP 구축 이전 대비 구축 후에 상당한 운영 성과 향상이 있었음을 보였다.

Melville et al. (2004)은 IT가 어떤 메커니즘 (mechanism)을 통해 조직의 성과에 기여하는지 그 중요성에 비해 연구원, 관리자, 정책입안자들이 아는 것과 모르는 것에 대한 불확실성과 논쟁이 있는 상황에서 그때까지의 IT와 조직 성과 간의 관련성을 연구한 문헌을 검토하였고, 연구마다 핵심 개념을 (construct) 구성한 방법과 개념 간의 상호관계에 대해 다양한 의견이 존재함을 발견하였다. 이에 Melville et al. (2004)은 문헌 연구를 통해 IT가 기업의 운영에 가치가 있지만, 다만 가치가 있을 수 있는 정도와 영역은 내부 및 (한 기업과 그 기업의 거래 파트너들의 상보적 조직 자원은 물론 경쟁 및 거시적 환경을 포함해) 외부 요인에 따라 달라진다는 것을 발견하였다. 이들은 기업의 자원관점 (resource-based view)에 기초한 'IT 비즈니스 가치 통합모델 (integrative IT business value model)'을 개발하여 IT 비즈니스 가치와 관련된 당대의 다양한 연구들을 하나의 틀로 집대성하였다 (Melville, 2004, P.283). 자원관점은 고전 경제학의 요소 부존 이론과 유사한 패러다임으로, 어떤 기업이 경쟁에서 우위에 있는 이유는 다른 기업에게는 결핍된 자원을 보유하고 있기 때문이라고 설명하는 이론이다. 이 관점은 기업을 하나의 관리 프레임워크로 구조화된 자원의 집합체로 파악한다 (Penrose와 Penrose, 1995). Melville et al. (2004)은 관심 기업 (focal firm) 내의 자원을 IT 관련 자원과 (IT 인력수, 공유된 IT 기술과 프로젝트 운용 능력 등) 상보적 자원 (조직구조, 정책, 사규, 사풍, 현장의 관행)으로 나누고 이들이 비즈니스 프로세스에 영향을 미치고 비즈니스 프로세스가 비로소 성과를 내는 식으로 작동한다고 주장했다. 저자들은 IT와 운영 성과 (운영관리 지표 및 재무적 지표로 대표되며 연구에서 사용된

2) "사례 기업에서 주문 리드 타임이 현재로부터 하루가 감소하면 약 11백만불의 운전자본이 유동화될 것으로 기대되었다" (Cotteleer, Bendoly, 2006, P.650)

데이터에 따라 달랐음) 간의 긍정적인 연관성을 탐구한 복수의 실증연구를 종합하여 이러한 결론을 도출하였다. 몇몇 실증연구는 운영 개선이 재무성과에 미치는 긍정적 영향이 있다고 주장하였다(Bharadwaj et al., 1999; Brynjolfsson et al., 2002). 그러나, 운영 개선이 항상 재무적 성과로 이어지지 않았던 경우도 발견할 수 있었다 (Barua et al., 1995; Hitt, Brynjolfsson, 1996). 저자들은 후자에 대해서 “관심 기업이 IT 도입으로부터 오는 혜택 전부를 누리지 못해서 나타난 결과일 수도 있다” 라고 설명하였다 (Melville et al., 2004, P.300).

Madapusi와 D'Suza (2012)도 ERP 시스템 구현에 따른 운영 성과의 변화를 조사하였다. 저자들은 ERP 시스템 구현 현황과 운영 성능 간의 관계를 조사하기 위해 문헌 및 이론 기반의 모델을 개발하였다. 저자들은 회계, 생산, 재고 등 14개의 ERP 모듈이 정보 가용성, 정보의 품질, 표준화, 재고관리, 적시 공급에 변화를 주었는지를 203개 인도 기업에 대해 설문 조사를 수행하여 명제를 검정하였으며 그 결과 각 ERP 모듈의 구현이 운영 성과에 미치는 영향이 다양하다는 점을 발견하였다.

Elgazzar et al. (2012)은 공급망 관리 프로세스<sup>3)</sup> (supply chain processes)의 성과를 회사의 재무적 성과에 연결하는 성과 측정법을 개발하였다. 개별 공급망 관리 프로세스 성과 척도가 재무적 성과에 대해 미치는 중요도 가중치를 계층적 의사결정 모델을 (analytic hierarchy process, AHP) 사용해 부여하였다. 또한, 공급망 재무 연관 지수를 (Supply Chain Financial Link Index, SCFLI) 도입하여 공급망 관리 프로세스가 재무적 성과에 미치는 영향을 지속적으로 피드백 받을 수 있는 방안을 만들었다. 저자들은 공급망 관리 프로세스의 성과가 재무적 성과와 연결이 어려운 이유로 회사의 주된 장기 재무 목표인 이윤 극대화가 의미 있는 단기 성과로 전환되는 과정에서 측정, 모니터링이 가능하고 목표치 설정이 가능하고 매일의 활동성과를 제대로 측정할 수 있어야 한다는 지표로서의 요건이 충족되지 않는 데 있다고 지적하며 공급망 성과와 회사의 재무성과를 측정하는 데 사용되는 전체 지표 간의 연관성을 이해하는 것이 선행되어야 한다고 주장했다. Elgazzar et al. (2012)이 사용한 표준 공급망 관리 프로세스 측정법은 SCOR (supply chain operations reference) 모델로 공급망 관리 프로세스의 신뢰성 (reliability), 응답성 (responsiveness), 기민성 (agility), 비용 (cost), 공급망 자산의 관리 (asset management)의 영역을 평가할 수 있는 표준 척도들을 정의해 놓은 것이다. 또한, 재무적 지표로는 듀퐁 비율 (Dupont ratio)이라고 일컬어지는 일종의 ROA를 (return-on-asset) 척도로 사용했다. ROA는 매출, 비용 및 총자산으로 계산이 가능하며 기업에서는 수익성과 효율성 지표로 흔히 사용된다. SCOR가 제공하는 10개의 표준 지표는 완전주문충족, 주문충족주기, 긍정적 공급망 유연성, 긍정적 공급망 적응력, 부정적 공급망 적응력, 최대손실액, 공급망 관리 비용, 매출원가, 현금전환 주기, 공급망 고정 자산 순이익률, 운전자본 순이익률 등이다 (김범석 등, 2013). 이러한 성과 척도들은

---

3) plan, source, make, deliver, return 을 일컫는다

‘핵심성과지표’로 (key performance indicators, KPI) 알려진 ‘레벨 1’ 척도들로서 전략적 관점에서 전체 공급망의 건진성을 측정한다 (APICS, 2017). Elgazzar et al. (2012)은 다중 의사결정 모델의 일종인 계층적 의사결정 모델을 활용해 SCOR의 척도들과 듀퐁 비율을 가중치 매트릭스로 연결하였다. 계층적 의사결정 모델은 쌍대비교와 (pairwise comparison) 의사결정 문제의 계층화를 (hierarchy process) 특징으로 하며 복잡한 상황에서 그룹 의사결정을 용이하게 하는 방법으로 Saaty가 1970년대에 개발하였다. Elgazzar et al. (2012)은 이러한 프레임워크를 사용해 실제 회사에 적용할 수 있는 예를 제시하였다. 즉, 저자들은 (1) 평가 단계에서 현재 시점의 재무적 성과를 측정한 뒤 공급망 프로세스의 성과 지표 간 상대적 중요도 가중치를 결정하고 현재의 공급망 관리 전략의 효율성과 효과성을 측정하였으며, (2) 통제 단계에서는 회사의 재무적 우선순위에 따라 새로운 전략을 수립하였고, (3) 모니터링 단계에서는 새로운 공급망 관리 프로세스의 효율성과 효과성이 기업의 재무적 전략 목표 달성에 기여하고 있는지를 평가하고, (4) 종합적으로 공급망 관리 프로세스의 기업 재무 성과 기여도를 측정하는 전체 평가 사이클을 보여주었다.

## 2.2 재고-생산 모형에 대한 기존 연구

본 절에서는 하청제조기업의 운영환경인 불확실한 수요 조건에서 재고-생산 계획 문제에 대한 문헌 연구를 수행한다. 특히 대표적 모형인 뉴스벤더모형을 (news vendor model) 중점적으로 살펴본다. 뉴스벤더모형은 판매용 자산의 초과 확보로부터 야기되는 비용과 (overage cost) 부족 현상으로 야기되는 비용 (shortage cost)의 상충관계를 아래 식 (1)과 같이 수식화한 것으로 재고, 현금, 생산능력 및 그 외 다양한 경영 문제를 정의하는 데 유용하다 (Van Mieghem, Rudi, 2002).

$X$  = 수요량,  $Normal(\mu, \sigma^2)$ 를 따른다.

$G(X) = P(X \leq x)$  = 확률변수  $X$ 의 누적확률 분포

$c_o$  = 재고 과다시 발생하는 비용 (재고 한 단위당 비용)

$c_s$  = 재고 부족시 발생하는 비용 (충족하지 못한 수요 한 단위당 비용)

$Q^*$  = 초과 및 부족 비용의 합을 최소화하는 생산량

$$G(Q^*) = \frac{c_s}{c_o + c_s} \quad (1)$$

식 (1)은 단일 기간을 가정한 뉴스벤더모형의 일종인데 수요가 정규분포를 따를 때 적정 생산량  $Q^*$ 를 결정하는 문제이다. 식 (1)에서 생산량이 부족하여 판매하지 못한 경우 손실은 (제품 1 단위당)  $c_s$ 가 발생하는데 이 손실 비용이 증가하면  $Q^*$ 가 증가한다. 반대로 제품 1 단위당 발생하는 재고 비용,  $c_o$ 가 증가하면  $Q^*$ 가 감소한다.  $Q^*$ 는  $\mu$ 가 증가함에 따라 증가하며,  $\sigma$ 의 증감에 대해서는 식 (1)의 우변이 1/2 보다 크다면  $Q^*$ 가 증가함수가 되고, 1/2 보다 작으면 감소함수가 된다 (Hopp, Spearman, 2000).

Harrison과 Van Mieghem (1999)은 기존의 뉴스벤더모형을 복수의 제품에 대해 복수의 제품 처리 (생산이나 배송 등을 의미) 포인트가 존재할 때의 경우로 확장시킨 다차원 뉴스벤더모형을 (multidimensional news vendor model) 제안하였으며, Van Mieghem과 Rudi (2002)는 여기에 복수의 저장 창고, 복수의 생산 및 물류 시설이 (재고) 자산을 교차하면서 수요를 충족시키는 네트워크를 이루고 있는 점을 추가로 가정하여 뉴스벤더망 (news vendor network) 문제를 제시하였다. 뉴스벤더망 문제에서는 가정을 추가함으로써 단일 기간 문제를 복수 기간 문제로 확장하는 것이 가능하다. 뉴스벤더망 문제의 가정사항으로는 다른 재고 문제와 마찬가지로 공급이 외생변수라는 점 외에도 리드타임이 일정하고 작다는 점, 최종 제품 수요의 분포는 주문 활동 및 생산 능력 투자 이전에 알 수 없다는 점과 실제 수요에 대한 지식이 모두 획득된 후에 생산 활동이 이루어진다는 점 등이 있다 (Van Mieghem, Rudi, 2002).

Kogan과 Portougal (2006)은 총괄계획 (aggregate planning) 상황에서 뉴스벤더모형 적용을 시도하였다. 저자들은 주생산계획 (master production schedule, MPS)<sup>4)</sup>을 의사결정변수로 설정하였다. 주생산계획의 달성은 실제 현장에서 기계 정지 시간, 품질문제, 자재 공급 문제 및 정비 문제로 인해 불확실하다. 따라서 실제 생산량이 주생산계획 대비 부족하거나 (shortage) 남는 (overage) 상황이 발생하게 되며 이는 뉴스벤더모형이 가정하고 있는 상황과 유사하다. 주생산계획의 달성 여부에 따라 생산성과 연계된 비용, 초과근무 비용 및 초과/잉여 생산 비용 등이 발생하기 때문에 이들 비용이 반영된 목적함수를 최소화할 수 있는 주생산계획은 최적의 총괄계획이 된다. 당기에 달성하지 못한 생산목표가 차기로 이월된다는 제약조건 때문에 Kogan과 Portougal (2006)의 연구는 현실적 조건을 간소하게 반영한 동태적 (dynamic) 문제에 뉴스벤더모형을 적용한 사례가 된다.

Matsuyama (2006) 또한 복수기간 뉴스벤더 문제를 연구하였는데 전통적 뉴스벤더문제가 불확실한 수요라는 조건 하에 한 번의 판매기회가 주어졌을 때 최대한의

4) MPS는 보통 1주나 1일 (weekly or daily) 생산계획에 해당하고 총괄계획은 월단위 (monthly) 등 MPS 보다 장기적 생산계획에 해당한다. 총괄계획을 분해하면 MPS가 되고 거꾸로 MPS를 합산하면 (aggregate) 총괄계획이 된다.

이익을 실현하기 위한 최적의 재고 정책을 찾고자 하는 판매자 (retailer)의 고민을 해결하는 데 사용되었다면, 복수기간 뉴스벤더 문제의 특징은 판매기회가 계속해서 발생하고 직전기 판매 후 남은 재고나 충족하지 못한 수요를 고려해야 한다는 조건을 추가로 고려하도록 변형된 것이라는 차이점을 강조하였다. 복수기간 문제가 되면 뉴스벤더모형은 더 이상 주문량을 결정하는 문제가 아니라 매 1기 기초재고 수준을 계획하는 문제로 치환할 수 있음을 보이고 사례를 제시하였다 (Matsuyama, 2006).

Bradley (2004)는 복수기간의 확률적 수요를 초과근무로 대응할 것인지 외부업자에게 도급하여 대응할 것인지 결정해야 하는 어느 제조공장의 생산 및 재고 시스템을 모형화하였다. 브라운 근사법 (Brownian approximation)이라는 수치 해석적 방법을 사용하여 외부업자에게 지급할 도급 비용과 완제품 재고 비용을 최소화하는 최적 시점을 찾아내는 생산 및 재고 통제 정책을 제시하였다. 또한, 브라운 근사법을 적용한 2중 베이스 스톡 (dual base-stock) 모형의 생산 능력 산출 값과 대기행렬 (queueing) 모형으로부터 산출한 적정 생산능력을 비교하는 방법을 통해 제안한 모형의 정확성을 검증하였다.

## 2.3 IT 신기술과 재고-생산 모형

### 2.3.1 IT 신기술이 재고-생산 문제의 해법에 사용된 연구

Gijsbrechts et al. (2020)은 심층강화학습(deep reinforcement learning, DRL) 알고리즘이 재고 정책 문제 중 세 가지 문제 즉, 판매기회상실 (lost-sales), 이중 조달 (dual-sourcing), 다단계 재고관리 (multi-echelon inventory management) 등 유형의 문제를 해결하는 데 효과적으로 사용될 수 있음을 입증하였다. DRL은 신경망의 일종으로 마코프 의사결정 프로세스 (Markov Decision Processes, MDPs)의 근사치를 구하는 데 사용할 수 있기 때문에 순차형 (sequential) 의사결정 문제의 정책 결정에 적용이 가능하며, 인공지능에 대한 대중의 관심을 촉발한 알파고 (Alpha-go)의 근간을 이룬다 (Gijsbrecht et al., 2020). Gijsbrechts et al. (2020)이 사용한 방법은 신경망을 그 세 가지 문제를 풀 수 있도록 학습시킨 뒤 각 문제의 가장 최신 휴리스틱 솔루션을 (heuristic solution) 벤치마크 삼아 최적해와의 차이 등의 성능을 (performance) 비교한 것이다. 저자들은 신경망의 초기값을 세팅하는 데 드는 시간을 제외하면 DRL이 휴리스틱 솔루션의 좋은 대안이 될 수 있다고 평가하였다. 휴리스틱 솔루션은 주로 특정 문제를 푸는 데만 국한해서 좋은 성능이 발현될 뿐이고 강력한 가정사항들을 감안하지 않으면 안 되는 반면 DRL은 범용 솔루션이기 때문이다 (Gijsbrecht et al., 2020).

### 2.3.2 IT 신기술로 제기된 새로운 문제들에 대한 연구

Olsen과 Tomlin (2020)은 4차 산업혁명 시기의 신기술들이 운영 관리 부문 연구에 미칠 수 있는 변화에 대하여 정리하였다. 아직 4차 산업혁명의 대표적 일반 목적 기술이 부재한 상황에서 다양한 기술들 (3D프린팅, 사물인터넷, 블록체인, 로봇틱스 및 AI 등)에 대해 각각 평가하였으며 기존의 운영전략은 해당 섹터의 고객을 만족시키는데 비용, 품질, 유연성, 스피드의 네 가지 목표 모두를 만족시킬 수 없으므로 우선순위를 정해야 했지만 신기술은 그 전략 간의 교환관계가 약해지거나 없어지게 만들 수도 있다는 점을 강조하였다. 예를 들어 3D프린팅과 로봇틱스의 조합은 최소 경제적 생산량을 (minimum economic production quantity) 더욱 낮게 만들면서도 높은 유연성과 빠른 출시속도를 동시에 달성할 수 있게 할 것으로 예측된다 (Olsen과 Tomlin, 2020, P.121).

Agatz et al. (2016)은 라스트마일 배달 (last-mile delivery)에 택배 드론을 사용하는 아마존(Amazon)의 아이디어를 차용하여 드론 외판원 문제 (Traveling Salesmen Problem with Drones, TSP-D) 문제를 창안하였다. TSP는 다수의 배송목적지를 한 번의 여행으로 가장 효율적으로 갈 수 있는 여정을 계획하는 전통적인 정수계획법 (Integer Programming, IP) 문제이다. TSP-D는 트럭이 다수의 광역 센터에 도착한 이후 최종목적지 (즉, 고객의 대문 앞)까지는 드론이 남은 미션을 수행하는 방식의 택배서비스를 가정하는 정수계획법 문제이다. 문제를 정의한 후 저자들은 몇 가지 휴리스틱 솔루션을 제안하였으며 컴퓨터 실험을 통해 트럭만으로 배달할 경우와 트럭-드론 조합으로 배달할 경우를 비교하여 후자의 경우에서 큰 폭의 성과개선이 있었음을 보여주었다.

## 2.4 디지털 전환 운영성과 추정 프레임워크

### 2.4.1 디지털 전환 프로젝트의 채택 기준

어떤 기업이 순현재가(net present value, NPV)로 구축비용  $K_{NPV}$ 가 소요되는 디지털 전환 프로젝트를 검토하고 있다고 하자. 해당 프로젝트가 완료된 후  $i$ 년도에 기존 방식 운영 대비  $R_i$ 의 현금흐름 증가분을 실행 기업에 기여할 것으로 기대된다면, 그 기업의 최고경영진(top management team, TMT)은 식 (2)를 평가하여 참이면 투자안을 채택하고 거짓이면 투자안을 기각할 것이다.



$K_{NPV}$  = 순현재가치로 계산한 구축비용

$i$  = 1년 단위의 기간, 프로젝트의 효과는  $i = 1$  부터 나타난다고 가정

$R_i$  =  $i$ 번째 연도에 프로젝트의 성공으로 인해 발생하는 순효과의 현금등가

$k$  = 연간이자율

$$K_{NPV} \leq \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R_i}{(1+k)^i} \quad (2)$$

예를 들어 디지털 전환의 일환으로 한 회사가 어떤 단순 반복 사무 업무를 자동화하는 프로젝트를 검토 중이라고 하자. 그 사무담당자의 역할을 인공지능(AI)이 대신할 수 있고 자동화에 필요한 데이터 수집비, AI가 작동하기 위한 환경 유지비 등은 없다고 가정하면  $R_i$ 는 현재 해당 직무 1인의 연봉에 해당할 것이다. 이때  $K_{NPV}$ 가 중급 인공지능 기술자 한 명을 1년간 채용하는데 필요한 인건비로 예상된다면 식 (2)를 평가하는데 필요한 모든 정보가 확인되므로 투자 여부를 판단하는데 용이할 것이다.

그런데 기업의 생산 및 서비스 시스템은 4M 즉, 사람(man), 기계(machine), 자재(material), 방법(method)의 복잡한 상호 작용의 결과물이기 때문에 많은 경우  $R_i$ 의 추정이 쉽지 않다. 디지털 전환을 고민하는 기업이라면 해당 업종에서 오랜 기간 사업을 영위해 왔을 것이므로 나름의 시스템이 확립되어 있을 것이다. 그런 확립된 조직에서는 아무리 단순 반복사무 업무로 평가받는다 하더라도 한 사람이 주당 40시간 이상 매달리고 있는 어떤 사무 업무가 한 번의 성공적인 자동화 프로젝트로 인력이 필요 없는 업무로 즉각 전환할 수 있다는 것은 기대하기 어렵다. 하지만 조직 전체 관점에서 주 40시간에 해당하는 근로시간을 (단위: man×hour) 아낄 수 있는 프로젝트를 찾는 것은 가능할 것이다. 즉, 근로자가 100명 있는 조직이라면 근로자 한 명의 하루 평균 대기시간에서 5분씩만 줄이면 가능하다.

#### 2.4.2 프레임워크 구성요소

만약 어떤 디지털 전환 프로젝트 (또는 맥락에 따라 스마트 공장 구축사업 프로젝트)가 조직의 운영 성과 척도의 증감에 어떻게 영향을 주는지 그 관계가 파악되어 있고 운영 성과를 재무적 성과로 전환하는 함수가 알려져 있다면  $R_i$ 를 추정할 수 있다. [그림 2]는 다양한 운영 시스템과 디지털 전환 프로젝트에 적용할 수 있는 프레임워크를 도식화한 것이다. 본 프레임워크를 검토할 때 유의해야 할 점은 개별 상자 그림이 절차/활동을 뜻한다는 점이다. 예를 들어 ‘Current Operation Performance Measures’ 상자는 그 값을 산출하는 절차/활동을 의미한다<sup>5)</sup>.

프레임워크는 디지털 기술 도입의 전후에 운영 시스템에 일어난 변화가 운영 성과 척도 및 재무 성과 척도에 영향을 미치는 과정을 반영한다. 예를 들어, 한 회사가 사급자재의 입고전표 처리 업무에 바코드를 도입하는 프로젝트를 진행하는 상황을 상정해보자. 현재 입고전표 처리 업무에 두 사람의 담당자가 할당되어 있으며 한 사람이 스프레드시트에 수기식 전표를 옮겨적는 디지털화 작업을 수행하고 다른 담당자는 ERP와 같은 기간 시스템을 이용해 사급자재 재고관리 업무를 전담하는 형태로 일하는 것이 현재 설정 (current configuration)이 된다. 이제 바코드 시스템 도입으로 입고전표의 다양한 내용을 입력하는 작업이 바코드를 리딩하는 동작 한 번으로 순식간에 이루어진다면 이는 ‘입력 속도의 증가’라는 디지털 기술의 효과 (digital technology effect)가 발생하는 것이다. 바코드 시스템은 성공적으로 도입되어 두 사람의 업무 처리 방식이 변하게 된다. 예를 들면 바코드 입력 작업과 시스템 재고관리 업무를 한 사람이 맡고 다른 사람은 사급자재의 실물 검수 작업을 수행하는 식으로 역할이 바뀔 수 있다. 이때 변경된 업무 처리 방식이 바로 변화된 설정 (changed configuration)이 되는 것이다. 설정이 변화하면 그에 따라 운영 성과지표가 바뀔 수 있으며 이는 재무 성과 지표의 변화 또한 일으킬 수 있다.

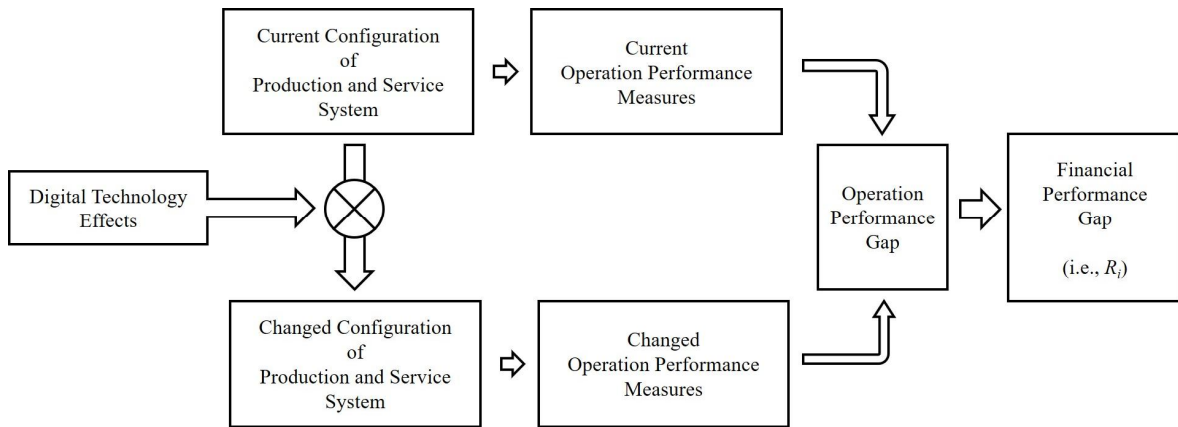
본 연구는 만약 어떤 회사에 스마트 공장이 도입된다면 그 예상 효과는 어떤 것인가를 예측하는 사고 예상질문 분석결과치를 (what-if analysis result) 획득하는 것이 하나의 목표이므로 [그림 2]의 ‘system’은 모두 현실 시스템의 동작을 모사하는 모델이다. 용어의 혼동을 피하기 위해 현실의 생산 및 서비스 시스템을 (즉, 운영 시스템) 지칭할 때는 ‘시스템’으로, 현실 ‘시스템’의 시뮬레이션 모델은 ‘모델’로 지칭하기로 한다. 또한 ‘모형’과 ‘모델’이 비록 같은 뜻이지만 본 논문에서는 수리적 모델의 이름은 끝에 ‘모형’으로 시뮬레이션 모델은 이름 끝에 ‘모델’로 통일하였다.

### ● Current Configuration of Production and Service System

현재 시스템을 시뮬레이션 모델로 추상화하는 과정이다. 시뮬레이션 모델은 디지털 기술효과에 (Digital Technology Effects) 의해 변화될 수 있는 모수를 (parameter<sup>6)</sup>) 가지고 있다. 또한, 다음 단계에서 등장하는 운영 성과 척도를 출력값으로 가져야 한다. 이 단계에서 시스템을 하나의 관점으로 모형화해야만 실적치를 이론치와 비교할 수 있게 되어 시스템에 대해 변화를 주었을 때 그 효과를 파악할 수 있다. 그런데 기업의 생산 및 서비스 시스템은 매우 다양하다. 본 연구에서는 대기행렬 시스템 (queuing system) 이론에서 제시하는 관점을 도입하여 실제 기업의 시스템을

5) 상자 안에 들어갈 정확한 내용은 “Determine Current Operation Performance Measures” 정도 될 것이다. 이렇게 해당 단계의 산출물 중심으로 다이어그램을 구성하면 생소하거나 복잡한 산출물과 모델 간의 관계가 명확해지는 장점이 있다.

6) parameter의 예로 리드타임, 안전 재고, 자원제약식에서 최대 투입 가능 자원의 양 등을 들 수 있다.



[그림 2] 디지털 전환 운영성과 추정 프레임워크

모형화하고자 한다. 한 기업의 생산 및 서비스 시스템을 가장 단순한 형태로 가정하기 위하여 하나의 핵심 산업 자산을 단일 서버로 (single server) 간주하는 것이다. 이렇게 대기행렬 시스템의 관점으로 다양한 모습의 현장을 모형화하고 대기행렬 이론과 부합하는 핵심 운영 성과 척도를 지표로 채택한다면 스마트 공장 프로젝트의 도입 전과 도입 후의 효과를 비교하는 데 사용할 수 있을 것이다.

- **Current Operations Performance Measures**

시스템의 입력 데이터를 받아 모델을 구동하였을 때 산출할 수 있는 운영 성과 척도를 정의하고 산출하는 과정이다. 시스템의 운영 성과 척도의 요건으로는 디지털 전환 프로젝트가 성공했을 시점에 측정된 생산 및 서비스 시스템의 운영 성과가 프로젝트 이전의 운영 성과와 비교될 수 있도록 척도의 측정 방법이 일관되어야 한다. 제조 및 서비스 운영관리 (manufacturing and service operations management, M&SOM) 관련 문헌에서는 핵심 운영 성과 척도로 가동률 (utilization), 사이클 타임 (cycle time), 산출률 (throughput) 그리고 재공재고 (work-in-process) 등이 주로 언급되며, 엄격하게 정의된 척도를 사용한다면 지표의 일관성을 확보하는 데 유용할 것이다.

- **Digital Technology Effects**

현재 시스템의 프로세스, 자원 소요량, 조직 구성 등을 변화시킬 수 있는 잠재력을 가진 요소들을 산출하는 단계인데, 스마트 공장은 기업이 처한 환경과 전략마다 다양한 솔루션의 도입으로 귀결될 수 있으므로 주어진 전략, 환경, 자원 제약하에서 개별 시스템의 설정이 솔루션의 영향으로 어떻게 바뀔지 검토하는 절차가 요구된다.

- **Changed Configuration of Production and Service System**

Digital Technology Effects 단계에서 정의한 구축 효과들이 성공적으로 실현된 이후의 시스템 설정을 말하는 것으로 변화된 모수를 가진 시스템을 예로 들 수 있다.

- **Changed Operation Performance Measures**

변화된 설정을 가진 시스템이 달성할 것으로 예상되는 운영 지표 예상치이다. 전 단계를 설명할 때, 변화된 시스템 설정의 예로 모수가 변화한 시스템을 예로 들었는데, 본 단계에서도 마찬가지로 모델의 모수를 변화시킴으로써 산출이 가능하다.

- **Operation Performance Gap**

현재 시스템 설정을 반영한 모델로부터 산출한 출력데이터와 스마트 공장으로 변화할 것으로 예상되는 시스템 설정이 반영된 모델로부터 산출한 출력데이터 간의 차이를 말한다.

- **Financial Performance Gap**

Operation Performance Gap을 변환하여 산출할 수 있는 재무적 지표를 말한다. 이 단계에서는 운영 성과와 연결할 수 있는 재무적 지표를 선택하고 검토한다.

## 2.5 스마트 공장의 디지털 기술효과

중소기업기술정보진흥원(TIPA) 스마트제조혁신추진단 (2020)에 의하면 스마트 공장이란 설계, 생산, 유통에 이르는 전 제조과정에 걸쳐 발달한 ICT (Information & Communication Technology) 솔루션과 첨단 제조기술과 조합하여 ‘스마트화’가 진행된 미래지향적 공장으로서, 생산에 있어 효율의 (즉, 제조비용 감소, 소요 시간 감소 등을 통해) 전반적 극대화 달성을 목표로 한다. 스마트 공장 구축에 사용되는 기술들은 IoT/IoS (Internet of Things/Internet of Services), CPS (Cyber Physical System), AI, Big data, 로봇기술 등이 있으며 스마트 공장은 이들 기술들의 조합으로 기업의 상황에 맞게 단계적으로 구축할 수 있다<sup>7)</sup> (스마트제조혁신추진단, 2020). 정부는 2025년까지 3만 개의 스마트 공장을 구축하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 통해 우리나라 중소기업의 경쟁력이 강화될 것을 기대하고 있다 (조지훈, 신완선, 2019; 스마트제조혁신추진단, 2020). 정부의 스마트 공장 지원 방식은 2000년대 중소기업 정보화를 위해 추진된 ERP 구축 지원 사업을 연상시킨다. ERP 구축 사업이 전사적 통합 시스템 소프트웨어 패키지를 되도록 많은 기업들이 단시간에 도입하도록 하는 것을 목표로 했다면 스마트 공장은 개별 기업의 수준에 맞는 다양한 IT 기술의 조합을 통해 기업 각자의 전략 이행을 돕는 것을 목표로 한다는 점에서 차이가 있다.

---

7) 상세한 ‘구축시스템 스마트화 수준별’ 특징은 부록 A2를 참고.

### 2.5.1 스마트 공장 구축의 효과와 발전단계<sup>8)</sup>형 모델

스마트 공장은 개별 기업에 맞는 다양한 IT 기술의 조합으로 구축하기 때문에 그 투자 효과를 정량적이고도 기업 간 비교가 가능한 형태로 측정하기가 힘든 특징이 있다. 이런 이유로 지원사업의 성과를 측정해야 하는 정부로서는 신청 기업에 대해 ‘스마트화 수준’ 진단을 (의무적으로) 실시하고 구축 후 실사를 통해 목표한 단계 상승에 도달하였는가를 측정하는 방식을 취할 수 밖에 없다.

[표 1] 스마트화 수준, CMM, 정보화 수준 비교

발전단계	(기업자원관리 부문) 스마트화 수준 <sup>9)</sup>	Capability Maturity Model (CMM)	정보화 수준
ICT 미적용	수작업	L1. Initial - 업무마다 일관된 프로세스가 없고 업무의 문서화 수준이 낮은 단계. 모든 회사의 출발 단계	Initiation - 정보 시스템의 활용이 매우 미미
기초	관리 부서를 중심으로 개별적 시스템 운영	L2. Repeatable - 관리에 중점을 두는 단계로서 조직은 동일한 절차와 관행을 반복적으로 수행	Automation - 단위 업무 시스템 구축 시작
중간 1	기능간 통합	L3. Defined - 정연한 업무 프로세스가 존재하고 이를 뒷받침하는 시스템의 도움으로 일관된 data가 생성됨	Integration - 정보화를 통해 업무 프로세스의 재편성, 경영 계층 간 통합이 이루어 짐
중간 2	공장운영 통합	L4. Managed - 전사의 목표관리에 고품질의 data가 활용되고 관리자가 data를 통해 업무상의 문제를 파악/해결	Collaboration - 기업 간 네트워크 활용도가 크게 증가, 업무 프로세스 개선 효과 발현
고도	IoT/IoS(모듈)화 빅데이터 기반의 진단 및 운영 IoT/IoS 기반의 CPS화	L5. Optimized - data를 통해 지속적으로 목표관리와 프로세스 최적화가 이루어짐. 직원들은 문제 해결과정을 전사적으로 공유/학습	Innovation - 정보화는 가치사슬의 필수조건이 되고 새로운 사업, 새로운 고객 등에 활용됨

\* 출처 : 스마트화 수준 - 스마트제조혁신추진단 (2020), CMM - Whitten, Bentley (2007), 정보화 수준 - 중소기업기술정보진흥원 (2019)

8) 로스토우(Rostow, W. W.)가 개발도상국은 i. 전통사회 ii. 도약준비 iii. 도약 (take-off) iv. 성숙 v. 대량소비 의 5단계 ‘발전과정’을 거쳐 성장한다고 주장하였다. 이러한 발전단계 프레임은 모범을 추격하는 전략을 선택하는 조직에게 유용하다 할 수 있다.

9) [표 1]의 스마트화 수준은 ‘기업자원관리’ 부문의 수준으로서 스마트제조혁신추진단은 이외에도 현장자동화, 공장운영, 제

‘스마트화 수준’은 발전단계형 모델로 분류할 수 있는데 기존의 ‘CMM (Capability Maturity Model)<sup>10)</sup>’ 이나 ‘정보화 수준 (중소기업기술정보진흥원, 2019)’ 등의 모델과 유사하다. 이들 모델들이 규정하고 있는 ‘수준’을 나란히 놓고 비교해 보면 ‘스마트화’의 한 수준에서 다음 수준으로 도약하는 것이 어떤 의미인지 알 수 있다. [표 1]에서 ‘ICT 미적용’ 및 ‘기초’ 수준은 기간시스템 구축 이전 상태로 부서마다 해당 업무만 전문적으로 처리하기 위한 데이터베이스를 구축하였기에 통합 미흡으로 인한 지속적인 정보처리 비용이 발생하는 상태이다.

이 단계에서 ‘중간 1’ 수준으로 스마트화를 향상시키고자 스마트 공장을 지원하는 기업은 ERP 시스템을 구축하고자 하는 기업이다. 이는 CMM에서 Level 3에 해당하는 성숙도 수준을 지향한다는 의미로서 업무 프로세스들이 여러 부서를 관통해 정렬되고 직원들은 시스템의 도움으로 업무 프로세스를 기계적으로 수행하는 형태로 업무 방식을 변화시키고자 하는 것이다. 기업이 이 수준의 성숙도에 도달하면 더 이상 조직의 역량이 특정 개인에 편중되지 않게 된다. 즉, ‘중간 1’ 수준에서는 초심자도 업무가 가능한 상태의 조직 성숙도를 보인다. 이는 전사적으로 업무의 문서화와 프로세스 정립이 이루어져 일의 순서가 정연해졌기 때문에 가능한 일이다. 이 수준 도달에 성공한 기업의 직원들은 매일의 반복 업무를 ERP와 같은 IT 솔루션이 제시하는 워크플로우를 (work flow) 따라 처리하게 되며 이 과정에서 기업은 상위의 ‘중간 2’ 수준으로 이동하는데 필요한 빅데이터를 습득하게 된다.

‘중간 2’ 수준에서는 데이터를 통해 조직의 상시 모니터링이 가능해지고 직원들도 데이터에 대해서 비로소 자원으로 인식하고 기업 외부 자원과 환경의 변화에 대해서도 실시간으로 대응하고자 하는 동기가 발생하게 된다. ‘고도’ 수준은 일반인들이 스마트 공장에 대해 상상하는 이미지와 가장 부합하는 단계이다. 이 수준에 도달하기 위해서는 각종 센서, 컨트롤, 통신기술과 시스템 통합 기술이 융합되어 CPS라고 불리는 논리적-물리적 공장이 실시간 동기화된 운영 시스템이 필요하다. 본 연구의 대상인 Hankoat의 경우 ‘중간 2’에서 ‘고도’ 수준으로 도약하는 스마트 공장을 구축하고자 계획하고 있는 상황이다.

---

품개발, 공급사슬관리 등의 부문에 대해서도 스마트화 수준을 정의하고 있다 (부록 A2 참조).

10) CMM: 업무성숙도모델로 번역되며 조직의 정보시스템 개발, 관리 프로세스 및 산출물의 표준화된 성숙도 평가 프레임워크이다 (Whitten, Bentley, 2007).

## 2.5.2 우수구축사례와 디지털 기술효과

‘스마트화 수준’ 등 발전단계형 모델은 스마트 공장 구축으로 다음 수준을 달성했을 때 변화할 기업의 업무 방식에 대한 비전을 제시하는데 탁월하다. 그러나 ‘디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크’의 ([그림 2] 참고) 수행에 필요한 ‘디지털 기술효과’의 개념을 유도하기엔 부족하였다. 스마트 공장 구축에 성공한 기업은 ‘무슨 요소가 작용하였다’고 인식하고 있을까? 본 연구에서는 운영 시스템에 영향을 줄 수 있는 ‘디지털 기술효과’를 추출하기 위해 2019년 이전에 스마트 공장을 구축한 12개 기업의 성공사례를 검토하였다.

스마트공장제조혁신추진단의 웹사이트에는 스마트 공장의 ‘우수구축사례’가 게시되어 있다. 2015년부터 2018년까지 서로 다른 기업에 구축한 스마트 공장 중 스마트공장제조혁신추진단이 선정한 총 80개의 사례가 기업별 대표자 및 구축 담당자, 관리자 등과의 인터뷰와 사전 설문을 바탕으로 소개되고 있으며, 사례기업의 핵심 사업 전략을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 스마트 공장 구축이 어떤 면에서 목표달성에 이바지하였는지 정량적 지표 및 정성적 효과를 함께 서술하고 있으므로 스마트 공장 지원 대상 기업에 프로젝트를 통해 무엇을 구축하는지, 무엇을 기대해도 되는지 알 수 있는 홍보 자료이다.

각 사례는 10~12페이지 분량의 인터뷰 요약, 인터뷰 및 현장 사진, 기대효과, 스마트 공장이 적용된 공정의 개요를 설명하는 인포그래픽 등으로 통일된 형식의 구성을 취하고 있다. 본 연구의 목적에 맞게 인터뷰 내용과 인포그래픽 자료부터 사례별로 구축 이전 상황 (중전환경), 구축 솔루션의 기능 (구축 기재), 결과에 (주요 편익) 대하여 요약한 뒤, 다른 사례에서도 발견할 수 있는 데이터 관련 변화 양상을 (공통 현상) 함께 명시해 보았다. 각 우수사례에는 정량적 지표의 개선 정도 (예, 불량률 50% 감소) 또한 소개되어 있지만 본 연구의 분석 대상에서는 제외하였는데 그 이유는 업종과 규모, 구축 환경, 지표 정의 방법 등이 통일되어 있지 않은 관계로 상대비교가 어렵기 때문이다.

사례는 [표 2]와 같이 다시 정리되었으며 2018년도의 우수사례 20건 중 본 연구에 시사점이 있다고 판단되는 12건의 사례가 검토되었다. [표 2]는 3건의 우수사례만 예시로 제시하였으며 나머지 9건은 부록 A1에 첨부하였다.

[ 표 2 ] 스마트 공장 우수구축사례 분석 결과 예시

번호	종전 환경	주요편익	구축 기재	공통 현상
01	<p>“공장별 담당자는 작업 차량 문외와 물량 확인을 위해 몸소 사무실까지 이동했고...”</p> <p>“작업 사항을 확인해야 하는 경우가 자주 생기는데 기존엔 구두나 기록으로 물어보아야 했죠”</p> <p>“공장 규모가 워낙 크다 보니 일부러 이동하려고 발품 판다는 건 보통 일이 아니었죠”</p>	<p>“실적과 월간 연간 매출까지 PC와 모바일을 이용해 어디서든 파악할 수 있어서...”</p> <p>“...일일이 연락과 대면으로 점검해야 했던 기존과는 비교할 수 없을 정도로 편해졌습니다.”</p> <p>“고객에게 실시간 공정 현황을 즉각 피드백 하는 장치를 마련, 대내외적으로 좋은 평가를 받았다.”</p>	<p>작업지시서 디지털화 영업 견적서 디지털화 모바일 정보 공유 바코드 시스템 (재공재고)</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p> <p>회사 내외부에서 데이터에 접속할 수 있다</p> <p>데이터 입력이 용이해졌다</p>
02	<p>“...업무전달이 안 되어 생산손실이 생기거나...”</p> <p>“아침마다 현장 일지 수거 및 보고결재 서류 작성”</p> <p>“구두로 인수인계를 하다가 문제가 발생했을 경우 책임소재를 놓고 갈등을 빚기도 했습니다.”</p>	<p>“..전기로의 온도, 원재료의 투입량, 제품 생산량, 적정 열량 등의 HMI 데이터를 수시로 자동 수집하여...”</p> <p>“서울 본사에서도 OO공장의 현황을 실시간으로 파악...”</p> <p>“기존에는 데이터가 흘러가 버렸지만 스마트 공장이 구축된 이후로는 데이터가 축적...”</p> <p>“...종이 서류를 없애고 매일 24회씩 반복되는 현장검침을 폐지...”</p>	<p>HMI (human-machine interface) 데이터를 자동 수집 실시간 공장 운영 현황 분석 현황판 설치 및 웹기반 시스템 CCTV를 설치하고 모니터로 현장 상황 파악</p>	<p>데이터 수집이 자동화되었다</p> <p>데이터 입력이 용이해졌다</p> <p>회사 내외부에서 데이터에 접속할 수 있다</p>
03	<p>“작업지시서는 직접 컴퓨터로 입력하거나 수기로 쓰는 식이기에 스케줄 점검 시 현장에 가거나 전화해야 했죠.”</p> <p>“기존의 현황 확인 방식은 시간이 오래 걸리고, 업데이트가 즉각 이뤄지기 어려웠습니다.”</p>	<p>“온라인 시스템에 로그인 하면 납기일과 진척 현황까지 확인 가능...”</p> <p>“영업시 구매 담당자에게 공정 현황을 브리핑하고 설득하기가 더욱 쉬워졌습니다.”</p>	<p>바코드와 QR코드 (작업지시서) 실시간 공정 정보 입력 및 파악 모바일 정보 공유</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>회사 내외부에서 데이터에 접속할 수 있다</p>

※ 출처 : 스마트제조혁신추진단 (2020)에서 발췌



분석 과정에서 하나의 우수사례는 스마트 공장 도입 전후로 조직이 데이터를 수집-저장-분석-활용하는 데 있어 변화한 모습을 담고 있다는 점을 확인하였다. 만약 어떤 조직이 데이터를 취급하고 활용하는 방법을 변화시킨 결과로 운영 성과가 향상되었다면 그 변화를 '디지털 기술 효과'라고 간주할 수 있을 것이다. 그러므로 하나의 디지털 기술효과는 여러 기업의 사례들에서 유사하게 관찰되는 데이터 취급 및 활용 상의 공통적 변화 양상을 (즉, [표 2]의 공통현상) 다시 그룹화하여 해당 그룹을 잘 묘사할 수 있도록 선택한 키워드가 된다. [표 3]에 우수사례로부터 추출한 디지털 기술효과를 정리하고 이어서 개별 디지털 기술효과에 대해 상술하였다.

[표 3] 스마트 공장의 디지털 기술효과

디지털 기술효과	공통 현상	적용 기업 반응 (quotes)
Traceability (추적성)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 데이터 입력이 용이해졌다</li> <li>• 현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어 진다</li> <li>• 데이터 수집이 자동화되었다</li> </ul>	<p>"경력자가 아니어도 어디에 어떤 재료가 있는지 쉽게 파악할 수 있기 때문에..."</p> <p>"고객사에 정확한 납품일정을 확인해 주는 게 가능해졌기 때문에..."</p> <p>(과거) "원부자재 재고관리가 원활하지 않아 2~3주 앞을 내다보는 생산계획을 잡기가 힘들었지만..."</p> <p>"제품넘버나 바코드를 통해 상품이 현재 어느 공정에서 돌아가는지 알 수 있어서..."</p> <p>"PC와 현황판으로 적정 재고량을 확인할 수 있어서..."</p>
Transparency (투명성)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부서간 통합된 데이터를 공유한다</li> <li>• 회사 내외부에서 데이터에 접속할 수 있다</li> </ul>	<p>(과거) "고객이 특정 제품에 대해서 문의하면 현장으로 달려가 트레이를 하나하나 살핌"</p> <p>"모든 레시피 (recipe)가 전산으로 관리되고 관련부서가 공유하기 때문에 굉장히 편리..."</p> <p>"모니터를 통해 업무일정을 확인할 수 있기 때문에 소통의 어려움이 줄어들었어요."</p> <p>(과거) "작업지시서는 직접 컴퓨터로 입력하거나 수기로 쓰는 식이기에 스케줄 점검 시 현장에 가거나 전화해야 했죠."</p> <p>"기존에는 데이터가 흘러가 버렸지만 스마트 공장이 구축된 이후로는 데이터가 축적..."</p>

※ 출처 : 스마트제조혁신추진단 (2020)에서 발췌

● Traceability (추적성)

우수사례의 기업들은 전체 업무 프로세스를 구성하는 하위 업무프로세스 및 하위 공정마다 (예를 들어, 개별 워크스테이션마다) 데이터를 쉽게 입력할 수 있는 장치를 (예를 들어, 터치식 모니터, PDA, 바코드 리더기 및 프린터 등의 장치) 설치해 생산현장으로부터 원천데이터를 수집하는 방식으로 일어난 변화를 스마트 공장의 특징으로 간주하는 경향이 두드러졌다. 이러한 변화의 일차적 활용은 관리자들과의 데이터 수집 시간을 절약하고 수집된 데이터의 정확성 향상에 있었으며 이차적 활용은 품질 문제 발생시 문제 공정의 역추적 활동이나 하위 공정의 현재 상태를 (어떤 제품을 처리하고 있는지) 파악한 결과를 바탕으로 앞으로 얼마나 더 많은 제품을 생산할 수 있는지 예상하는 데 있었다. 본 연구에서는 이러한 효과를 '추적성'이라고 명명함에 있어 디지털 기술의 적용으로 데이터가 그 원천 별로 정확히 기록되기 시작함으로써 시스템이 현재의 상태에 이르기까지의 과정을 '추적'할 수 있다는 점이 스마트 공장의 차별화된 특징이라는 점에 주목하였다. 스마트 공장의 상위 수준으로 갈수록 하위공정에서 사람의 데이터 입력 행위가 센서나 설비의 전자식 컨트롤 계통에서 발생한 데이터를 수집하는 방식으로 자동화되는 경향이 강했다.

● Transparency (투명성)

대부분의 우수사례에서 무선 네트워크와 인터넷을 사용해 하위 공정 또는 프로세스로부터 생성된 데이터가 전산시스템 서버로 보내져 통합된 후 종합된 데이터를 조직 전체 및 외부와 (자재공급사, 고객, 또는 그룹내 타 지역 공장) 공유하는 형태의 변화가 관찰되었다. 외부의 영업 사원은 고객과 납기 약속을 할 때 공장의 현재 부하를 (workload) 공유하는 방식으로 디지털 기술을 사용하였다. 현장 작업자는 제품의 레시피나 작업지시서가 전산화되어 공유되는 점을 두드러진 변화로 인식하고 있었다. 투명성의 향상은 스마트 공장 구축 이전에는 드러나지 않았던 데이터가 구축 이후에는 제품 및 서비스의 생산에 관련된 다양한 구성원들이 활용 가능한 형태로 바뀐 공통 현상을 말한다. 스마트 공장의 상위 수준으로 갈수록 인공지능 및 기계학습을 (machine learning) 활용해 예측력을 높이는 방향으로 발전한 모습이 요구되는데 이들 기술의 전제조건은 투명성의 지속적 작용으로 체계적으로 축적된 양질의 빅데이터이다.

2.5.3 하청제조기업의 스마트 공장 구축 방향

최근 스마트 공장 추진사업단이 공시한 정보화 보고서를 보면 스마트 공장 구축을 지원하는 기업들은 대부분 이미 “디지털(digital) 단계”에 있고 향후 프로젝트에서는 공정관리의 (process control) 스마트화를 기대하는 것으로 분석된다. 이는 스마트 공장 중간 수준 2에 다다른 기업의 특징으로 이 레벨의 기업은 관리시스템을 통해 분야별

관리시스템과 실시간 연동이 가능하다. 다음 단계인 “고도화”에서는 설비, 자재, 관리시스템이 유무선 네트워크로 사물인터넷(IoT)이 구축되어 있고 가상 물리 시스템으로 (CPS) 정보를 통합하여 실시간 운영하는 것이 가능해진다.

2000년대 중반, 유통 부문 및 제조현장에서 RFID (radio-frequency identification)의 도입이 가져올 운영 성과 개선 효과에 대한 연구가 진행되었다. Chongwatpol과 Sharda (2013)는 RFID가 추적성과 가시성을 향상시키는 역할을 한다는 사실에 주목하고 RFID를 도입해 추가적으로 획득 가능해진 데이터들이 있다고 가정했을 때 잡샵 (job-shop, 다수의 설비 중심으로 배치한 작업 환경)에서 스케줄링 규칙을 변경하면 이전 스케줄 규칙에 비해 성과척도가 얼마나 향상될지를 실제 기업 현장의 데이터를 습득하여 실험하였다.

사례의 기업은 RFID를 현장에 도입하고자 하는 기업으로서 한 워크스테이션에 재공재고가 도착하면 작업자가 바코드 시스템을 통해 재공재고를 등록하고 작업이 완료되면 다시 바코드를 인식시켜 해당 워크스테이션을 떠나도록 되어 있는 시스템이다. 이 방식의 단점은 명확한데, 현재 시스템에서는 작업자가 담당한 워크스테이션에서 한 단위의 작업을 수행하기 위해 재공재고를 로딩할 (loading) 시점에서야 도착을 등록하는 관행 때문에 정확히 해당 재공재고가 언제 도착했는지 알 수 없으므로 워크스테이션마다 현시점 얼마만큼의 재고가 있고 평균 얼마만큼의 대기 시간과 처리 시간이 소요되었는지 알 수 없는 문제점을 안고 있었다.

또 하나의 문제점은 재공재고의 이동을 실시간으로 파악하기 어렵다는 점으로 이는 간혹 잘못된 소재를 워크스테이션에 로딩하여 작업하는 경우를 방지할 수 없음으로 인해 다른 워크스테이션에서의 후속 작업 및 테스트 작업 등에 되돌릴 수 없는 시간을 소요하게 만드는 것이었다 (Chongwatpol, Sharda, 2013). 저자들은 이런 문제들이 RFID를 사용하면 작업자의 등록 실수를 방지할 수 있기 때문에 사라질 것이라고 전제한 후, 정확한 워크스테이션별 재공재고 데이터가 가용하다는 가정이 충족될 때만 실행이 가능한 새로운 스케줄링 규칙을 개발하였으며, 이 새로운 스케줄링 규칙으로 작업지시를 할 경우 (가상의) 운영성과를 상용 시뮬레이션 소프트웨어로 (Simio 4.0) 작성한 모델을 실행하여 산출하였다.

실험은 현재의 스케줄링 규칙과 RFID 시스템 설치 후 새로운 스케줄링 규칙으로 작업을 지시했을 경우를 비교하여 현장 운영 성과의 변화를 시뮬레이션하는 것이었다. 저자들이 주목한 현장의 운영성과로는 제품군별 병목 공정의 기대 사이클타임과 산출량 등이 있었다. 실험 결과 정보의 가시성에 기인하여 스케줄링을 수행할 경우 (즉, 후자의

새로운 스케줄링 규칙으로 수행할 경우), 사례의 기업은 현재 대비 준비시간이 28~36%, 사이클타임은 10~15%, 그리고 미납 감소는 20~25%의 향상을 기대할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

Chongwatpol과 Sharda (2013)의 연구는 RFID와 같은 IT 신기술이 도입되어 증가한 정보의 가시성이 생산 현장에서 잘 활용되면 기존의 운영성과를 얼마만큼 향상시킬 수 있는지 보여주기 위한 시뮬레이션으로 하청제조기업에 스마트 공장을 구축했을 경우 개선되는 운영 성과의 기대치를 정량적으로 산정하는데도 유용한 생각의 틀을 제공한다.

### 3. 하청제조기업 운영 시스템의 모형화

본 장에서는 하청제조기업의 스마트 공장 운영성과의 측정을 위해 사례를 개발하고 수리모형을 수립한 뒤 시뮬레이션 모델을 작성하고자 한다. 스마트 공장을 (성공적으로) 도입하였다고 가정하고 모델의 모수 (parameter)를 변경한 뒤 시뮬레이션을 실시하면 현실 공장을 대상으로 현재 운영 시스템 설정을 바꾸는 현장 실험을 하지 않고도 운영 성과 지표의 변화를 정량화할 수 있게 된다.

#### 3.1 사례 개발의 의의

하청제조기업과 그 운영 모델에 관해서는 문헌에서 확립된 시뮬레이션 모델을 찾기가 어려우므로 한 기업의 사례 개발을 통해 정립해야 할 필요성이 있다. 사례 연구는 결론을 일반화할 때 실제를 (practice) 상세히 관찰함으로써 얻는 사회과학의 방법론에 바탕을 두는 것으로, 운영관리 분야에서 어떤 연구 대상은 “소수의 샘플이 모집단 전체”일 경우가 있기 때문에 개념 간 관계에 바탕을 둔 프레임워크를 결과물로 하는 연구에서 흔히 채택된다 (Meredith, 1998; Sodhi, Tang, 2014).

Meredith (1998)는 운영관리 분야에서 사례 개발을 방법론으로 채택하는 연구의 전형으로 Gerwin (1981)의 연구를 언급하였다. 이는 유연생산시스템 (Flexible Manufacturing Systems, FMS) 도입 사례에 관한 것으로 제품 선택부터 구축까지 FMS 도입의 전 과정을 경험해 본 어떤 대기업의 한 개 조직을 대상으로 그 부서원들을 인터뷰하여 신기술 도입 시 조직 통제와 평가가 실제 현장에서 어떻게 이루어지고 있는지를 정리하여 이론과의 격차를 극복하려 한 연구였다.

Flyvbjerg(2006)는 단일-사례 연구가 도움이 안 된다는 주장이 사례 연구에 대한 흔한 오해 중 하나라고 지적하였다. 일반화가 불가능하다는 이유로 단일-사례 연구의 무가치성을 주장하는 사람들이 있는데 일반화라는 것은 사람들이 지식을 습득하고 축적하는 여러 방법 중 하나일 뿐이며 만약 관찰 대상에 대해 면밀하고 깊이 있는 연구가 가능하다면 그 대상이 단 한 개라고 해도 가치가 있다는 것이다. 또한, 과학철학자 카를 포퍼 (Karl Popper)의 유명한 개념, '검은 백조 (black swan)' 사례를 들며, “검은 백조를 단 한 번만 관찰하여도 모든 백조는 희다는 가설이 반증” 되듯이 단일 사례 연구는 일반화된 지식을 반증하는 가장 강력한 수단이라고 주장하였다 (Flyvbjerg, 2006, P.228).

사례연구에서는 엄정성을 (rigor) 유지하는 것이 중시된다. 운영관리 분야 논문 심사 과정에서 사례 연구 논문은 엄정성의 부재가 자주 지적된다 (Stuart et al., 2001). 사례연구가 엄정성을 확보하기 위해서는 다양한 방법과 경로로 ‘직접 관찰’을 수행해야 하며 인터뷰를 비롯한 여러 다양한 원천으로부터 정보수집을 하는 삼각법을 (triangulation)<sup>11)</sup> 사용하여야 한다. 또한, 관찰 대상을 통제한다거나 상태에 영향을 주지 않아야 하며 연구방법의 투명성 (transparency of the methods) 확보를 위해 노력해야 한다 (Meredith, 1998; Sodhi, Tang, 2014).

종합하면 하청제조기업의 운영관리 모형과 같이 기존의 연구가 드문 분야는 엄정성을 유지하는 방법을 잘 사용한다면 단일 기업일지라도 사례 연구를 실시하는 것이 이론 수립을 위해 바람직하다고 할 수 있다.

## 3.2 하청제조기업 사례 개발

### 3.2.1 하청제조기업 Hankoat<sup>12)</sup>의 운영 프로세스

하청제조기업의 한 사례로 자동차 부품 기업인 Hankoat를 소개하고자 한다. [그림 3]은 Hankoat가 참여하고 있는 공급망과 Hankoat 공장의 모수들을 일목요연하게 표현할 수 있는 가치흐름지도 (value stream map, VSM<sup>13)</sup>)이다. Hankoat는 지방 소재 자동차 부품 공단에 위치한 회사로, 완성차 메이커의 1차 업체로부터 M사가 구매한 자동차 차체 판넬 (body panel)을 도장 및 포장하는 사업을 30년 가까이 수행해왔다. 차체 판넬은 M사의 재고자산이며 Hankoat에게는 M사가 위탁한 재고가 된다. Hankoat는 M사가 도장 및 포장 작업을 위탁한 전국 10여 개 협력 업체 중의 한 곳이다.

M사의 차체 판넬의 공급망은 크게 다음과 같은 공정을 거친다; ㉠ 차체성형 (프레스, 용접, 헤밍, 조립) - 1차업체 담당, ㉡ 도장/포장 - Hankoat 담당, ㉢ 전국 M사 물류센터로 배송<sup>14)</sup> - Hankoat 담당, ㉣ 지역 부품 대리점으로 공급 - M사 담당. M사의

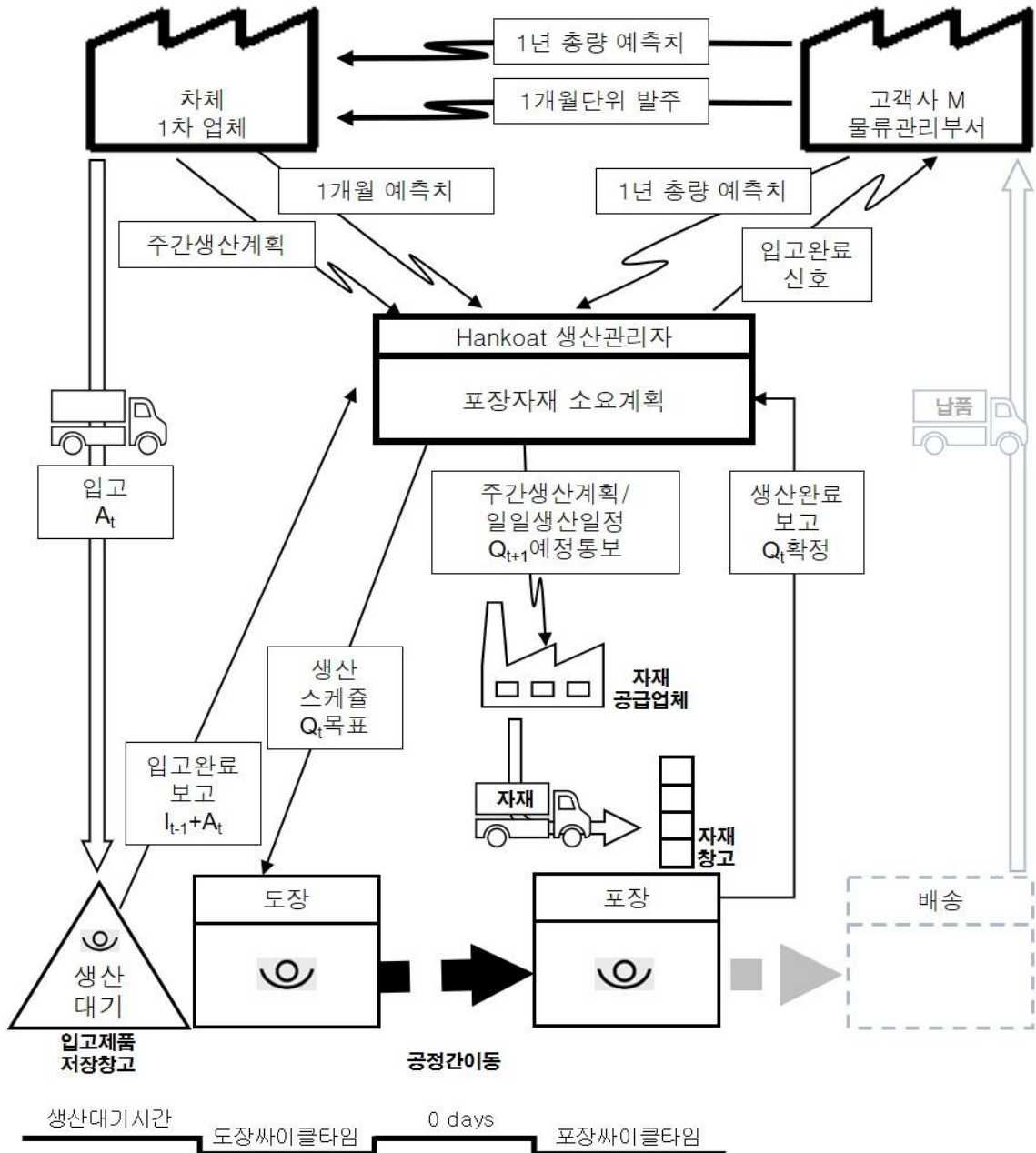
11) 캠벨(D.T. Campbell)이 고안한 개념으로 자료의 신뢰성이 단일한 요인에 의해 입증되는 것보다 두 독립적 요인에 의해 입증되는 것이 더 높다는 점에서 유래 (사회문화연구소, 2000).

12) 기업 정보를 보호하기 위하여 가명을 사용하였다.

13) VSM: 토요타 생산 시스템을 벤치마킹한 경영혁신 방법론인 린 운영체계 (lean operation system)의 공정 시각화 도구의 하나로 운영체계 내 주체들 간의 물류 및 정보의 흐름과 그에 따른 사이클타임을 일목요연하게 표현할 수 있어 전체 생산 활동 중 부가가치 시간을 파악하는데 용이하므로 널리 사용되고 있다 (Pound et al., 2014).

14) 이 공정은 Hankoat가 담당하지만 본 연구의 범위에서 제외됨

차체 부품 구매처는 크게 두 종류로 나뉘며 하나는 완성차 메이커에서 차체 운영 중인 프레스 공장이고 또 하나는 완성차 메이커에 차체 판넬을 납품하는 1차업체들이다. M사의 업무는 과거 실적치에 근거한 1년간 수요 예측으로부터 시작한다. 다음으로 M사는 수요예측에 근거하여 마스터 공급계획인 월별 공급 스케줄을 작성한 후, 개별 파트의 재고 수준에 따라서 공급계획을 조정한다. Hankoat 입장에서는 M사가 언제 어떤



[그림 3] VSM 으로 표현한 Hankoat의 운영관리 환경

부품을 얼마나 공급해 줄지 모른다. 단지 매년 말 M사가 수립한 연단위 사업계획으로부터 추산한 연간 전체 매출 전망과 매월 마지막 주 1차업체를 통해 전달받은 다음 달 대략적인 판넬 생산 예상량으로 생산량 수준을 가늠할 뿐이다. 1차업체는 주간 생산 계획도 공유한다. 그러나 1차업체의 담당자와 Hankoat의 담당자 사이의 실시간에 가까운 정보 공유에도 불구하고 주간 생산 계획의 변동이 드물지 않다. 전일(前日)에 수립한 당일의 1차업체 생산계획도 바뀌는 경우가 적지 않다. 그러므로 1차업체에서 Hankoat의 ‘입고제품저장창고’로 운송되어 검수를 마치고 해당 입고품에 대한 주문정보가 시스템에 입력된 뒤에야 입고량이 확정된다. 입고가 확정된 제품은 M사의 공급망관리 시스템에 보고하는 과정을 거치게 된다. 이 과정은 M사가 내린 구매주문의 보충이 완료됐으니 M사가 1차업체에게 대금 지급을 준비해야 하는 단계를 의미하며 Hankoat에게는 도장 및 포장 작업의 일감이 입고된 시점을 의미한다. Hankoat는 이 시점으로부터 M사와 합의한 시간 내에 해당 제품의 처리를 완료하여 M사의 창고에 입고해야 한다.

[그림 3]에서 회색으로 표시된 문자 및 기호들은 모두 본 연구에서 다루는 모델의 범위를 벗어나는 활동들을 묘사한다. 포장 이후에는 배송과정이 존재하며, M사가 정한 목적지에 완제품이 도착하면 Hankoat는 M사의 주문을 완료하게 되며 대금 정산이 이루어진다. 그러나 본 연구에서는 포장작업이 끝나는 시점, 즉 완제품이 출하대기 상태로 전환되는 시점에 생산관리자에게 생산완료가 보고되고 즉시 M사가 납품대금을 지급하는 것으로 설정하였다. 이렇듯 납품대금의 시점이 강조되는 까닭은 Hankoat를 포함한 생산자들은 M사의 주문을 충족시키기 위해 먼저 자신의 자원을 투입해야 하므로 자원의 투입 시점과 납품 대금을 지급받는 시점 사이의 기간은 생산자들의 자금이 묶이는 기간과 다름없기 때문에 그 기간의 최소화가 유리하다.

### 3.2.2 수리모형의 수립

본 절에서는 Hankoat의 주간생산계획표를 바탕으로 재고-생산량 결정 방식에 관한 수리모형을 수립하고자 한다. 본 연구에서 수리 모형을 수립하는 까닭은 하청제조기업의 수익성을 결정하는 변수들을 파악하기 위함이다. [표 4]는 사급 자재를 입고 받아 임가공제조를 (foundry manufacturing) 수행하는 Hankoat의 일주일간 생산 계획의 예이다. Hankoat의 생산 활동에 투입되는 모든 자재가 사급 자재는 아니다. 사급 자재와 (즉, 제품) 함께 부가 가치를 더하는 활동인 임가공제조를 수행하는 과정에서 필요한 각종 부자재는 (즉, 도료, 포장 자재 등) 사급이 아닌 경우도 많다. 하지만 자동차 공업의 경우 치열한 경쟁과 수직계열화로 인해 최종 고객인 메이커가 하청제조기업의 자재 단가에 대한 영향을 지니고 있어 대부분의 소요 부자재 또한 사급 자재처럼 공급되고 있다. 메이커가



과악한 원가 정보의 규모와 정확성을 따라갈 수 없는 것은 Hankoat도 마찬가지다.

따라서 본 수리모형은 재료비 감소를 통한 수익성 향상을 기대하기 보다는 운영의 묘를 살려 고객과 합의한 생산 효율과 실제 생산 효율 간의 차이를 넓히는 데 노력해야 하는 하청제조기업의 상황을 전제로 한다.

[표 4] Hankoat의 주간생산계획 예시

계획기간	월요일 (08/31)	화요일 (09/01)	수요일 (09/02)	목요일 (09/03)	금요일 (09/04)	토요일 (09/05)	일요일 (09/06)
예상입고	3,600	2,000	1,600	1,500	1,600		
예상재고	4,000	3,400	2,600	1,900	1,400	휴무	휴무
생산량	2,200	2,600	2,400	2,200	2,100		

수리 모형에 사용되는 변수 및 모수는 다음과 같은 표기법을 따른다. 참고로 [그림 3]의 ‘입고’, ‘입고완료 보고’, ‘생산 스케줄’, ‘생산완료 보고’ 등의 정보는 다음에 열거하는 표기법에 등장하는 변수를 병기한 것이다.

$t$  = 기간을 뜻하는 첨자,  $t = 1, \dots, T$ , 여기서  $T$ 는 계획 기간 (planning horizon).

※ [표 4]의 경우  $t$ 의 단위는 1일,  $T=5$  라면 5일간의 계획 기간을 뜻한다.

$c_t$  =  $t$ 기의 생산능력

$a_t$  =  $t$ 기의 예상 입고량

$\epsilon_t$  =  $t$ 기의 예상 입고량과 실제 입고량의 오차

$A_t$  =  $t$ 기의 실제 입고량

$I_t$  =  $t$ 기의 기말 재고량

$Q_t$  =  $t$ 기의 생산량

$y_t$  =  $t$ 기의 생산 여부 지표 변수 (flag variable)  $\begin{cases} 1 & \text{if } Q_t > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

$p$  =  $t$ 기에 한 개 제품의 납품가에서 재고 유지비용을 제외하고 한 단위의 제품을 생산하는데 소요되는 변동비용을 차감한 금액 (즉, 재고 유지비를 제외한 개당 기여이익)

$h$  =  $t$ 기에 재고 한 단위를  $t+1$ 기로 이월하는 비용

$S$  = 정책적 최소 생산요구량으로서 생산 여부 판단의 기준이 되는 생산량

$D$  = 제품 생산 시 발생하는 고정비용

[표 5] 일반화된 주간생산계획

계획기간 ( $t$ )	0	1	...	$t$	...	$T$
입고량		$A_1$	...	$A_t$	...	$A_T$
재고	$I_0$	$I_1$	...	$I_t$	...	$I_t$
생산량		$Q_1$	...	$Q_t$	...	$Q_T$

[표 5]는 이러한 표기법을 이용하여 [표 4]를 재구성한 테이블이다. [표 5]를 보면 현장의 생산관리자가 현재  $t_0$ 기에 있고 기초재고를 ( $I_0$ ) 알고 있는 상태라고 가정했을 때 입고량을 ( $A_1, \dots, A_T$ ) 파악하여 생산량을 ( $Q_1, \dots, Q_T$ ) 결정하는 문제를 풀어야 하는 상황에 놓여있음을 알 수 있다.

[표 5]를 참고해 수립한 Hankoat의 이윤극대화 수리 모형은 다음과 같다.

Maximize

$$Z = \sum_{t=1}^T (pQ_t - hI_t - Dy_t) \quad (3)$$

subject to

$$Q_t \leq I_{t-1} + A_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$Q_t \leq c_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$I_t = I_{t-1} - Q_t + A_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$A_t = a_t + \epsilon_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$Q_t \geq y_t \cdot S, \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$Q_t, A_t, I_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

식 (3)~(9)는 Hankoat의 수익성이 사급자재 재고의 운영과 생산능력 관리에 있다는 점을 강조한다. 목적함수인 식 (3)은 Hankoat의 손익구조가 주어진 사급재고 관리에 소요되는 비용만큼 손실을 보며, 생산하는 만큼 이익을 본다는 것을 나타낸다. 단, 생산 시 (즉, 라인을 가동할 때는) 고정비  $D$ 가 발생하며 이는  $pQ_t$ 가 생산량에 따라 변동하는 것과 비교된다는 점을 유의할 필요가 있다. 또한,  $Q_t$ 의 계수  $p$ 는 납품 단가에서 사급자재 한 단위당 재고유지비용을 (holding cost) 제외한 제품 원가를 차감한 상수라는 점을 주의해야 한다.

제약식을 살펴보면 식 (4)는  $t$ 기의 생산량은 ( $Q_t$ ) 직전기인  $t-1$ 의 사급재고와 ( $I_{t-1}$ ) 당기인  $t$ 의 입고량의 ( $A_t$ ) 총합을 초과할 수 없다는 것을 나타낸다. 또한, 식 (5)는  $t$ 기의 생산능력  $c_t$ 만큼만 생산할 수 있다는 것을 표현한다. 식 (6)은 직전기의 재고  $I_{t-1}$ 에서  $t$ 기의 생산량  $Q_t$ 를 차감하고  $t$ 기 입고량  $A_t$ 를 더하면 지금의 재고  $I_t$ 가 된다는 의미이다. 식 (6)과 같은 제약식은 재고 및 생산능력 문제에서 흔히 볼 수 있는 것으로 균형제약조건 (balance constraints)이라고 일컫는다 (Hopp, Spearman, 2000). 마지막으로 식 (7)은  $t$ 기의 입고량을 뜻하는  $A_t$ 가  $t$ 기의 예상입고와 ( $a_t$ ) 오차로 ( $\epsilon_t$ ) 분해될 수 있음을 명시하고 있다. [표 4]에서는 모든 기간에 대하여 예상한 대로 실제 입고가 이루어짐을 가정하므로 모든 기간에 대해  $\epsilon_t = 0$ 이 된다. 식 (8)은 최소요구량,  $S$ 를 만족할 수 없는 날은 가동하지 않는 Hankoat의 생산량 결정 관행을 반영한 수식으로서 생산여부 표시변수  $y_t$ 가 포함되어 있으며 (변수 표시법에 대한 설명 참조)  $Q_t$ 가 양의 값을 가지면 최소  $S$  이상의 생산 지시가 이루어지도록 제약한다. 식 (9)는 재고량, 생산량, 입고량이 음의 값을 가질 수 없음을 뜻하는 비음조건식이다 (non-negative constraints).

### 3.2.3 수리모형의 고찰

Hankoat의 입장에서 제품 재고는 자재이면서 고객으로부터의 주문이기도 (backlog) 하다. 제품 재고는 변동하며 그 입고를 예측하기 어렵다. 식 (3)~(9)에 나타난 수리모형은  $t$ 기 초에 생산관리자가 이윤을 극대화하기 위해 정해진  $c_t$ 를 초과하지 않고  $I_t$ 를 최소화하는 최적 생산량  $Q_t$ 를 달성하기 위해서 입고량에 대한 정보량을 극대화하고 현장을 보다 정확히 통제하려고 노력하는 상황을 상정하고 있다. 이는 사실상  $t$ 기의 가동률을 (utilization) 극대화하려는 동기와 같은 것이다. 또한  $Q_t$ 가  $I_{t-1} + A_t$ 를 초과할 수 없으므로  $a_t$ 를 파악할 수 없는 경우나  $\epsilon_t$ 가 항상 0이 아닌 경우에는  $t+1$ 기의 생산량 보존을 위해서 일정 수준의 재고를 가져가고자 할 동기가 작동할 것이다.

$a_t$ 는  $t$ 기의 입고 계획량 (예, [표 4]의 예상입고 참고) 이라고 할 수 있는데 전술한 수리 모형에서는 오차  $\epsilon_t$ 를 0으로 설정하였으므로  $a_t$ 가 실제  $A_t$ 와 일치한다고 가정한 것이다. 그러나 사급자재의 생산 업체 수가 많은 경우 등 입고예상량과 ( $a_t$ ) 실제 입고량의 ( $A_t$ ) 일치율이 낮은 상황에서는 (즉, 오차  $\epsilon_t$ 가 미지의 분포를 따르는 확률변수이고  $E(\epsilon_t) \gg 0$ 인 경우) 당기의 생산량을 결정할 때 자재 부족으로 생산능력 ( $c_t$ )이 감소할 수 있다. 이는 수익성을 저해하는 재고 비용을 초래하게 될 것이며 예측이 정확했다면 피할 수 있는 손실이다.

$S$ 는 당기의 생산 설비 가동 여부를 판단하는 기준이 되는 정책적 상수이다. 생산 관리자는  $S$ 에 미달하는 양밖에 생산할 수 없는 상황에 처했을 때, 휴무를 선택함으로써 생산 설비를 가동할 때마다 발생할 수 있는  $D$ 와 같은 고정비용을 최소화할 수 있게 된다. Hancoat의 경우 건조로나 보일러 같은 설비는 도장 공정을 가동하기 위해 예열이 필요한데 이 때 생산량에 무관하게 전기세, 연료비와 같은 작업준비 비용이 소요되므로 이로써  $D$ 를 추산하는 것이 가능하다. 현장에서는 과거 경험에 근거해 관리자들이  $S$ 의 수준에 대해서 어느 정도 알고 있으며 이런 관행을 반영하여 수리모형에서는 확정적 외생변수로 단순하게 가정하였다. 그러나 본 절 이후에 소개될 시뮬레이션 모델에서는 평균재고비용과 ( $h$ ) 평균납품단가 ( $r$ )의 상충관계 및 과거 입고량 ( $A_t$ ) 분포에 대한 생산관리자의 지식에 기반하여  $S$ 를 결정한다.

이상과 같이 고찰한 결과, 식 (3)~(9)에서 제시된 수리모형은 Hancoat의 생산 관리자가 하청제조기업이라는 상황에서 이익을 극대화하는 생산량 달성을 위해 고려해야 할 핵심정보를 명확히 드러내고 있음을 알게 되었다. 그것은 입고량에 대한 정보와 Hancoat 생산라인의 한계나 특성과 관련된 모수 및 변수들로서 현명한 하청제조기업 생산관리자는 항상 변화하는 내부 변수를 파악하는 활동과 함께 불확실한 입고량에 대한 통찰력을 활용하여 라인의 가동/비가동 여부를 판단함은 물론 가동 결정이 났을 때에는 당기의 최대생산량을 반드시 달성할 수 있도록 부자재 결품을 방지하여 불필요한 재고 비용을 감소시킴으로써 고객과 합의된 이익율을 최대한 지키고자 노력할 것임을 알 수 있다.

### 3.2.4 단일 기수 가정 시 수리모형의 해

수리모형은 식 (7)에서  $\epsilon_t = 0$  로 설정함으로써 확정적이지만 (모든 기간에 걸쳐) 일정하지 않는 수요를 갖는 동적 로트크기 결정 (dynamic lot sizing) 문제와 유사하게 되었으며 [표 4]와 같이 5개 기간을 갖는 문제의 경우 와그너-휘튼 절차로 (Wagner-Whitin procedure) 간단히 계산할 수 있다 (Hopp와 Spearman, 2000). 그러나, 입고량 예측이 어려운 하청제조기업의 특성상 식 (7)의 오차항이 항상 0이라는 가정은 비현실적이라고 할 수 있다. 만약,  $\epsilon_t$ 에 관한 가정을 완화하여 아래의 식 (7a)와 같이 오차항이 평균 0, 분산  $\sigma_a^2$  인 정규분포를 따른다고 가정하면 입고량 ( $A_t$ ) 또한 확률변수가 될 것이다.

$$A_t = a_t + \epsilon_t, \quad t = 1, \dots, T$$

$$\text{단, } \epsilon_t \propto \text{NORMAL}(0, \sigma_a^2) \quad (7a)$$

식 (3)~(7a),(8),(9)로 표현되는 변형된 수리 모형은  $A_t$ 가 확률변수로 변경 설정된 까닭에 복수 기간 최적화 문제 (dynamic optimization problem) 중에서도 수요가 확률과정인 복수 기간 확률적 최적화 문제에 (dynamic stochastic problem) 해당된다. 그러나, 이 범주에 속한 문제들은 매우 작은 계획 기간을 고려하는 문제가 아니라면 NP-hard<sup>15)</sup> 문제가 되는 것으로 알려져 있다 (Wong et al., 2012). 그러나, 불확실한 수요 조건의 복수 기간 최적 생산량 문제의 해법에 대한 논의가 없어도 본 연구의 목적을 달성할 수 있다. 본 장에서는 시뮬레이션 모델의 개발 시 필요한 운영 의사결정 구조와 함께 의미있는 모수를 파악하기 위해 수리 모형을 수립하였기 때문이다.

모든  $t$ 기간에 대하여,  $c_t$ 는 동일한 상수  $c$ 로 가정하고,  $\epsilon_t$ 는 다시 0이라고 가정해보자. 추가적으로  $y_t = 1$ 으로 가정하면 식 (3)~(7),(8),(9)는 대수적으로  $Q_t = c$ 일 때  $Z$ 가 최대값에 이른다. 즉, 모든  $t$ 기마다 최대 생산 능력 만큼 생산하면 된다. 만약 충분한 물량이 있다고 가정하면 핵심 생산 자산을 최대한 가동함으로써 항상 최대의 이익을 얻을 수 있다. 이때,  $Z = pc - (hI_t + D)$  로서  $t$ 기의 이론적 최대 기여이익 부분에서 이월재고 유지비, 가동시 고정비 등 비용 부분을 차감한 값이 되는데 그 차감분의 크기는  $t$ 기의 재고량에 비례한다. 그러므로 재고가 작으면 작을수록 같은 조건에서 더 큰 이익을 얻을 수 있다.  $Z$ 가 최대값이고  $I_t = 0$  이라면 균형제약조건식 식 (6)으로부터 식 (10)을 유도할 수 있다.

$$Q_t = I_{t-1} + A_t \tag{10}$$

이는 식 (4)에서 부등호만 제외하면 얻을 수 있는 조건으로서 만약 입고된 만큼만 생산할 수 있으며 항상 생산능력  $c$  만큼만 입고가 이루어진다면 최대의 수익을 얻을 수 있다는 의미가 된다. 이러한 수리모형의 해를 고찰함으로써 시뮬레이션 모델이 현실의 다양한 재고 및 입고량 조합과 생산능력 모수를 변화시킬 수 있도록 고안되어야 함을 알 수 있다.

15) 수리 문제를 푸는 알고리즘 중 연산시간이 문제 사이즈의 다항함수로 증가하는 알고리즘으로는 아직까지 최적해를 찾을 수 있는 방법이 발견되지 않은 문제를 뜻한다. 문제 사이즈는 예를 들면 (\*네트워크 문제 등에서) 노드의 갯수를 들 수 있다. NP-hard 문제의 최적해를 찾는 데 걸리는 시간은, 최악의 경우, 사이즈에 따라 지수적으로 증가하게 된다 (Daskin, 2011, PP.269-270).

### 3.3 하청제조기업 시뮬레이션 모델 수립

본 절에서는 하청제조기업의 생산관리자가 다양한 재고 및 입고량 조합하에서  $t$ 기의 생산량,  $Q_t$ 를 결정하는 시뮬레이션 모델을 수립하고자 한다. 수립된 시뮬레이션 모델은 현실의 생산시스템을 반영하는 것으로 시스템의 모수를 (parameter) 변화시켰을 때 (즉, 스마트 공장을 도입한 후에) 생산시스템의 운영 성과 변화가 어떠한 것인지를 예측하는데 사용될 것이다.

본 연구의 시뮬레이션 모델은 [그림 2] 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크의 기술효과와 운영 성과 계층을 연결시키는 역할을 할 것이다. 따라서, 모델의 요건은 (1) 디지털기술효과가 영향을 줄 수 있는 모수를 포함해야 하고, (2) 생산관리자의 의사결정 방식이 반영되어 있어야 한다. 또한 (3) 운영 성과 척도를 출력으로 하여 모수와 생산관리자의 의사결정 방식이 바뀔 때 따라 연동하는 성과의 변화를 관찰할 수 있어야 한다. 이렇게 함으로써 다른 모든 조건이 동일할 때 모수의 변화가 출력을 어떻게 변화시키는지 알 수 있다.

#### 3.3.1 모델의 기술방법: 시스템다이내믹스

시스템다이내믹스 (system dynamics)는 Jay Forrester가 전자공학의 제어이론을 (control theory) 산업시스템을 설명하는데 응용하면서 탄생하였다. 기후변화, 공급망의 채찍효과 (bull-whip effect), 도시 인구 성장과 주택 수요 예측 등 복잡한 사회 및 자연 현상을 설명하는 데 사용되는 시뮬레이션 모델링 방법론이다. 운영관리 분야에서 최근 시스템다이내믹스를 사용한 논문이 많이 출간되고 있으며 Sterman et al. (2015)은 그 이유를 제한적 합리성을 가진 인간으로 구성된 산업시스템의 비선형적 행동을 설명하는데 적합하기 때문이라고 분석하였다. 시스템다이내믹스 방법론은 인과순환관계도와 (causal loop diagram, CLD) 스톡-플로우 다이어그램의 (stock-flow diagram, SFD) 작성이 특징적이다. CLD는 다수의 사건이나 현상 간의 복잡한 인과관계를 종합적으로 파악할 수 있도록 하는 도식화 (mapping) 기법이다. SFD는 사람, 자재, 정보와 돈의 흐름으로 이루어진 물리적, 논리적 시스템을 저장(stock, 貯量)과 유량(flow, 流量)의 관계로 표현할 수 있다.

CLD는 시간의 흐름에 따라 어떤 원인의 발생이 처음에는 의도치 않았던 다른 결과를 낳을 수 있는 순환관계를 발견하는데 유용하게 활용된다. Senge (1990)는 학습하는 조직이 채택할 수 있는 효과적인 문제 파악 및 해결 도구로서 CLD의 유용성을 현장 경험을 통해 체득하고 8가지 유형의 문제들을 제시한 바 있다. 예를 들어 ‘공유지의

비극' 같은 시나리오는 경제학의 외부불경제와 유사한 현상으로서 누구에게도 소유되지 않는 공유지가 시간이 흐름에 따라 황폐화 되어 가는 과정이 잘 드러나 있다. Kim (2014)은 이러한 CLD의 장점을 활용해 제조기업 경쟁력의 원천에 대해 논하였다. 저자에 따르면 제품개발속도  $\times$  유연성의 평면에서 경쟁하는 두 업체가 존재하여 한 업체가 다른 한 업체에 대해 두 차원 모두에서 탁월하다면 그 원천은 자원의 통합 (integration) 능력이며 그 통합 능력의 개발은 조직원의 시스템사고, 즉 쌍고리 사고 (double loop thinking) 능력의 배양이다. Kim (2014)은 탁월한 기업과 그렇지 않은 기업이 품질 문제를 해결하는 과정을 CLD로 작성하여 비교함으로써 두 기업 간의 사고과정의 차이를 명료하게 전달하였다.

시스템다이내믹스 방법론의 중요한 도구 중 한 가지인 SFD는 연속 시간 개념 시뮬레이션을 통해 시스템의 시간에 따른 행동을 (behavior over time, BOT) 수치적으로 모사할 때 유용한 모델링 기법이다. 저량은 시간의 흐름에 따라 축적된 것을 주로 표현하는데 재고, 인구, 온실가스축적량 등의 변수가 해당되며, 유량은 단위 시간당 증가하거나 감소하는 양으로 일일 생산량, 출생율, 지표면에서 방출되는 일산화탄소의 연간 배출량 등의 변수를 표현한다. SFD를 작성하고 시뮬레이션을 한다는 것은 바로 상호 관련되어 있는 변수들의 연결 고리를 SFD로 규명한 상태에서 컴퓨터 시간을 진행시키면서 관심변수들이 어떻게 변화하는가를 살펴보는 것이다. 원래 다이내믹스는 기계공학 등에서 주로 사용되는 시스템의 시간 흐름에 따른 행동을 연구하는 방법으로 연구 대상 시스템을 상미분방정식 (ordinary differential equations, ODEs)으로 표현하기 때문에 난해하다. 그러나, SFD는 다이어그램이 가진 명료성을 큰 특징으로 하기 때문에 시스템 상태의 시간에 따른 변화를 이해하기가 비교적 쉽다.

본 연구에서 시스템다이내믹스 방법론을 사용했다고 하는 것은 바로 SFD를 규명하고 시뮬레이션으로 시간에 따른 시스템의 동적 변화를 구현하였다는 것으로 CLD를 사용하지 않은 것은 CLD가 다소 추상적인 개념 간의 관계를 표현하여 문제의 정성적 원인을 찾는 데 유용한 반면 변수의 관계식에서 유래한 정량적 흐름의 관찰이 필요한 시뮬레이션 모델로는 적합하지 않기 때문이다. SFD를 사용해 산업시스템을 모사하려는 연구자들에게 주의할 사항은 많은 시스템의 변수들이 dmnl (dimensionless - '단위없음'을 뜻함) 단위로 표현된다는 점인데 그런 이유로 전통적 운영관리 분야 연구기법을 사용하는 학자들로부터 시스템다이내믹스가 엄정하지 못하다는 비판을 받기도 한다. 그러나, 최근에는 운영관리 분야에서도 정성적 변수를 저량 또는 유량으로 설정한 모델로 시뮬레이션을 수행한 연구를 적지 않게 발견할 수 있다. Kim (2000)은 부품공급사와 (supplier) 제조사 (manufacturer) 그리고 시장(market)으로 구성된 공급망을 상정하여 제조사가 부품공급사에게 원활한 공급망 운영을 위해 줄 수 있는

각종 정성적 장려 혜택의 총합을 표현하기 위한 대리 변수로 ‘지원’을 (subsidiary) 설정하여 그것을 제공하는 경우와 제공하지 않는 경우를 비교해 부품공급사와 제조사 중 누가 혜택을 보는지 알아보기 위한 연구를 수행하였다.

또한, Morrison (2015)은 제조현장에서 편법(workaround)이 작동하는 방식과 그 효과를 연구하였다. 이 연구에서는 현장에 린 시스템을 적용하는 프로젝트에서 매니저들, 현장근무자들 및 혁신 스태프 (자원으로 표현됨)의 인터뷰 및 관찰 결과를 토대로 SFD가 구성되었고 시뮬레이션이 수행되었으며 dmnl을 단위로 하는 저장 변수로서 시간에 따른 작업자 스킬의 변화, 현장 작업자의 적응도가 도입되었다. 혁신 활동이 벌어지고 있는 현장에서 혁신 스태프의 지원이 한정적일 때 (즉, 자원이 부족할 때) ‘부지런하고 선량한<sup>16)</sup>’ 현장 작업자에게 유일한 옵션은 같은 시간에 더 많은 산출을 내는 것으로 이런 경우 편법을 사용하게 되며 단기적으로는 효과가 있지만 장기적으로는 작업자의 기량을 떨어뜨리게 된다 (Morrison, 2015). 비록 연구의 관심 변수가 단위가 없는 지표들이었지만 제기된 현상을 설명하는 데는 무리가 없었다.

본 연구의 주요 관심 변수는 재고량 (단위: 개), 생산량 (단위: 단위 시간당 생산량), 그리고 싸이클타임 (단위: 시간) 등으로 정량적이다. 그런데, 스마트 공장의 구축으로 발생하는 디지털기술효과는 추적성, 투명성 등 정성적 변수이다. 그리고 그 두 종류의 변수들간 상관관계를 추정할 수 있는 데이터는 존재하지 않는다. 이런 상황에서 디지털기술효과 (정성적 변수)가 일으키는 재고, 생산, 싸이클타임 (정량적 변수들)에 대한 동적 변화를 시뮬레이션할 수 있는 모델을 만들려고 한다면 각 변수들간 수없이 많은 조합의 연관성에 대해 무리한 가정을 해야 하기 때문에 시뮬레이션 모델의 유효성을 확보하기 어렵다고 할 수 있다. 본 연구는 사전-사후 결과치를 산출하는 데 시뮬레이션을 사용함으로써 연구 목적을 달성할 수 있으므로 시뮬레이션 모델에 굳이 디지털기술효과를 변수로 포함하지 않아도 된다. 즉, 스마트 공장 구축이라는 사건이 발생했다고 가정한다. 이러한 가정은 IT 투자효과에 대한 이전의 연구에서 그 정당성을 확보할 수 있다. 즉, IT 투자효과는 조직이 IT 자산을 잘 활용하기 위해 기존 프로세스 수행상 관행에 변화를 주는 등의 동반 혁신이 일어나야 비로소 실현된다 (Brynjolfson et al., 2002). 본 연구에서는 스마트 공장 구축 이전의 상황에서 운영성과를 시뮬레이션을 이용해 산출하고 그 결과를 스마트 공장 구축 이후, 즉 Hakoat가 기존 프로세스를 새로운 시스템을 잘 활용하기 위해 변경한 이후 시점을 가정해 수행한 시뮬레이션 결과치와 비교하는 방법으로 디지털기술효과를 반영한다.

---

16) "Industrious, well-intentioned workers" (Morrison, 2015, P.79)



본 연구의 목표가 스마트 공장을 도입했을 때 기대할 수 있는 운영관리 상의 성과 향상을 측정하는 방법론을 개발하는 것이므로 ‘도입이 성공’하였고 ‘기대한 만큼’ 운영 시스템이 작동한다는 다소 낙천적인 전제를 해야한다. 이는 스마트 공장이 도입되기 이전의 상태에서 시스템의 ‘최선의’ 성과와 스마트 공장이 도입됐을 때 변화된 시스템이 낼 것으로 기대되는 ‘최선의’ 성과를 비교하는 방식으로 다른 조건이 동일할 때 스마트 공장의 순기대효과를 측정하기 위해 불가피한 가정사항이라 할 수 있다.

### 3.3.2 Hankoat 내부의 운영관리 체계

본 절에서는 [그림 3]의 VSM을 바탕으로 Hankoat의 운영시스템을 시스템다이내믹스로 표현한 모델을 수립하고자 한다. Hankoat 내부의 운영관리 체계를 검토하는 과정은 제일 먼저 생산관리자가 다음날의 생산 계획을 수립하기 위해 현장의 정보를 취합하는 시점에서 시작한다. 입고제품저장창고로부터 생산대기 중인 총재고를 보고 받고 ( $I_{t-1} + A_t$ ), 도장 및 포장 라인으로부터는 당일의 생산완료 보고를 받는다( $Q_t$ ). 도장 및 포장 작업자는 생산 완료 후 품질 검사를 통과한 제품에 대하여 그 수량에 대하여 보고하여 생산관리자는 비로소 확정된 당일의 생산량을 ( $Q_t$ ) 알게 된다. 생산관리자는 당일의 기말 재고를 계산한 후( $I_t$ ) 1차 업체와 M사의 유관담당자들로부터 수집한 정보 및 공문, 이메일, 전화통화 등을 종합적으로 검토하여 향후 입고량에 대한 대략적 예측을 ( $\widehat{A_{t+1}}$ )하여 다음 날의 자재를 준비시키기 위해 생산목표량을 자재업체에게 전달한다. 자재업체는 자신의 생산 능력과 재공재고 및 완성재고량을 종합적으로 판단하여 자재의 생산 계획을 점검하는 한편 조달이 불가능한 품목을 계산하여 생산관리자에게 전달한다. 생산관리자는 실현 가능한 계획을 수립한 후 생산 목표량을 ( $\widehat{Q_{t+1}}$ ) 확정한다. 다음날엔 ( $t+1$ ) 필요 자재 재고의 입고 여부를 판단하여 확정된 생산스케줄을 도장 및 포장 현장에 지시한다. 확정된 생산스케줄은 빈틈없이 수행된다고 가정한다 (즉, 수율이 100%).

### 3.3.3 단순 모델

[그림 4]는 Hankoat 생산관리자가 복수기간 총생산량을 결정하는 의사결정 방식을 시스템 다이내믹스의 SFD로 구현한 것으로 편의상 ‘단순모델 (Simple Model)’이라고 칭하기로 한다. Simple Model의 구성요소를 좀 더 상세히 설명하면, 먼저 가운데 길쭉한 박스는 재고를 뜻하는 저장변수이고 재고의 좌측 밸브 모양 아이콘은 재고가 입고되는 과정을 묘사한 것으로 단위 시간당 유입량을 뜻하는 유량변수이다. 재고의 우측 밸브

모양 아이콘은 생산되는 과정을 묘사한 것이다. 구름 모양 아이콘은 외부의 시스템을 뜻한다. Simple Model에 사용되는 변수는 다음과 같다.

$A$  = 단위시간당 입고량 (pcs/day), 유량

$Inventory$  = 재고량 (pcs), 저장

$Q$  = 단위시간당 생산량 (pcs/day), 유량

$FGI$  = 출하대기장내 재고 (pcs), 저장

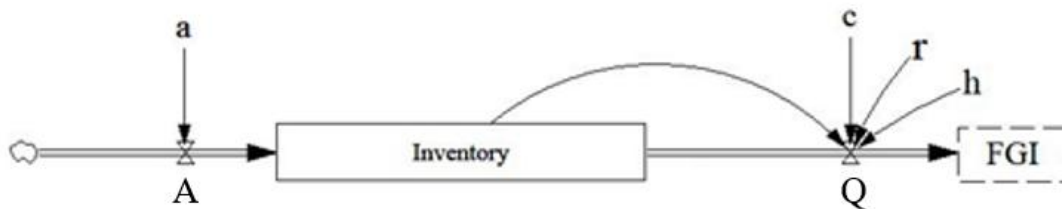
$a$  = 일자별  $A$ 의 실적입고량 (pcs/day), 벡터

$c$  = 최대생산량

$r$  = 제품 한 단위 납품 시 단가

(※ 수리모형의  $p$ 는 단위당 기여 이익으로 차이가 있음)

$h$  = 제품 한 단위 하루 저장 시 비용



[그림 4] Simple Model SFD

시간의 흐름으로 설명하자면 외부에서 단위 시간당  $A$ 가 입고되어  $Inventory$ 에 누적된다. 누적된  $Inventory$ 는 단위 시간당  $Q$  만큼 감소한다.  $Q$ 는 현재의  $Inventory$  그리고  $r$ 과  $h$  및  $c$ 를 참고하여 결정되는 생산량이다. 도/포장이 끝난 제품은 출하대기 상태로 전환되어 출하대기장 내 재고를 뜻하는  $FGI$  (Finished Goods Inventory) 라는 변수를 증가시킨다.  $FGI$ 에 도착한 제품은 다시 외부로 반출된다.  $Q$  변수를 뜻하는 밸브 모양 아이콘으로 향하는 화살표들은 생산량  $Q$ 를 결정하기 위해 생산관리자가 고려하는 변수들을 의미한다. 단순모델에 사용된 의사결정 변수  $A$ ,  $Inventory$ ,  $Q$ ,  $FGI$  는 모두 단위가 피스 (pcs) 이다. 이들은 모두 연속형 변수들로 (continuous variables) 가정해야 하는데 이렇게 가정하여도 장기적 관점의 시스템 운영 성과의 측정 및 시간에 따른 변화를 파악하는데 문제가 없다.

시스템다이내믹스는 이와 같이 담당자 (의사결정자)가 고려하는 정보와 의사결정 방식을 구체적으로 표현할 수 있다 (Morecroft, 1985; Sterman, 1988).

“시스템다이내믹스의 진정한 가치는 운영 구조 (operating structure)의 전체 모습을 알기 위해 하위 구성요소들을 파악하는 과정과 조직의 운영 성과에 운영 구조가 어떻게 영향을 미치는지 시뮬레이션을 통해 알아가는 과정에 있다 (Morecraft, Sterman et al., 1994, P.16).” [그림 4]는 간단하다고 할 수 있는 모델이다. 시스템다이내믹스의 유용성은 더 많은 변수와 그에 따르는 복잡한 인과관계를 추가하여 표현하고 분석해야 하는 상황에서 더욱 두드러진다.

### 3.3.4 Simple Model의 총생산량 결정 방식: 뉴스벤더모형

기본적으로 Hankoat의 생산관리자는 단위당 일 재고유지비용  $h$ 와 단위 납품가  $r$ 을 고려하여 최대생산량  $c$  이내에서  $Q$ 를 결정한다. 최대의 이익을 위해서 *Inventory*가 충분하면  $c$ 만큼 생산을 실시하고 그렇지 않다면 생산을 실시했을 때 발생하는 고정비용 때문에 (수리모형 식 (3)의  $D$ ) 최소생산요구량을 (수리모형 식 (8)의  $S$ ) 기준으로 했을 때 *Inventory*가 더 크면 라인을 가동하고 그렇지 않으면 가동하지 않는다는 의사결정 원칙을 준수한다.  $S$ 는 입고량의 분포가 정규분포를 따른다는 가정하에 단일기간 뉴스벤더모형으로 문제를 단순화시켜 구한다 (제 2장의 식(1) 참조). 즉, 식 (1)의  $c_s$ ,  $c_o$ 는 각각  $r$ ,  $h$ 가 되어  $r$ 은 납품하지 못하여 발생하는 기회비용이 되고  $h$ 는 재고의 과다 보유로 인해 발생하는 비용이 된다. 다음의 식 (1a)는 제 2장의 식 (1)에 simple model의 변수들을 대입하여 정리한 것이다.  $G(S)$  는 수요의 누적 정규분포에서  $X=S$  일때의 값이다.

$$G(S) = \frac{r}{r+h} \tag{1a}$$

최소생산요구량 ( $S$ )는 담당자의 과거 관측에 따른 주관적 수요 분포로부터 유도되는 성질을 지닌다. 따라서 식 (1a)를 이용해 최소생산요구량을 산정하는 것은 입고량 평균과 편차에 대한 경험치를 파악하는 작업으로 시작한다. 입고량의 평균은 담당자가 매일 관리하고 있는 통계이므로 답변을 획득하기 어렵지 않고 주관적 정보와 실적치 통계량이 잘 일치한다. 그러나 특정 정규분포를 규정하는 또 다른 모수인 표준편차는 현장에서 관리하지 않는 경우가 많다. 따라서 표준편차보다는 편차라는 용어를 사용하여 질문하며  $\pm$  (플러스 마이너스) 퍼센트 단위로 요청하는 것이 답변을 받기 용이하다. 이는 엄밀히 말하면 변동계수를 (coefficient of variation) 질문하는 것과 같은 것으로 편차를 평균에 곱해서 구한 값을 표준편차로 간주하면 된다. 다음으로 확보한 평균, 표준편차를 이용해 정규화한 후 마지막으로 식 (1a) 우변의 확률에 따른 표준누적정규분포상 확률변수 값을 대입해  $S$ 를 산출한다.

### 3.4 하청제조기업의 운영성과척도

본 절에서는 시스템의 성과를 측정하는 기준인 성과척도에 대하여 논하고자 한다. 구체적으로, 시스템내 평균 개수, 체류시간, 평균 대기 시간과 같은 대기행렬 이론 (queueing theory)의 성과 척도를 검토한다. 대기행렬 이론에 따르면 현실상의 다양한 시스템들은 제품 (entity), 서버 (server), 그리고 대기열 (queue) 등으로 구성되어 있으며 이들 구성요소 간 조합방법인 설정(configuration)과 특성 (예를 들어 ‘입고 간격 시간은 정규분포를 따른다’)에 따라 시스템의 기대 성과를 산출하는 다양한 모형을 제공한다. 다음으로 가장 기본적인 대기행렬 모형인 단일 서버, 단일 대기열에서 제품의 도착간격과 처리시간이 모두 지수분포를 따르는 M/M/1 모형<sup>17)</sup>으로 Hankoat의 운영시스템을 분석하고 대기행렬 이론상 운영 성과 척도를 재고-생산 분야에 응용할 때 주의할 점을 살펴본다<sup>18)</sup>, 마지막으로 하청제조기업의 성과 척도를 규정하고 실증 데이터 수집에 관하여 논하는 것으로 마무리한다,

#### 3.4.1 대기행렬 이론의 성과 척도

대기행렬 이론에서 사용하는 성과 척도는 다음과 같다. 시스템은 ‘안정상태’에 있음을 가정한다.

- 시스템 내 평균 개수 ( $L$ )  
대기열에서 대기 중인 제품들과 서버에서 처리되고 있는 제품들의 평균 개수
- 시스템 내 평균 체류 시간 ( $W$ )  
하나의 제품이 대기열에서 대기한 시간과 서버에서의 처리 시간의 합계의 기대값
- 평균 대기 시간 ( $W_q$ )  
하나의 제품이 대기열에서 보낸 시간의 기대값
- 평균 대기열 길이 ( $L_q$ )  
대기열에서 대기 중인 제품들의 평균 개수

성과 척도 간에는 다음의 식 (11)이 성립한다. 식 (11)은 리틀의 법칙 (Little's law)으로 알려져 있다.

---

17) 대기행렬 모형의 시스템 식별 표기법으로 MM/1을 해석해보면 마지막 숫자 1은 서버가 하나임을 뜻한다. M은 마코프 과정을 (Markovian process) 뜻한다. 마코프 과정이란 시스템이 미래에 어떤 상태에 있을 확률은 현재의 상태에만 의존하는 확률과정을 (stochastic process) 말한다. 첫 번째 M은 도착 과정이, 두 번째 M은 처리 과정이 마코프 과정을 따라 일어난다는 뜻이다 (Daskin, 2011).

18) 본 논문의 관심 변수인 하청제조기업의 운영 성과 척도 (operational performance measures)는 대기행렬 이론상 성과 척도를 (performance metrics) 제조공장 운영이라는 맥락에서 정의한 것이므로 유사하지만 완벽히 일치하지는 않는다.

$$L = \lambda W \quad (11)$$

$\lambda$ 는 도착률을 뜻하는 상수로 시스템에 도착한 제품의 단위 시간당 평균 개수를 뜻한다. 또한, 식 (12)와 같이 리틀의 법칙은 대기열과 대기시간의 관계도 성립한다.

$$L_q = \lambda W_q \quad (12)$$

이제,  $\mu$ 를 서버에서 단위 시간당 처리하는 평균 개수라고 하면 평균 대기 시간과 평균 시스템 시간 간에는 식 (13)이 성립한다.

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (13)$$

식 (11)~(13) 에서 도착률( $\lambda$ )과 평균 처리 시간( $1/\mu$ )이 알려져 있다는 가정하에  $L$ ,  $L_q$ ,  $W$ ,  $W_q$  중 어느 한 척도의 값만 알아도 다른 값들을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.4.2 대기행렬 모형의 적용

Hankoat의 VSM 하단에 나와 있는 입고제품 저장창고, 도장, 포장 등의 일련의 프로세스들이 모두 대기행렬 이론 관점으로 모형화할 대상들이다. Hankoat의 경우, 입고제품 저장창고에서 차체 1차 업체로부터 입고 받은 ‘사급재고’들을 저장하게 된다. 첫 공정인 도장 라인이 생산을 진행하면 이 생산대기 재고들이 줄어들게 된다. 도장 다음에 있는 포장 라인은 도장 라인의 컨베이어와 동일한 속도로 작업이 진행된다. 그러므로 전체 공장의 생산 속도가 도장 라인의 컨베이어 속도에 맞춰져 있고, 생산대기 사급재고는 이상적인 상태에서 도장 라인의 생산 속도로 줄어들 것이다. 따라서, 도장 및 포장 라인 전체를 하나의 서버로 (1 server), 생산대기 제품이 저장되어 있는 입고제품 저장창고를 하나의 대기열로 (1 queue)로 간주해 볼 수 있다. 다음으로 사급자재의 도착간격시간과 처리시간 분포를 결정해야 한다. 도착간격시간 분포란 시설에 도착하는 고객, 즉, Hankoat의 경우 한 피스(piece)의 제품 도착시간과 그 제품에 잇따라 발생한 도착 시간 사이 간격의 통계적 분포를 말하는 것이다. 처리시간의 분포는 제품 한 피스를 처리하는 데 걸리는 시간의 분포이다. 이러한 분포들은 데이터의 탐색을 통해 추정한다. 본 절에서는 이러한 도착간격시간과 처리시간의 분포가 모두 지수분포인 M/M/1 모형에 대입하여 Hankoat 운영시스템의 기대 운영 성과 척도를 산출해 보고자 한다.

Hankoat의 도착간격시간 분포가  $1/\lambda = 9.25 \times 10^{-5}$  를 (단위:일, 24시간동안 10,800 피스 입고 가정) 평균으로 하는 지수분포를 따르고, 처리시간은 평균  $1/\mu = 8.33 \times 10^{-5}$  (단위:일, 24시간동안 12,000 피스 처리 가정) 으로 하는 지수분포를 따른다고 가정한다면, 시스템 내 평균 개수 ( $L$ )는 다음 식 (14)에 의해 9 피스로 추정된다.

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (14)$$

평균 체류시간( $W$ ) 및 평균 대기시간( $W_q$ )은 각각 식 (11), 식 (13)에 의해  $83.25 \times 10^{-5}$  일(71초),  $73.84 \times 10^{-5}$  일(64초)이며, 따라서 대기열 내 사급재고의 대기 재고의 개수 ( $L_q$ )는 식(12)에 의해 약 8 피스가 된다.

그런데, 차체부품같은 중후 장대한 아이템을 도장 및 포장하는 공장에서 하루 중 어떤 시점에 처리를 기다리는 재고의 개수를 파악했을 때 평균 8 피스가 있을 것이라는 것은 현실적이지 못하다. 다음은 M/M/1 모형의 가정 사항들이 Hankoat의 현실과 얼마나 차이 나는지 세부적으로 검토한다. 이렇게 함으로써 Hankoat로부터 습득한 데이터를 M/M/1 모형의 공식에 맹목적으로 대입하여 얻는 기대 운영 성과 척도는 그 해석에 많은 주의가 요구됨을 알 수 있다.

- (1) M/M/1의 가정을 따르자면 도장라인은 동시에 1 피스만 수용이 가능하다.
  - Hankoat의 도장 설비는 다수의 행잉포인트(hanging point)가 컨베이어 체인에 연결되어 도장라인의 길이 만큼 많은 숫자의 제품이 동시에 처리되고 있다. 또한, 포장 라인까지 하나의 서버로 간주하기 때문에 포장 라인을 통과할 때까지 처리가 끝나지 않는다. 그러므로 1 서버가 동시에 1 피스만 처리 가능하다는 가정을 충족시킬 수 없다.
- (2) M/M/1은 제품 1 피스의 처리가 완료됐을 때 바로 Hankoat를 떠난다고 가정한다.
  - 현실은 포장이 끝난 후 출하대기 상태로 시스템에 남아있기 때문에 이 가정도 충족시킬 수 없다.
- (3) M/M/1은 도착간격시간 확률 분포를 지수함수로 가정한다.
  - 지수분포의 특징은 무기억성(memoryless)으로, 도착 간 평균 시간이 10분인 경우를 예로 들면 마지막 고객이 도착한 지 8분이 지났을 때 다음 고객이 도착할 때까지의 조건부 시간 분포는 여전히 평균 10분의 지수함수를 따른다 (Daskin, 2011). Hankoat의 사급제품은 공급망 상부에서 유입되는 것으로 Hankoat에 제품을 입고시키는 1차업체는 그 생산 능력이 한정적이다. 따라서 매일 일정한 양이 유입되지는 않더라도 하루에 입고될 수 있는 양은 어느 정도 한정적이므로 M/M/1

모형이 가정하는 순수한 형태의 지수분포를 따른다고 볼 수 없다.

(4) M/M/1의 처리 시간 분포는 ‘단일 제품’임을 가정한다.

- 실제로는 다양한 형상, 두께 및 구성을 가진 제품이 입고되기 때문에 처리시간이 동일하지 않다. 한편, 도장과 포장 라인은 속도가 동기화된 (균형라인 조건, balanced line condition) 컨베이어를 이용해 공정을 진행한다. 그러므로 제품 처리 시간은 곧 컨베이어 속도라고 가정할 수 있으며 이 경우 처리 시간을 상수로 가정할 수도 있다. 그러나 현장에서 일어나는 배치처리 (batch processing)행위 때문에 단일 제품을 가정하는데 신중하여야 한다. Hankoat에는 제품 여러 피스를 하나의 행거에 (hanger) 매달고 한꺼번에 행잉하는 (hanging) 작업관행이 있다. 제품 종류에 따라 달라지는 행잉 개수 때문에 제품 한 피스 당 다른 처리속도를 가지고 있는 것으로 파악할 수 있다. 예를 들어 A제품은 행거 당 5 피스를 행잉할 수 있고 B 제품은 20 피스를 행잉할 수 있다면 (즉, 행거 당 처리시간이 1분이라고 할 때 처리시간은 A는 12초, B는 3초가 되는 것이다) 동일한 컨베이어 시간이 흐를지라도 제품 구성 (product mix)에 따라 산출량은 달라질 것이다. 또한, 매일 일정한 작업시간 동안 도장 및 포장 작업을 수행한다고 해도 제품 구성에 따라 일자별로 다른 산출량을 얻을 것이다. 그러므로 ‘단일 제품’ 가정 또한 충족할 수 없다.

### 3.4.3 재고-생산 이론에서의 운영 성과 척도

앞 절에서 Hankoat의 운영 시스템 데이터를 M/M/1 모형의 공식에 대입하여 얻은 평균체류시간 등 성과척도 값은 직관적으로 이해하기 어려운 면이 있었다. 그러나, 대기행렬 이론이 제시하는 시스템에 대한 관점 (즉, 구성요소를 서버, 대기열, 제품 등으로 구분하는 것)과 운영 성과 척도를 정의하는 방식은 Hankoat 운영 시스템을 분석할 때도 유용하다. Hankoat의 현장에서 획득이 가능한 정량적 자료들을 활용하여 다양한 경우를 가정해 시스템 운영 성과를 산출하기 위해서는 대기행렬 이론의 기본 개념을 제조기업의 생산 운영 시스템이라는 맥락에서 적용 가능한 별도의 척도가 필요하다. 제조기업에서 실제 프로세스 시간 (process time)은 공장의 전체 사이클타임 중 불과 5~10 퍼센트만 차지할 뿐이고 대부분의 사이클타임은 자원을 (사람, 기계, 운반구, 및 자재) 기다리는 시간으로 구성된다고 알려져 있다. 모델의 변수인 운영 성과 척도<sup>19)</sup>는 [표 6]에 정리하였다.

19) 식 (15)~(17), 식(19)~(20) 및 운영 성과 척도는 모두 Hopp와 Spearman (2000)을 따름.

[표 6] 하청제조기업의 운영 성과 척도

운영 성과 척도	기호	단위 (영문)	정의	Hankoat 운영상 의미
재공재고	<i>WIP</i>	피스 (pieces)	제품 라우팅의 시작점과 종료지점 사이의 재고	입고제품 저장창고에서 도장 공정 투입을 기다리는 사급 재고와 도장 라인, 포장 라인 내부를 이동 중인 모든 재공재고의 합
산출율	<i>TH</i>	피스/일 (pieces/day)	한 생산 프로세스의 단위시간당 평균 생산량	하루 동안 포장 라인을 빠져나와 출하대기 상태가 된 제품의 평균개수
사이클타임	<i>CT</i>	일 (days)	하나의 제품이 라우팅의 시작점으로부터 종료지점을 거치는데 걸리는 평균 시간 (즉, 제품이 재공재고로 보내는 시간)	평균적으로 하나의 제품이 입고제품 저장창고에 도착한 시점으로부터 마지막 공정인 포장을 완료할 때까지 소요된 시간
가동률	<i>u</i>	해당없음	전체 가동 시간 중 재고 부족으로 인해 가동하지 못한 시간을 제외한 가동 시간의 비율로서 가동시간에는 기계 고장, 셋업, 그리고 기타 사유로 인한 비가동도 포함한다.	일 실질적 최대 생산 가능량 대비 실제 생산량의 비율

\* 운영성과척도, 기호, 정의 출처 : Hopp와 Spearman (2000)

가. 재공재고, 산출율, 사이클타임 간의 관계식

다음은 대기행렬 이론을 소개할 때와 마찬가지로 리틀의 법칙으로부터 유도된 운영 성과 척도 간의 관계이다.

$$WIP = TH \times CT \quad (15)$$

식 (15)는 어떤 시점에서 하청기업이 재고로 가지고 있는 제품은 공장 전체에 걸쳐 (Hankoat의 경우, 입고제품 대기장소 및 도장, 포장 라인 내부를 모두 포함해서)



다양하게 분포하고 있을 것이고 그 개수 전체를 ( $WIP$ ) 평균 산출율 ( $TH$ )의 속도로 처리한다면 사이클타임 ( $CT$ )만큼의 시간이 소요된다는 것을 의미한다.

나. 생산대기재고 및 생산대기시간의 정의

대기행렬 이론에서와 마찬가지로 평균 대기열 길이 ( $L_q$ ), 평균 대기 시간( $W_q$ )과 유사한 개념의 생산대기재고( $WIP_q$ ), 생산대기시간을 ( $CT_q$ ) 정의할 수 있다.

- 생산대기재고 ( $WIP_q$ )

입고 처리가 완료된 제품은 생산대기 상태가 되는데 이렇게 생산대기 상태에 있는 재고의 개수를 의미하며 입고제품 저장 창고에 있는 재고가 된다.

- 생산대기시간 ( $CT_q$ )

제품이 입고 직후부터 생산에 투입되기 직전까지 보내는 평균 시간이며 한 제품이 평균적으로 입고 제품 저장 창고에서 보내는 시간을 의미한다.

생산대기재고 및 생산대기시간이 포함된 운영 성과 척도들 간의 기본적 관계는 식 (16)과 같다.

$$WIP_q = TH \times CT_q \quad (16)$$

다. 공정사이클타임의 정의

식 (15)의  $CT$ 는 식 (16)의 생산 대기시간과 ( $CT_q$ ) 공정 사이클 타임으로 ( $CT_p$ ) 분해된다.

- 공정사이클타임 ( $CT_p$ )

입고 대기품으로 기다리던 재고가 생산에 투입되어 최종 공정을 마칠 때까지 보내는 시간이며 순수히 도장 및 포장 공정을 거치는데 소요되는 시간을 뜻한다.

$$CT = CT_q + CT_p \quad (17)$$

$CT_p$ 는 계획기간 [1, ... ,T] 동안 일정하다고 할 수 있으며 그 이유는 도장 및 포장 공정이 컨베이어로 이루어져 있기 때문이다. 하나의 행잉포인트에 다양성을 가진 다수의 제품을 행잉할 수 있어도 개별 제품이 도장, 포장 공정에서 보내는 시간은 단일한 컨베이어의 진행 속도에 따르게 된다.

라. 하청제조기업에서 가동률의 의미

가동률 ( $u$ )은 Hancoat와 같은 장치 산업적 특징을 가진 사업체에서 매우 중시하는 척도로서 핵심 설비를 평균적으로 얼마나 빈번히 운영 중인지를 평가한다. 대기행렬 이론에서는 가동률을 어떤 한순간 서버의 상태가 ‘서비스 중’ (server in busy state)일 확률인 ‘가동 비율(utilization ratio)’,  $\rho$ 로 표시하고 식 (18)<sup>20)</sup>과 같이 입고율과 처리율의 관계식으로 정의한다.

$$\rho = \lambda / \mu \quad (18)$$

Hopp와 Spearman (2000)은 가동률을 “부품 부족에 기인한 비가동을 제외한 가동 시간의 비율”로 정의하여 식 (19)와 같이 도착률을 (Arrival Rate) 실제적 생산율 (Effective Production Rate)로 나눈 값을 사용하며 식 (18)의  $\rho$ 와 유사하다. 실제적 생산율이란 평균 최대 생산율로서 계획 기간 동안 설비의 비상정지시간, 셋업시간 등을 포함한 기타 생산성 저해 요소를 모두 감안한 비율이다 (Hopp, Spearman, 2000).

$$u = \frac{\text{Arrival Rate}}{\text{Effective Production Rate}} \quad (19)$$

장기적 안정상태에서 입고되는 모든 제품이 완제품으로 출고된다고 가정한다면 식 (19)의 *Arrival Rate* 을 산출율 ( $TH$ )로 대체할 수 있다.

$$u = \frac{TH}{r_b \times CT_p} \quad (20)$$

$u$ 는 최대치인 1.0에 (즉, 100%에) 근접할수록 사이클타임 등 시스템의 성과가 급격히 저하되는 경향이 있다. Pound et al. (2014)은 기업이 생산능력 투자를 (capacity investment) 통해 영업적, 재무적 성과를 거두고자 할 때 목표 가동률은 전략적으로 선택할 수 있는 변수라고 보았으며, 수요변동성이 낮은 자산과 (예, 화학공장) 수요변동성이 높은 자산의 (예, 소방차) 사이클타임을 비교한 직관적인 그래프를 통해 (Pound et al., 2014, P.241) 전자의 경우는 사이클타임이 급격히 증가하는 시점이 비교적 높은 가동률일 때 나타나므로 고가동률을 유지하는 것이 좋고, 후자의 경우는 비교적 낮은 가동률일 때에도 사이클타임이 급격히 증가하는 시점이 도래하므로 낮은 가동률이 유지되는 것이 사업전략에 비추어 옳은 방향임을 주장하였다 (이 경우, 가용 생산 능력이 커지므로 빠르게 사태에 대응할 수 있다).

---

20) Daskin (2011).

본 연구의 목적은 Hankoat의 현재 시점의 운영 관리 성과척도와 향후 시스템 설정이 변화했을 때 운영 관리 성과척도를 비교하는 것으로서 기본적으로 사업 모델의 변화는 없는 것으로 가정하기 때문에 가동율은 본 연구의 주요 관심 변수에서 제외하기로 한다<sup>21)</sup>.

### 3.4.4 데이터 수집 방법

본 연구의 대상인 하청제조기업으로부터 실제 현장의 데이터를 수집할 때 싸이클타임과 재고는 수집이 비교적 난해하다. 특히 재고는 그 부정확성 (inaccuracy) 문제가 널리 인식되어 있다. Chuang과 Oliva (2015)는 리테일 부문에서 재고불일치 문제가 정직원과 파트타임 직원의 채용 비율에 따라 심각해지거나 경감된다는 시뮬레이션 연구를 발표한 바 있다. 본 연구에서는 Hankoat로부터 매 분기 기초 재고와 일 입고정보, 일 생산정보 데이터만 수집하였다. 따라서 재고 정보는 수리모형 식 (6) 균형제약조건으로 산출한 값을 사용하였다.

데이터 수집이 현장 상황으로 인해 거의 불가능한 또 다른 데이터는 싸이클타임이다. 싸이클타임은 모든 입고 제품에 대해 타임스탬프를 (개별 제품에 입고 시간을 상세히 기록한 태그 같은 표식) 발행한 후 제품이 외부로 출고될 때의 시간을 기록하여 입고 시 타임스탬프와의 차이를 관측치로 삼고 이들 관측치들의 데이터 세트를 수집하여야 하기 때문에 시간과 비용이 많이 든다. 이런 이유로 Hankoat로부터 실적 데이터를 확보할 수 없었다. 그러므로 싸이클타임 또한 리틀의 법칙으로부터 유추한 산출치를 사용하기로 한다<sup>22)</sup>.

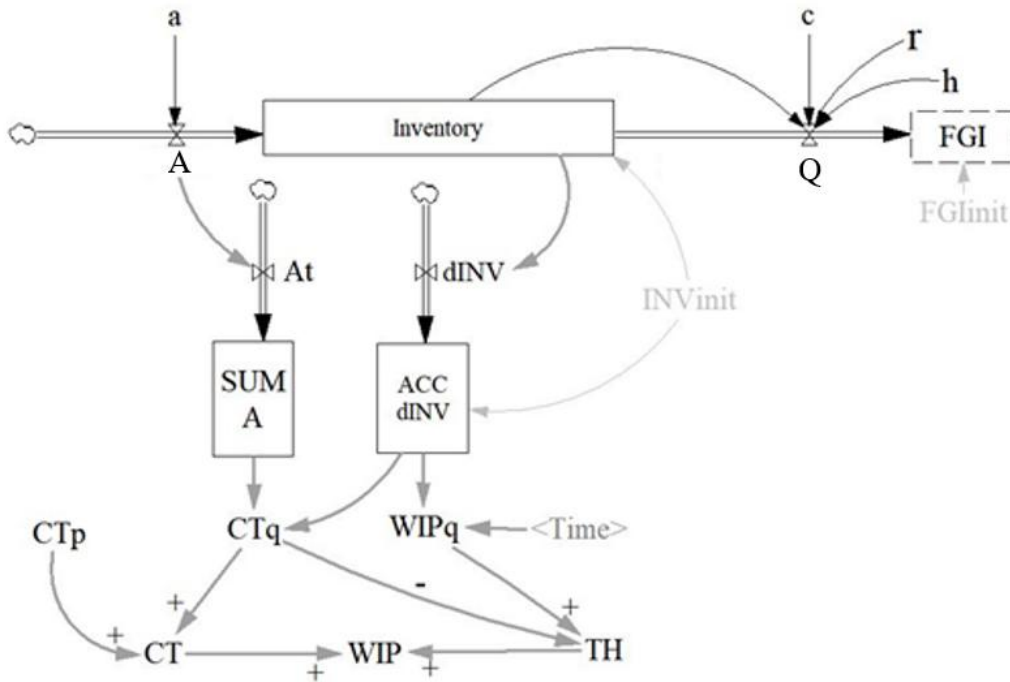
## 3.5 확장모델의 개발

### 3.5.1 운영 성과 척도 계산식의 반영

[그림 5]는 Simple Model에 시간에 따른 운영 성과 척도를 ( $WIP$ ,  $TH$ ,  $CT$ ) 산출할 수 있는 계산식을 포함시킨 것으로 편의상 ‘확장모델’이라 칭하기로 한다. [그림 5]를

21) 가동율을 생산성 지표의 일종으로서 제조 현장에서는 중점적으로 관리한다. 현장마다 나름의 계산식으로 가동율을 산출하기 때문에 현장 관리자로부터 입수한 가동률 데이터는 식 (20)의 결과와 많은 차이를 보일 수 있다.

22) 고객이 느끼는 대기시간과 식 (17)의 싸이클타임은 그 격차가 클 수 있다. 고객의 입장에서 긴급 품목 발주가 많은 기간에는 조금의 대기 시간도 크게 느껴질 수 있지만 싸이클타임은 모든 품목에 대해 장기적 평균 개념을 취하기 때문에 큰 변화가 없을 수 있다. Hankoat의 경우는 싸이클타임은 고객과 합의한 리드 타임 대비 충분히 작으며 납기 관리에 있어서는 ‘미납이 (한 기간동안 납품해야 할 총 품목수 대비 납기를 초과한 품목의 수) 주요 관리 지표로 사용되고 있다.



[그림 5] 운영성과척도 산출로직을 포함한 확장모델

자세히 살펴보면 Simple Model 하부에 다소 복잡한 변수들 간의 관계를 표현하는 다이어그램이 추가되어 있으며 최하단에 가동율을 ( $u$ ) 제외한 3가지의 운영성과척도가 나타나 있음을 알 수 있다. Simple Model을 계획 기간 동안 실행하면 생산량( $Q$ ), 재고량( $Inventory$ ) 등의 변수들이 결정되나 운영 성과 척도를 계산하는 통계량을 자동으로 축적하지는 못한다. [그림 5]의 운영 성과 척도 계산 부분은 리틀의 법칙이 유도되는 과정이며 식 (21)~(23)을 SFD로 표현한 것이다.

- $a(t)$  :  $[0, t]$  기간 동안 도착한 제품의 총 숫자
- $d(t)$  :  $[0, t]$  기간 동안 시스템을 떠난 제품의 숫자
- $N(t)$  :  $[0, t]$  기간 동안 시스템에 있는 제품의 숫자이고  $N(t) = a(t) - d(t)$
- $l(t)$  :  $[0, t]$  기간 동안 축적된 제품×시간 총량 (곱)
- $L(t)$  :  $[0, t]$  기간 동안 시스템 내 평균 제품 수
- $W(t)$ :  $[0, t]$  기간 동안의 제품 당 평균 시스템 내 체류 시간

$$l(t) = \int_0^t N(\tau)d\tau = \int_0^t [a(\tau) - d(\tau)]d\tau \quad (21)$$

$$W(t) = \frac{l(t)}{a(t)} \quad (22)$$

$$L(t) = \frac{l(t)}{t} = \frac{l(t)}{a(t)} \cdot \frac{a(t)}{t} \quad (23)$$

식 (23)은  $t \rightarrow \infty$  일때,  $\lim_{t \rightarrow \infty} L(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{l(t)}{a(t)} \times \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{a(t)}{t}$  가 되며,

이는  $L = W\lambda$  가 되어, 식 (11)의 리틀의 법칙과 같다 (Daskin, 2011).

이제 [그림 5] 모델의 변수와 식 (21)~(23)의 관계를 대응시켜 보면 다음과 같다.

- 식 (22)에서  $a(t) = SUM\_A$ , 즉,  $SUM\_A$ 는  $A$ 의 누적량이다.
- 식 (21)의  $N(\tau) = dINV = A - Q + Inventory(\text{직전기})$   
 $= Inventory(\text{현재})$

따라서, 식 (22)의  $l(t) = ACC\_dINV$ , 즉  $Inventory(\text{현재})$ 의 누적량이다.

- 식 (23)의  $\frac{a(t)}{t}$  는  $[1, t]$ 기간의  $A$ 의 평균값이 된다.

### 3.5.2 재고-생산 이론의 산출율과 대기행렬 이론의 입고율

이제 식 (23)에 있는  $L$ 과 운영 관리 맥락에서 사용되는 리틀의 법칙인 식 (15)에 있는  $WIP$ 와의 차이점을 고찰하고자 한다. 식 (23)의  $L$ 은 식 (11)의  $L$ 과 동일한 것으로 시스템 전체의 제품 수로 정의된다. 식 (15)의  $WIP$ 는 재공재고를 (work-in-process) 뜻한다. 식 (11)의  $W$ 는 식 (15)의  $CT$ 에 해당한다. 그렇다면 식 (11)의  $\lambda$ 는 식 (15)의  $TH$ 에 해당하지만  $\lambda$ 는 입고율인 반면  $TH$ 는 산출율이기 때문에 그 대응 관계가 직관적이지 못하다. 즉, 식 (15)의 정의를 따르자면 식(22), 식(23)의  $a(t)$ 가 모두  $d(t)$ , 즉 시스템을 떠난 제품의 수로 치환되어야 하는 것 아닌가 하는 의문을 가질 수 있다. 결론적으로  $WIP$ 의 정의에 유의한다는 조건하에 식 (15)의  $WIP$ ,  $TH$ ,  $CT$ ,  $WIP_q$ ,  $CT_q$  는 [그림 5]의 성과 척도 산출 방식을 그대로 쓸 수 있다. 장기적 평균, 즉  $t \rightarrow \infty$  일때는 유입된 모든 제품이 유출된다고 가정하므로  $\frac{a(t)}{t}$ 와  $\frac{d(t)}{t}$ 가 수렴한다 (Daskin, 2011).

따라서  $\lambda$ 를  $TH$ 로 치환해도 식 (15)는 유효하다고 할 수 있다. 식 (15)의  $WIP$ 는 어느 순간 Hankoat 공장 전체에 출고되지 않고 남아있는 모든 제품의 총합으로 정의된다. [그림 5]에서 최종제품 창고 (finished goods inventory, FGI)가 점선 사각형으로 묘사되어 있는 까닭도 시스템 외부로 간주하기 때문이다. 즉,  $WIP$ 는 도/포장 대기 공간에 적치된 물량과 도/포장 라인 전체에 걸쳐 프로세스가 이루어지고 있는 제품의 합이다. 일반적인 생산관리 맥락에서는  $WIP$ 를 재공재고라는 단어 의미 그대로 공정에 투입되어 작업이 진행되고 있는 제품의 개수를 지칭한다. 즉, 공정 투입 대기

창고에 있는 제품은 시스템 경계 외부에 있는 것으로 본다. 그러나 본 연구의 *WIP*는 공장 전체의 재고로 정의함으로써 한 제품이 하청제조기업에 도착하면 바로 대기시간이 경과한다고 간주한다.

### 3.5.3 산출율 (TH) 계산 방식의 검토

확장모델은 *TH*를 식 (16)에 따라  $CT_q$ 로부터 유추한다. 이는 *TH*가 *Q*의 전체 계획 기간 동안의 단순 평균과는 다른 개념이기 때문이다. 그런데 [그림 5]의 모델에서 *Q*를 충분히 오랜 기간 누적하여 평균하면 *TH*에 근접할 것이라는 점도 추론이 가능하다. 따라서, 현실 시스템 시계열의 평균으로 대체 가능한 *TH*를 굳이  $CT_q$ 로부터 유추할 필요성이 있는지 의문이 생길 수 있다.

확장모델에서  $CT_q$ 의 도출과정은 식 (19)를 구현한 것으로 식 (19)에서 분모는  $a(t)$ 이므로  $t$ 기까지 입고된 개별 제품의 대기시간 기대값으로 해석할 수 있다. 만약 식 (19)를 변형하여  $d(t)$ 를 분모로 취한다면 처리가 완료된 제품의 대기시간 기대값이 된다. 따라서 이론에서 말하는 충분히 긴 계획 기간이 아니라면 현실의 입고, 생산 데이터를 적용했을 때 각각의  $CT_q$ 가 다를 수 있는데, 비록 작더라도 그 차이가 엄연히 존재하므로 입고량 관점인지 생산량 관점인지 어떤 관점을 선택하는 것이 연구 목적에 충실한가의 기준으로 판단할 문제로 귀결된다. 본 연구에서는 방금 입고된 제품 한 피스의 사급재고가 소요하게 될 대기시간과 그 대기시간의 하위 구성 요소들에 대해 규명하고자 하므로 식 (17)에 따라 모델을 구성하기로 한다.

### 3.5.4 하청제조기업의 수익극대화 전략

하청제조기업은 사급자재를 입고 받아 임가공한 후 납품하는 업체로, 정해진 가격, 정해진 품질기준, 정해진 원자재, 변동하는 사급자재 입고량이라는 조건 하에서 수익을 내야 하기 때문에 규모의 경제를 (평균 비용이 최소가 되는 어떤 생산량  $Q^*$ 에서 달성된다) 통해서만 수익을 극대화할 수 있다. 그 생산계획 방식은 사급자재의 입고량을 처리하는 생산량 결정에 초점이 맞추어져 있고, 생산관리자는 다음 기의 입고량을 ( $A_{t+1}$ ) 미리 알 수 없기 때문에 매 기말 재고평가를 통해 생산량을 결정하는 과제를 안고 있다고 말할 수 있다. 규모의 경제를 실현할 수 있을 만큼 충분한 재고가 있다면 생산능력  $c_t$ 만큼 생산하면 된다. 그러나 다음  $t+1$ 기에도 생산할 재고가 있어야 하므로 재고비용을 감내하면서 현재의 재고를 이월시킨다.

### 3.6 운영성과척도의 재무적 성과척도 변환

#### 3.6.1 운영-재무 성과척도 간 변환의 어려움

디지털 전환 프로젝트의 수행을 통해 개선된 *WIP*, *TH*, *CT* 실적으로 증가한 재무적 효과를 평가하기 위해서는 운영 성과척도를 재무적 성과와 연결하는 관계식의 정의가 필요하다. 그러나 운영성과를 재무적 성과로 변환하는 일반적 공식은 찾기 어렵다. Anupindi et al. (2012)은 운영성과지표의 개선을 재무적으로 환산하기 위해서는 업무 프로세스의 분석을 수행하여 제품생산 및 서비스의 구현에 이용되는 자원의 증감을 검토해야 한다고 주장하였으며, 재고의 감소, 자원활용도의 개선을 어떻게 재무적으로 환산할 수 있는지 가상의 사례를 통해 제시하였다. 먼저, 재고의 감소는 재고 회전율의 증가를 가져오는 혁신의 도입으로 가능하며 기대되는 재고 회전 증가분으로부터 기대 평균재고 수준 감소분을 도출한다. 이를 다시 재고의 평균 매입 단가를 곱한 값이 재무적으로 환산된 재고의 감소분이 된다는 것이다. 또한, 자원활용도 개선의 재무적 환산에 관해서는 인력의 재배치가 발생한 경우를 예로 들며 디지털 응용프로그램 도입으로 감소하는 고객 응대 사원들의 총임금 합계와 고임금 고급기술자를 추가 채용함으로써 발생하는 임금증가분의 차이를 계산하였다.

#### 3.6.2 재무적 성과척도로서의 현금전환주기

본 연구에서는 연구 목표와 가장 부합하는 재무적 성과지표로 현금전환주기를 (cash conversion cycle 또는 cash-to-cash cycle, *CCC*) 선택하고자 한다. 현금전환주기는 조직의 자금이 운영 시스템에 묶여 있는 시간을 말하는 것으로 어떤 기업이 자재 구매에 사용한 대금, 자재를 제품으로 전환하는 데 든 비용, 출고된 제품을 고객에게 전달하기까지 든 비용을 포함하는 모든 비용들이 발생된 시점으로부터 고객이 해당 상품 대금을 지불하는 시점 사이의 소요 시간을 말한다 (Anupindi et al., 2012). 식 (24)는 이러한 현금전환주기의 구성요소를 수식으로 표현한 것이다.

$$CCC = Days\ of\ Inventory + Days\ of\ Receivables - Days\ of\ Payables \quad (24)$$

- Days of Inventory (재고자산보유기간)

기업이 외부로부터 매입한 제품을 생산대기 상태에서부터 시작해 최종 출하까지 기업 내부에 재고로 머문 평균 시간을 의미한다 (고형일, 송영출, 2012).

- Days of Receivables (매출채권회수기간)

고객에게 제품을 인도한 대가로 발행된 매출채권이 얼마나 빠른 주기로 현금화되는가를 측정하는 변수로서 매출채권 평균회수기간은 ‘매출채권회전율<sup>23)</sup>’이라는 재무 지표를 역수로 취한 후 365 (일/년)를 곱하여 일 단위로 환산하여 사용한다 (허윤영, 백원선, 2018).

- Days of Payables (매입채무지급기간)

기업이 공급업자로부터 매입한 원재료 및 상품을 공급자로부터 인도받은 시점으로부터 매입채무를 현금 지급하는 시점까지의 기간이다 (고형일, 송영출, 2012).

본 연구에서는 하청제조기업 내부의 노력으로 개선될 수 있는 지표에 대해서 논하므로 원청과의 대금지불주기 등 양자 간의 계약 이슈가 있는 지표는 변화하지 않는 것으로 가정한다. 한편, 하청제조기업들은 많은 경우 고객과 특수한 관계로 인해 매출채권회수기간이 장기적일 경우 재정적 어려움을 감내해야 하는 것으로 알려져 있다. 또한, 하청제조기업은 ‘재무적 제약이 존재한다’고 말할 수 있다. 그 이유로는 조달 규모가 작고 원청과의 관계는 종속적이므로 신용도가 낮을 수 밖에 없어 외부자금을 조달할 때 대기업에 비해 상대적으로 높은 조달비용을 부담할 것으로 예상되기 때문이다. 재무적 제약을 가진 기업은 매출채권은 더 먼저 회수하고자 하고 매입채무는 더 늦게 지급하고자 하는 동기가 있다 (허윤영, 백원선, 2018).

매입채무지급기간은 개별 하청제조기업과 각종 자원 공급자의 관계로부터 영향을 받는다. 어떤 하청제조기업의 원재료가 시장 내 공급이 부족하여 그 공급자가 더 큰 협상력을 갖는다면 매입채무지급기간은 짧아질 것이다. 그러나 공급자에 대한 하청제조기업의 협상력은 스마트 공장의 성공적 구현과 큰 관련이 없어 본 연구의 범위에서 벗어난다. 따라서 본 연구에서는 재고자산보유기간만이 측정이 가능하고 연구 목적상 유효한 관심 변수임을 알 수 있다. 나머지 두 요소는 하청제조기업의 특수성 때문에 고려하기 쉽지 않다.

---

23) 매출채권회전율 = 연간매출액 / 평균매출채권

여기서, 평균매출채권은 간편히 결산기말 매출채권잔고로 대체하여 사용 (미래와경영연구소, 2006).



### 3.6.3 운영성과척도 - 현금전환주기 관계식

Anupindi et al. (2012)은 디지털 전환이 현금전환주기를 줄이는 데 사용될 수 있으며 그 경로를 두 가지로 요약하였다 - ① 사이클타임을 줄여 개선한다 ② 매출채권회수기간을 줄여 개선한다. 이중 ②의 경로에 대해서는 Hancoat와 같은 하청제조기업이 실행할 수 있는 개선 여지가 크지 않으므로 경로 ①로 인한 개선 효과로부터 스마트 공장의 가치를 찾기로 한다.

하청제조기업의 현재 시점 현금전환주기를  $CC_e$ , 스마트 공장 구축 이후 시점의 기대 현금전환주기를  $CC_p$  라고 하고, 두 현금전환주기의 차이에 대하여 고찰해 보고자 한다. 편의상 현금전환주기를 계산하는 3개 주기값의 변화량은 주기값 앞에 차이를 뜻하는  $\Delta$  (delta)를 붙여 표현하고자 한다. 현금전환주기(CCC)의 단위는 모두 일(days)이다.

- $\Delta Days of Inventory$

운영 시스템 내부에서 머무는 체류 시간의 차이, 곧  $CT$ 의 차이이다.  $CT$ 는  $CT_q$ ,  $CT_p$  로 구성되고,  $CT_p$ 의 경우는 스마트 공장을 도입한다고 해서 줄어들거나 늘어나지 않는다. 그러나  $CT_q$ 의 경우는 스마트 공장을 도입하여 가장 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

- $\Delta Days of Receivables$

매출채권회수기간의 차이. 하청제조기업의 경우 고객과의 특수한 관계로 감소를 기대하기 어렵다고 가정한다 (도급자의 대금지불 정책이 바뀌지 않는 한 바뀌지 않을 것으로 예상됨). 따라서  $CC_e$ 에서  $CC_p$ 를 차감하는 과정에서 상쇄될 것으로 예상된다.

- $\Delta Days of Payables$

매입채무지급기간의 차이. 하청제조기업의 경우 스마트 공장 도입 전후로 변화가 있을 것으로 기대하기 어렵다. Hancoat의 경우 자재업체와의 결제 주기가 고정되어 있으므로 스마트 공장 구축의 영향을 받지 않는 것으로 가정한다.

$$\begin{aligned}
CC_d &= CC_e - CC_p \\
&= \Delta Days of Inventory + \Delta Days of Receivables - \Delta Days of Payables \\
&= \Delta CT_q
\end{aligned}$$

(25)

이제 제 2장, 식 (2)에 있는  $R_i$ 와  $CC_d$ 의 관계식에 대하여 검토하고자 한다. 스마트 공장에 의해서 하청제조기업이 양(+)의  $CC_d$ 값을 얻었다면 이는 프로젝트 이전 대비 현금전환주기가  $CC_d$ 만큼 감소한 것이다. 이는 그 하청제조기업이 1년간 고객사의 사급재고를 처리하는데 투하된 자금인 매출원가를  $COGS$  (cost of goods sold)라고 할 때 1일간 투하자금인  $COGS/365$ 에  $\Delta CT_q$ 를 곱한 값이 된다. 이러한 방식으로 계산한 현금전환주기 감소분의 재무적 가치의 실제 사례는 제4장의 마무리 부분에 소개되어 있다.

## 4. 적용 사례 - Hankoat 스마트 공장 운영성과 산정

제3장에서는 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크를 수행하는데 필수적인 하청제조기업의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 제4장에서는 개발된 모델을 실행하기 위하여 Hankoat의 실적 데이터를 수집하고 모델에 대입하여 시뮬레이션을 실행함으로써 프레임워크의 결과물인 스마트 공장 구축 이후 기대되는 운영 및 재무 성과 척도의 기대 변화를 추정한다.

### 4.1 데이터 수집

연구에 사용한 데이터의 종류는 다음과 같다.

- 2019년 4월 1일부터 2020년 3월 31일까지 Hankoat에서 입수한 입고량과 생산량
- 2019년 3월 31일 현재 기말재고
- 각종 생산 관련 워크샵 회의록 및 녹취록

#### 4.1.1 입고 데이터의 기초 분석

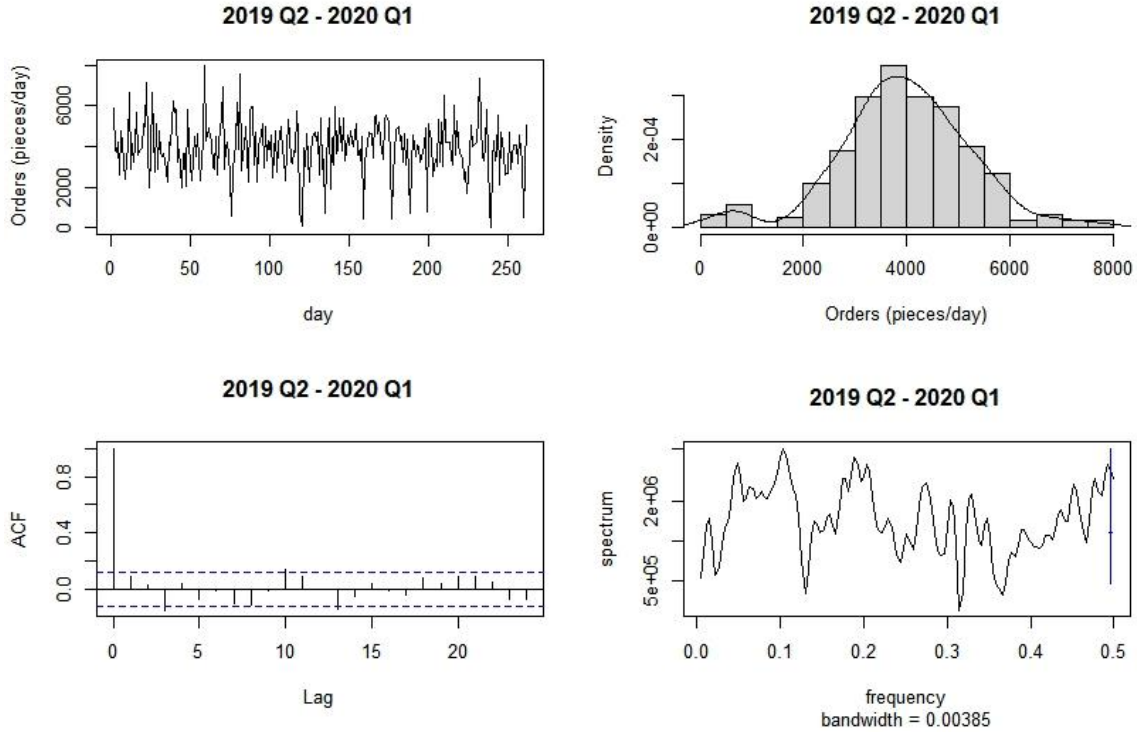
입수한 정량적 데이터 중 먼저 입고량을 분석하였다. 기초적 시계열 분석을 통해 입고량이 어떠한 패턴을 가지는지 탐색해 보고자 한다. 먼저 기초 통계량은 다음의 [표 7]과 같다.

[표 7] 입고량의 기초 자료 요약

관측개수 (개)	최소값 (pieces)	최대값 (pieces)	평균 (pieces)	중앙값 (pieces)	표준편차	변동계수
262	13	7948	3937	3962	1301	0.33

여기서 변동계수는 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 변동의 크기를 평균 대비 상대적으로 가늠하기 위한 척도이다. [그림 6] 좌상단은 시계열을 시간의 순서에 따라 표출한 것이다. 시계열 그래프로는 특정한 규칙성을 찾을 수 없었다. 우상단은 도수 분포표이다. 1000 피스 (pieces) 지점 이하에 작은 첨두가 (peak) 존재하고 4000 피스 지점을 중심으로 좌우의 분포가 대칭을 이루지는 않지만 대체로 정규분포와 유사하다고 볼 수 있다<sup>24)</sup>.

24) 정규성 검정 방법으로 샤피로-윌크 검정을 수행해 보았으며 p-value, 0.0018으로 1% 유의수준에서 입고량이 정규분포를



[그림 6] 연중 입고량의 기초 시계열 분석

[그림 6] 좌하단의 그래프는 표본 자기상관계수를 (sample autocorrelation coefficient) 시차에 따라 표출한 상관도표 (correlogram) 이다. 시계열은 한 시기 관측값이 이전 시기와 이후 시기와 상관관계가 있는지 파악하는 것이 필요하다 (이궁희 등, 2015). 상관도표의 x축은 시차이고 y축은 표본상관계수로 0 시차일 때를 제외하고 큰 상관관계가 없다고 판단된다<sup>25)</sup>. 마지막으로 우하단의 그래프는 시계열에 어떤 주기성이 있는지 파악하는데 사용되는 스펙트럼 (spectrum) 도표이다. 이는 스펙트럼 밀도 함수를 표출한 것이다. 스펙트럼 도표는 x축이 주파수(주기의 역수)이고 y축이 밀도로 최고밀도가 나타나는 곳의 주기마다 시계열이 반복된다고 파악한다 (이궁희 등, 2015).

스펙트럼 도표를 통해 파악한 입고량의 주기성은 다수의 피크가 관측되며 0.1과 0.2에서 두드러진다. 각각 10기와 20기의 주기로 해석이 되며 1차업체의 납기마감일 주기로 입고가 집중되는 현상이 반영된다고 파악할 수 있다.

따른다는 귀무가설을 채택할 수 없다는 점이 확인되었다.

25) 가로지르는 두 점선 사이에 표본상관계수가 위치하면 상관관계가 약하다고 파악함

이상으로 입고량의 시계열적 특징을 살펴본 결과, 입고량은 대체로 정규분포를 따르며 개별 관측값과 이전 관측값과의 상관관계를 찾기 어려웠으나 주기적 입고 집중 현상을 관찰할 수 있었다.

#### 4.1.2 생산 데이터의 기초 분석

다음은 생산량의 시계열 분석을 수행하였다. 기초 통계량 데이터는 [표 8]과 같다. 입고량과 생산량 둘 다 같은 기간 동안의 데이터를 수집하였지만 관측개수가 입고량과 차이가 있는 것은 ‘값 없음’ (not available, NA)에 해당하는 관측치를 모두 제외하였기 때문이다.

[표 8] 생산량의 기초 자료 요약

관측개수 (개)	최소값 (pieces)	최대값 (pieces)	평균 (pieces)	중앙값 (pieces)	표준편차	변동계수
240	2940	5858	4309	4300	619.9	0.14

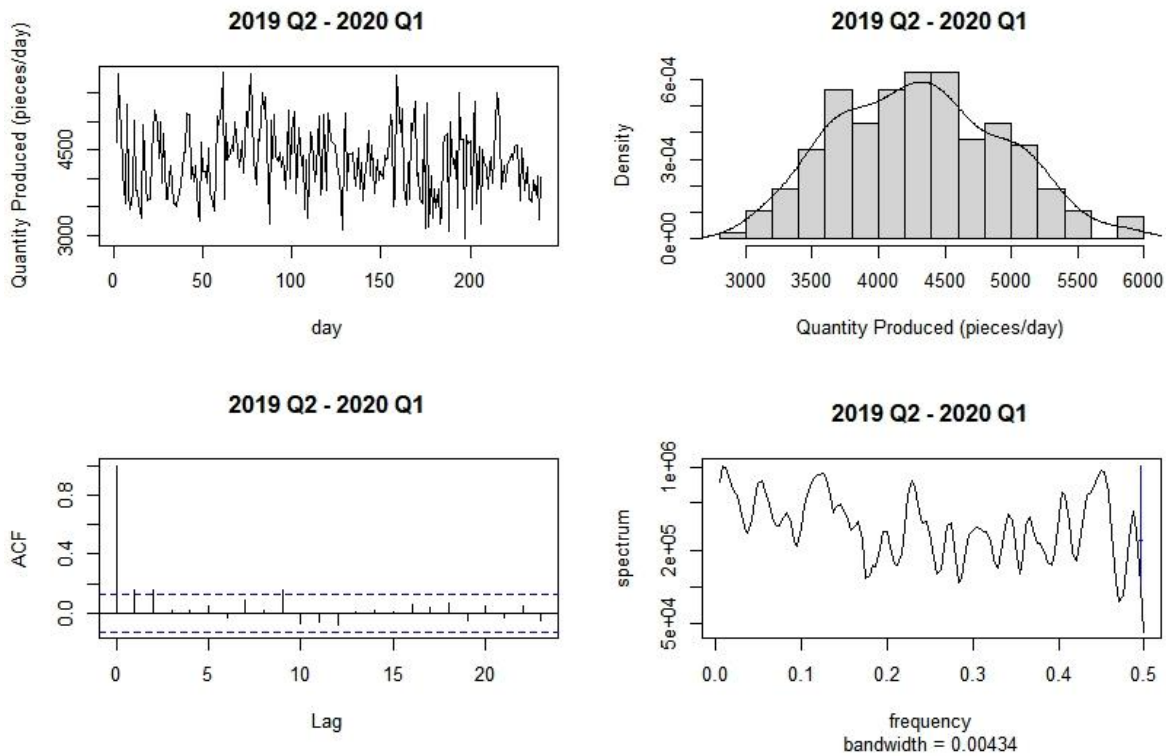
[그림 7]은 [그림 6]과 동일한 구성의 그래프들로 입고량을 분석할 때와 마찬가지로 좌상단에는 입고량을 시간에 따라 표출하였고, 우상단에 도수분포표, 좌하단에 표본자기상관계수의 상관도표, 마지막으로 우하단에는 스펙트럼 도표를 배치하였다. 생산량의 도수분포표는 입고량의 도수분포표 대비 더욱 중형에 가까워 정규분포와 유사함을 알 수 있다<sup>26)</sup>. 상관도표는 1시차 및 2시차의 관측값이 서로 약한 상관관계가 있음을 시사한다. 스펙트럼 도표를 보면 매우 많은 피크 주파수가 관측되는데 이는 휴무가 끝난 월요일 등에 주기적으로 생산량이 급증하는 현상과 무관하지 않을 것으로 사료된다. 생산량 시계열의 기초분석 결과, 생산량은 평균 4309, 분산 (619.9)<sup>2</sup>의 정규분포를 따르며 일일 생산량 간의 변동이 매우 작으며 직전 직후의 생산량이 현재 생산량과 약한 상관관계를 가지고 있다는 것으로 종합할 수 있다.

#### 4.1.3 데이터 기초 분석 종합

기초 데이터 분석을 종합해 보면 입고량보다는 생산량의 분산이 더 작았으므로 생산량의 더 완만한 분포는 주어진 입고량의 변동을 흡수하여 매일 일정량을 생산하는 평활화 생산 정책을 (level production policy) 사용했기 때문이거나 단지 하루의 생산

26) 사피로-윌크 정규성 검정 결과는  $p=0.0567$ 로서 유의수준 1%에서 생산량이 정규분포를 따른다는 가설을 기각한다.

능력 이상을 생산하지 못하기 때문에 발생하는 이월 효과 (spill-over effect)일 수도 있다는 가설을 세울 수 있다. 수집한 정량적 데이터의 기초 분석 과정으로는 입고량의 변화에 따른 생산량의 연동 여부는 분석하지 못하였으므로 입고량과 생산량의 관계에 대한 추가인 분석과정이 필요하며 이를 통해 생산관리자가 생산량을 어떠한 방법으로 결정하는지에 대해서 좀 더 구체적으로 파악할 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 7] 연중 생산량의 기초 시계열 분석

#### 4.2 Hancoat의 운영 성과 측정

Hancoat의 운영 현장으로부터 입수한 입고량과 생산량의 데이터로 운영 성과를 평가하고자 한다. 본 연구에서 제시한 운영 성과 척도는 모두 장기 평균 개념의 척도들이다. 장기 평균이란 대기행렬 모형에서 말하는 안정적 상태와 유사한 개념으로 계획 기간 초기의 불안정한 시스템 상태는 물론 계획 기간 중의 특정 시점 주문의 폭주나 라인의 불안정으로 야기되는 시스템 운영 성과의 저하를 모두 평활화하여 측정할 값을 의미한다.

#### 4.2.1 시스템 운영 성과 분석

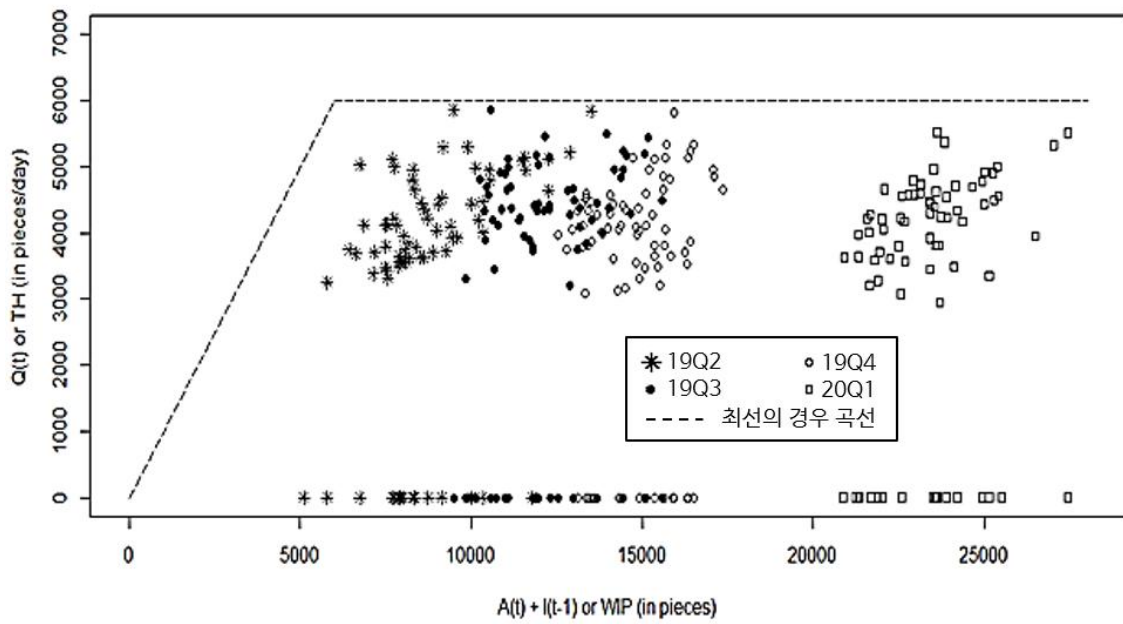
Hopp와 Spearman (2000)은 재공재고(*WIP*)의 수준별로 바람직한 산출율(*TH*)과 사이클타임(*CT*)이 존재하다는 아이디어에 착안하여 내부벤치마킹 방법 (internal benchmarking) 개발하였다. 이를 이용하면 현재 성과가 최선, 최악, 차선의 경우 중 어디에 속하는지 장기 평균재고 수준, 사이클타임, 산출율의 실적치를 중심으로 파악하는 것이 용이하다. 이 방법은 경쟁자와의 상대적인 비교를 중시하는 통상의 벤치마킹 방법을 쓸 수 없는 제조시스템을 위해 개별 기업이 이론적으로 도달할 수 있는 (자신의) 최선, 최악, 차선의 사이클타임 및 산출율을 계산할 수 있는 공식을 제시한다. 이를 통해 스스로 현재 수준을 비교해 볼 수 있는 도구로 사용할 수 있는 것이다.

본 연구에서는 내부벤치마킹 방법을 전체 데이터셋을 분기별로 나누어 기간별 운영 성과를 비교하는데 사용하고자 한다<sup>27)</sup>. 왜냐하면 Hankoat로 입고되는 사급재고량의 수준은 기간별로 차이가 있고 입고가 많을 때는 *WIP*가 평균적으로 높기 때문에 산출율이 최대 생산량에 가까운 경우가 많은 반면 스마트 공장의 기여가 대체로 저평가될 수 있기 때문이다 (즉, 투명성, 추적성과 같은 디지털 효과가 발휘되지 않아도 실적이 좋음). 즉, 분기별로 재공재고에 따른 산출율과 사이클 타임의 수준을 최선의 경우와 비교해 보아 최고의 성과를 달성한 기간의 데이터를 시뮬레이션의 입력으로 선택하고자 한다.

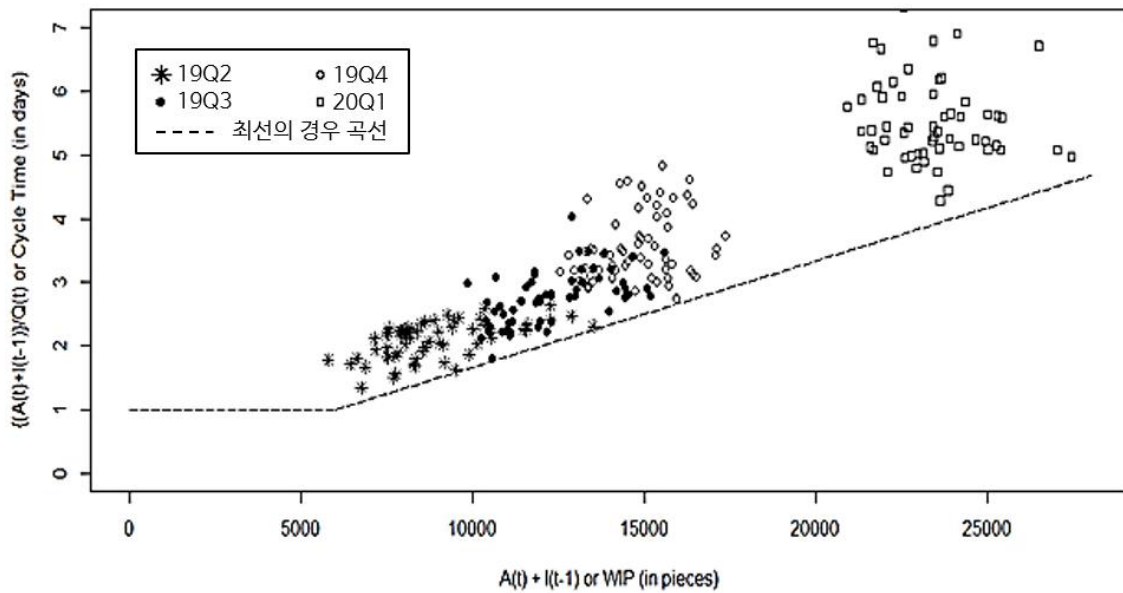
*WIP* 수준을  $w$ , bottleneck 공정의 생산속도를  $r_b$ , 시스템 내 *WIP*가 0일 때 한 개의 제품이 시스템 전체를 통과하는 시간을  $T_0$ 라고 할 때, 단위 시간당 최대생산량  $TH_{Best}$ 는  $w \leq W_0$  일 때는  $w/T_0$ 로 계산하고, 그 외의 경우에는  $r_b$ 로 계산한다. 이때  $W_0 = r_b \times T_0$ 이다 (Hopp, Spearman, 2000, P.234).  $CT_{Best}$ 는 리틀의 법칙을 따라 유도해서 사용한다. 내부 자료에 의거  $r_b$ 는 약 6,000피스/일,  $T_0$ 는 1일로 파악되었다. 이 정보를 이용해 전술한 공식들에 대입해 보면  $W_0 = 6,000$  피스,  $TH \times WIP$  평면에서는 *WIP*가  $[0, 6000]$  일 때  $TH_{Best} = r_b/W_0$ , 6000 이상일 때는  $TH_{Best} = 6000$ 이 된다는 결론에 이른다.

수집한 데이터인  $A_t$ ,  $Q_t$ 를 활용하여  $I_t$ 를 계산하였다.  $I_t$ 는 Hankoat의 입고제품 저장공간에서 대기 중인 상태의 재고량이며 이는  $WIP_q$ 와 (대기열의 길이) 같다.  $CT_p$ 는 확장모델에서 상수로 간주하였다.  $t$ 기에 생산 대상 물량인  $A_t + I_{t-1}$ 은 *WIP*와 같으며  $TH$ 는  $Q_t$ 와 같다.  $CT$ 는 측정된 관측치가 없으므로  $WIP/TH$ 를 대신 사용하였다.  $TH$ 의 단위가 하루(1 day) 생산량일 때는 생산량 ( $Q_t$ )이 그대로  $TH$ 가 된다. 이런 방법으로 *WIP*에 따른  $TH$  ([그림 8] 참조), *WIP*에 따른  $CT$ 의 변화를 ([그림 9] 참조) 그래프로 분석할 수 있게 된다.

27) 원래 의도한 내부벤치마킹의 활용 목적은 '개선의 여지 찾기'이다 (Hopp 와 Spearman, 2000).



[그림 8] 재고와 생산량의 산점도



[그림 9] 재고와 싸이클타임의 산점도



## 4.2.2 하청제조기업의 생산전략

하청제조기업의 운영관리에서는 사급재고의 특성상 물량 (즉,  $A_t + I_{t-1}$ )의 많고 적음에 따라 생산의 여부를 판단하는 것이 중요하다. 고객은 제품 도급 단가 계약을 체결할 때 시간에 따른 물량의 증감을 고려하지 않고 연속 생산을 가정한다. 그러므로 하청제조기업은 ‘규모의 경제’를 달성할 수 있는 상황에만 생산하는 방법으로 이익을 얻고 그렇지 않은 상황에서는 재고 유지 비용을 (즉, 수리 모형에서  $h$ ) 부담하더라도 재고를 이월시키는 정책이 더 유리할 수 있다.  $(A_t + I_{t-1}) \times TH$  평면을 ([그림 8] 참조) 살펴보면 어떤 날은 6,000피스 가까이 생산할 수 있었고, 어떤 날은 생산 가능한 충분한 물량이 있음에도 3,000피스 밖에 생산하지 못하였다는 사실을 확인할 수 있다. 충분한 물량이 있을 때 최대 생산 능력만큼 생산하여 이익을 확보하지 못하면 물량이 충분하지 않을 때 발생하는 손해 때문에 목표 이익률을 달성하기 어렵다. 그러므로 충분한 물량이 있는데도 최대 생산량을 달성할 수 없게 만드는 원인이 무엇이었는지 규명할 필요가 있다.

## 4.3 스마트 공장 구축 방향성 설정

### 4.3.1 생산 현장의 제약요소

Hankoat의 현재 운영 성과를 개선할 수 있으려면 어떤 문제를 해결해야 하는지 알아보기 위해서 다년간 생산관리를 담당해 온 관리자들과 반구조화 (semi-structured) 면접을 진행하여 [표 9]와 같이 생산 현장의 제약요소를 파악하였다.

생산관리자들을 면접한 결과, 제품대기 공간과 자재대기 공간을 경제적으로 사용해야 하는 환경에 있고 이로 인해 최대 생산량이 제약을 받는 경우는 포장자재가 부족하거나, 제품이 부족한 경우로 나눌 수 있음을 알게 되었다. 또한, 제품을 입고하는 업체들의 예정 입고는 자주 변경되고 이에 대해 담당자들의 고충이 있는 것으로 파악되었다.

### 4.3.2 솔루션의 목표 이미지

[표 9]에서 도출한 문제점들을 해소하거나 그 영향을 최소화하기 위해 스마트 공장을 도입한다면 어떤 형태의 솔루션이어야 하는지를 연구하기 위해 [표 3]에서 도출된 디지털 기술효과를 (즉, 추적성, 투명성) 설계 요구사항으로 반영한 사용자 인터페이스

모크업을 (user interface mock-up) [그림 10]과 같이 구성하였다. 모크업은 현실 세계의 현장 상황을 실시간으로 공장 레이아웃 위에 표출하는 것을 기본 기능으로 한다. 모크업의 전체 기능을 보면 지도형태로 구성된 공장 레이아웃 위에 지게차의 위치, 제품의 위치, 현재 도장라인에서 작업 중인 제품의 코드 등이 동영상 화면처럼 시간에 따라 변화하며 나타난다. 실제 솔루션이 도입된다면 제품 대기 창고나 포장 자재 대기 창고에 커서를 가져가는 동작은 해당 위치에 현재 어떤 제품이나 자재가 있다는 것이 코드로 표출될 것이다. 또한 Fast Forward 버튼을 누르면 지금으로부터 1시간 뒤부터 1일 뒤까지 상황을 미리볼 수 있을 것이다.

[표 9] 생산 제약 요소 파악을 위한 인터뷰 결과 요약

질문	답변
생산대기 저장공간의 부족으로 하루 최대 생산가능량을 생산해야 할 때 그렇게 하지 못하는 이유는 무엇입니까?	[생산대기품 적치장 운영 문제] “대기품을 찾는 과정에서 컨베이어를 놓치거나 지게차가 급하게 이송 중 팔레트 전도 등 발생” [제품부족에 의한 로스발생] “근무시간대별로 도장설비에 행잉할 수 있는 제품이 한정적인데 해당 제품이 부족하거나 하면 로스가 발생” [자재부족에 의한 로스발생] “며칠 연속 최대 생산량을 계속 생산하면 자재업체도 생산능력이 달릴 때가 있다”
생산대기 제품의 숫자가 경제적 생산량에 미치지 못할 때도 생산해야 하는 이유는 무엇입니까?	[팔레트 부족 문제] “전용 팔레트에 담겨오는 제품일 경우, 업체가 팔레트를 빨리 비워달라고 한다” [입고량 예측 오류] “되도록 빨리 생산하여 대기품을 적정 규모로 유지해야만 물건이 몰려올 때 여유가 있다.”
최대 생산가능량을 제약하는 요소들은 어떤 것이 있습니까?	[작업량 분산을 위한 제품믹스] “거의 하루 종일 (특정제품)웬더만 스케줄 했더니 작업자들의 원성이 컸다” [입고 예정 아이템 오류] “업체가 스케줄을 갑자기 변경하면 포장재 조달이 어렵다” [각종 대기공간 부족] “대기하는 포장자재를 최소화하기 위해 변경 사항이 발생하면 업체에게 긴급 납품을 자주 요청하게 된다”

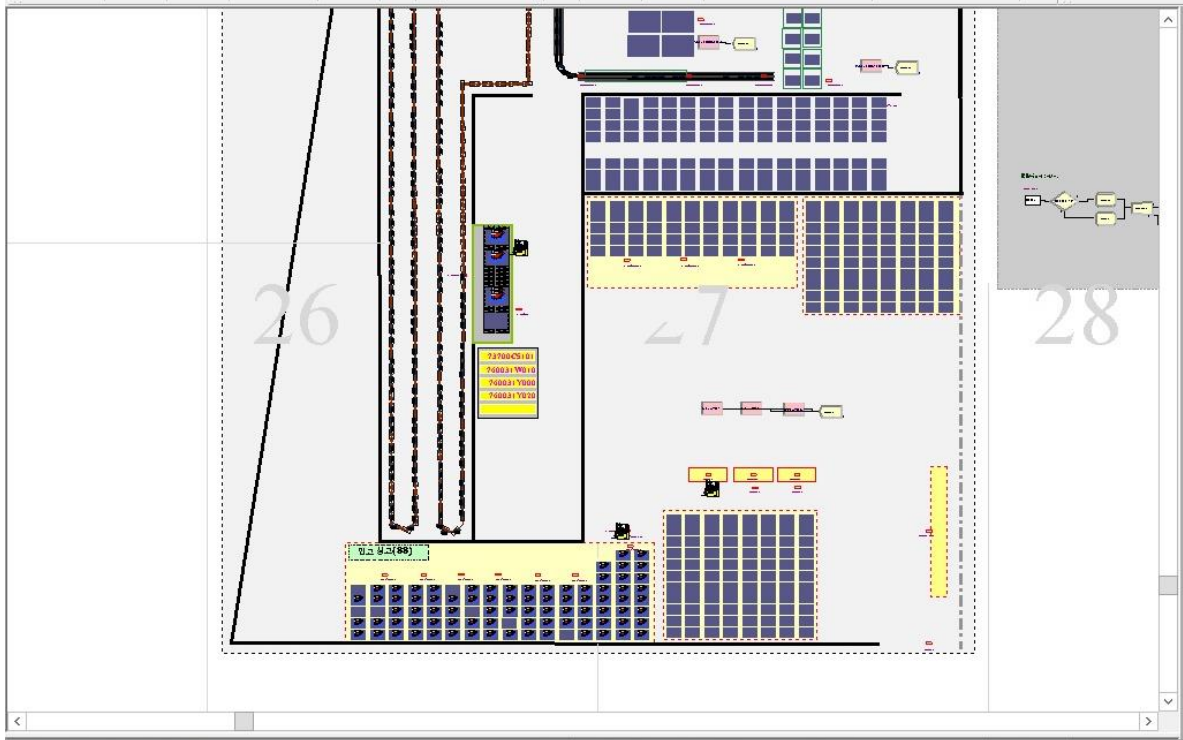
모크업으로 시연된 것과 유사한 동적 현황판이 실제 배치되어 1시간 또는 1일 뒤 상황을 모사할 수 있는 기능을 갖춘다면 생산관리자가 현장을 뛰어다니며 일일이 현황 확인을 하지 않더라도 데스크에서 현재 대기 중인 제품의 구성, 위치, 입고된 포장자재의 위치, 종류, 수량 등과 함께 현재 자재업체로부터의 공급 파이프 라인상에 어떤 제품을 위한 자재들이 이동 중인지를 한꺼번에 파악이 가능한, 공장 상황의 전지적 시점을

제공할 것이다. 이렇게 확보된 전지적 시점은 수행 가능한 생산계획을 수립하도록 돕고 가까운 미래에 대기창고, 자재창고에 벌어질 상황이 시각화될 수 있으므로 생산관리자가 지금 당장 어떤 조치를 취해야 할지 명료해질 것으로 기대된다.

전술한 모크업의 묘사 및 솔루션의 시뮬레이션 기능은 스마트 공장 솔루션의 접근 방식 중 많은 응용 사례를 가지고 있는 '디지털 트윈 (digital twin)'과 유사하다. 디지털 트윈은 물리적 제조 현장과 가상의 세계를 일치시키는 통합 기술인데, 제조 프로세스의 수행 과정에서 다수의 스마트 운영 관리 방식을 실현하고자 하는 목표를 가지고 있다 (Tao, Zhang, 2017). Tao와 Zhang (2017)은 물리적 제조현장과 가상의 제조 현장이 일치되어 가는 과정을 네 단계로 구분하였다. 구체적으로 소개하자면 (1) 생산이 순전히 물리적 현장에만 의존하는 단계로서 효율, 정확성, 투명성이 모두 낮은 단계 (2) 정보기술의 발달에 힘입어 CAD/M 시스템 (computer aided design/manufacturing) 등이 발달하는 단계로서 컴퓨터가 생산에 이용되는 단계 (3) 통신, 센서, 인터넷의 발달로 물리적 현장과 가상 현장의 소통이 원활해지는 단계 (4) 지속적인 기술의 발달로 가상의 현장이 물리적 현장만큼이나 중요해지는 단계이다. 단계별 진화의 방향성은 현장의 데이터를 더욱 정확하고 투명하게 수집하고 지능화된 방법으로 활용하는 데 그 초점이 맞춰져 있다.

Cameron et al. (2018)은 디지털 트윈을 시뮬레이션 도구 활용의 관점으로 바라보았다. 시뮬레이션을 활용해 온 전문가들은 디지털 트윈으로 인해 자신이 개발한 모델이 앞으로는 복잡한 시스템에 내재되어 시뮬레이션 결과와 현장으로부터의 실적 데이터가 비즈니스 문제를 풀기 위한 방향으로 통합될 것으로 전망했다. 연구자 간 합의된 아키텍처는 아니지만 디지털 트윈은 전통적 실행 레벨 IT 시스템인 MES (manufacturing execution system), POP (point of production) 등이 각종 통신 버스 와 이더넷 프로토콜로 연결된 상태에서 PLC와 (programmable logic controller) 같은 설비의 하드웨어 컨트롤 장치에 접속해 설비에 작업지시를 내리거나 설비로부터 데이터를 취득하고 분석하는 기능이 추가된 형태의 시스템이다 (Cameron et al., 2018). 디지털 트윈이 실제 현장을 잘 반영할 수 있도록 하기 위해서는 현장의 하부시스템에서 끊임없이 원천 데이터를 중앙으로 전송해야 한다. 실시간으로 정확한 현장 상황 데이터를 획득하기 위해서는 센서와 무선 통신 장비들을 조합하여 현황 기록 자동화를 달성하여야 한다. 김정아, 정종필 (2018)은 중소기업의 창고 관리 수준은 입고, 출고만을 기록하는 형태로 이런 방법으로는 정확한 재고 파악이 어렵다는 점을 문제로 인식하였다. 저자들은 실험실 레벨의 물리적 모델을 만들어 무선 신호 송수신 기능과 비전 센서를 탑재한 '자율이동모듈'이 창고를 이동하면서 재고를 자동으로 실시간 파악하는 '스마트 창고관리 시스템'의 컨셉트를 제안하였다. 이와 같은 방법으로 현황

정보 수집을 자동화하여 데이터의 신뢰성을 제고하고 인터페이스 설계에 있어 직관성을 더한다면 디지털 트윈은 실시간 공유가 가능한 전사적 운영 대시보드 (operation dashboard)의 역할을 할 수 있을 것이다.



[그림 10] Hankoat 스마트 공장 사용자 인터페이스 모크업

#### 4.4 디지털 기술효과와 시스템 설정 변화

본 절에서는 Hankoat의 스마트 공장이 생산 계획에 활용된다면 확장모델의  $c$  (즉, 일일 최대생산가능량)가 어떻게 (path), 얼마나 (magnitude) 변화될 것인가를 살펴본다. 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크에 따르면 스마트 공장이 Hankoat에 성공적으로 구축된다면 추적성과 투명성이라는 스마트 공장의 디지털 기술효과가 운영 시스템의 모수를 변화시키는 시스템 설정 변화의 (changed configuration) 시점이 올 것이다. 본 절은 그 가상의 시점에서 Hankoat의 일 최대생산량을 추정하는 방법에 대해서 논한다.

#### 4.4.1 현실적 최대생산량의 계산원리

하루 이론적 최대생산량을  $c_{max}$  라고 할 때 Hankoat는 각종 제약 요소로 인해  $c_{max}$  대비 감소된 현실적 최대생산량 ( $c_{PB}$ )을 초과하여 생산할 수 없다. 현실적 최대생산량은 제시된 식 (26)의 비선형 회귀식을 이용하여 계산할 수 있다. 식 (26)에서  $Y$ 는 종속변수 (dependent variable)이고  $Y^*$ 는  $Y$ 의 기준값 (reference value)이다.  $X_1 \dots X_n$ 은 독립변수 (independent variables)이며  $X_i^*$ 는  $X_i$ 의 기준값이다.

$$Y = Y^* \times Effect(X_1 \text{ on } Y) \times Effect(X_2 \text{ on } Y) \times \dots \times Effect(X_n \text{ on } Y) \quad (26)$$

$$Effect(X_i \text{ on } Y) = f(X_i / X_i^*) \text{ for } \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

즉, 개별  $X_1 \dots X_n$ 의 곱셈적 영향에 의해 기준값 (reference value)  $Y^*$ 가 변화한 결과가  $Y$ 가 된다고 정의하며 이는 시스템다이내믹스에서 변수들 사이의 비선형적 관계를 모델에 포함할 때 유용하게 사용된다 (Sterman, 2000). 본 연구의 맥락에서 살펴보면  $Y$ 는 현실적 최대생산량  $c_{PB}$ 가 되고 요인  $X_1 \dots X_n$ 은  $c_{PB}$ 에 영향을 주는 현실적 요소가 되며  $Y^*$ 는  $c_{max}$ 가 된다.  $c_{PB}$ 는 Hankoat 관리자들의 경험치를 대입하여 요인  $X_1 \dots X_n$ 을 확정적 변수로 간주하였다.

#### 4.4.2 현실적 최대생산량의 계산

Hankoat의 현실적 최대생산량  $c_{PB}$ 는 도/포장공정 전체를 통과하는데 소요되는 시간인  $CT_P$  (단위: 시간)와 시간당 실질적 최대생산율  $r_b$  (단위:  $pcs/hr$ )의 두 인자에 의해 결정된다. 여기서  $CT_P$ 는 새로운 공정을 도입하지 않으면 변화되지 않는 값이므로 결국  $c_{PB}$ 의 현실성은  $r_b$ 를 계산할 때 어떤 현실적 요소를 감안하느냐에 달려있다.

$c_{PB}$  계산의 첫 번째 단계는 이론적 최대생산량  $c_{max}$ 를 구하는 것이다. 이를 설비의 스펙만큼 생산할 수 있을 때 달성가능한 생산량으로 정의하면 Hankoat 공정의 이론적 최대생산량은 다음의 식 (27)과 같다.

$$c_{max} = CT_P \times Maximum\ Hangers/hr \times Maximum\ Pieces/Hanger \quad (27)$$

Hankoat로부터 입수한 모수들은 다음과 같다.

- 공정 사이클 타임 ( $CT_p$ ) : 1일 (= 9 hours)
- 시간당 최대 행거수<sup>28)</sup> ( $MaximumHangers/hr$ ) : 60 Hangers/hr
- (제품의) 행거당 최대 행잉갯수 ( $MaximumPieces/Hanger$ ) : 16 pieces/Hanger

이를 식 (27)에 대입하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} c_{\max} &= 9 (\text{hours/day}) \times 60 (\text{Hangers/hr}) \times 16 (\text{pcs/Hanger}) \\ &= 8,640 \text{ pcs/day} \end{aligned}$$

이상의 이론적 최대치에 제품구성비변동, 근무시간시수, 행거충진을 등 현실적 요소를 반영하여 시간당 실질적 최대생산량  $r_b$ 를 구할 수 있다. 그 고려 요소들은 다음과 같다.

가. 제품 구성비 : (-) 영향

도장공정은 다양한 형태와 무게를 가진 제품들을 처리하기 때문에 한 행거에 걸릴 수 있는 갯수 또한 다양하다. 따라서 이론적 최대 생산량의 기준은 가장 많은 갯수를 행거에 로딩할 수 있는 품목 기준으로 산출되어 정리되어 있다. 단위 시간인 하루 내내 최대 갯수 행잉 품목만 계속 작업할 수 있다고 가정하기는 현실적으로 어려우므로 제품 구성비의 영향으로 최대 생산량 기준이 하향 조정된다. Hankoat에 입고되는 품목은 크기에 따라 대물, 중물, 소물 세 가지 아이템으로 구성되며 담당자 인터뷰 결과 입고 제품의 구성비 벡터를  $\vec{m} = (\text{대물}, \text{중물}, \text{소물})$  라고 할 때  $\vec{m} = (0.2, 0.3, 0.5)$ 이며 한 행거당 행잉 개수 벡터를  $\vec{b} = (\text{대물}, \text{중물}, \text{소물})$ 라고 할 때  $\vec{b} = (4, 6, 16)$ 인 것으로 파악되었다. 따라서 어느 한 시점에 도/포장 공정을 통과 중인 행거 하나를 샘플링한 후 그 행거에 걸린 제품의 갯수를 세었을 때  $(\vec{b})^T \vec{m}$ 로서 평균 10.6 피스/행거 일 것으로 기대된다. 이를 행거당 최대 행잉갯수인 16 pcs/Hanger 로 나누면 0.6625가 된다.

나. 야근 및 특근으로 인한 초과 생산량 : (+) 영향

평일 초과 근무 시간은 일일 생산량을 증가시키며 (주말 및 공휴일) 특근은 월간 생산량을 증가시킨다. (1) 주말 특근의 반영 - 시뮬레이션 모델은 계획 기간상의 어떤 시점  $t$ 가 평일인지 주말인지 상관없이 생산량을 결정해버린다. 따라서 실적 데이터 상으로 휴무일 (즉, 당일 생산량이 0)은 모델에서도 비가동일로 설정하였다. 이렇게

28) m/min을 단위로 하는 최대 컨베이어 속도와 관계가 있음.

하면 자연스럽게 비가동 기간의 누적된 제품 재고가 가동 기간의 생산량으로 흡수될 것이다. (2) 평일 초과 근무의 반영 - Hankoat에서는 근로자들이 하루 8시간을 근무하는 것이 원칙이나 식사시간 등 휴식 시간에도 파트타임 근로자를 고용하여 중단하지 않고 운영하기 때문에 시뮬레이션 모델에서는 하루 최대 생산량을 9시간 가동 기준으로 설정하였다. 이렇게 하면 초과근무로 (예, 총 11시간 생산) 생산량이 급증한 경우를 반영할 수 없는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 초과 생산시간을 모든 가동일에 대해 안분하였다 (즉, 하루 최대 생산량은  $9+a$  시간 가동 기준이 된다). 이 문제는 연간 초과근무시간 총계와 모든 가동일의 정규근무시간 합 간의 비를 구함으로써 해결할 수 있다.

매 분기 실적 데이터를 검토한 결과<sup>29)</sup> 그 비는 1.04로서 이는 하루 평균 21분 30초 정도를 초과 가동하는 것에 해당한다.

다. 행거충진율 : (-) 영향

Hankoat의 도장 공정은 다수의 행거가 하나의 컨베이어 레일에 매달려 있는 모양을 하고 있다. 가. 항에서 언급한 바와 같이 제품 종류마다 한 행거에 작업할 수 있는 최대량은 한계가 있다. 그러나 작업자의 숙련을 이용하여 그 최대량을 증가시킬 수 있으며, 따라서 산출율이 증가하는 효과를 얻을 수 있다. 그러므로 Hankoat는 그 최대량을 관리하기 위하여 ‘행거충진율’이라는 척도를 개발하여 관리하고 있다. 행거충진율은 어떤 품목의 기 설정된 표준행잉갯수를 기준으로 (물량에 따라) 계산된 행거의 갯수를 (standard loadings) 실제 소요된 행거의 갯수와 (actual loadings) 비교하는 지표이다. Hankoat의 행거충진율 산출방식은 표준 행잉 개수를 감안하면 하루 소요 행거의 개수 (계획) 대비 해당일 실제 처리 행거 개수의 (실적) 비율로서 평균 94% 수준으로 관리되고 있다.

결론적으로 아래 식 (28)과 같이 현실적 최대생산량을 ( $c_{PB}$ ) 계산할 수 있으며 그 결과값<sup>30)</sup>은 약 5,595 pcs/day 이다.

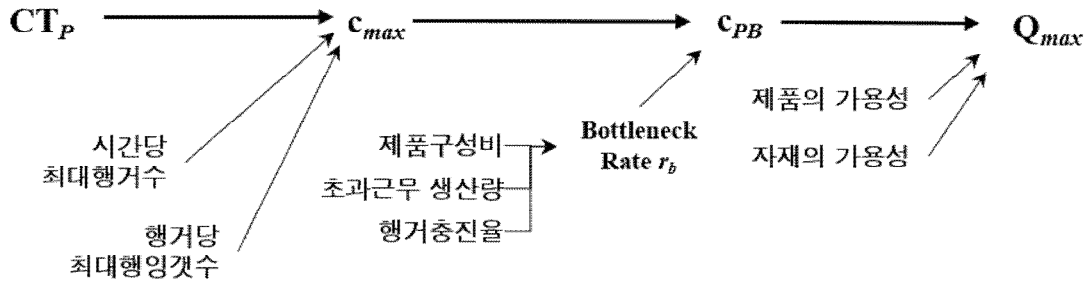
$$c_{PB} = c_{\max} \times \text{제품구성비} \times \text{초과생산효과} \times \text{행거충진율} \quad (28)$$

29) 어떤 한 분기를 조사하였더니, 9시간 이상 가동한 날의 가동시간 합, OT=604 이고 9시간 가동한 날의 가동시간 합, ST=558 이었다. 이때, 정상근무일 1시간당 초과 근무를 고려하기 위한 승수는 다음 식과 같이 1.04 시간이 된다.

$$\frac{OT+ST}{ST+ST} = 1.04$$

30)  $c_{PB} = c_{\max} \times \frac{11.28}{16} \times \frac{604}{558} \times \frac{94}{100} = 8640 \times 0.6625 \times 1.04 \times 0.94 \approx 5595 \text{ (pcs/day)}$

### 4.4.3 계획가능생산량과 최대생산량



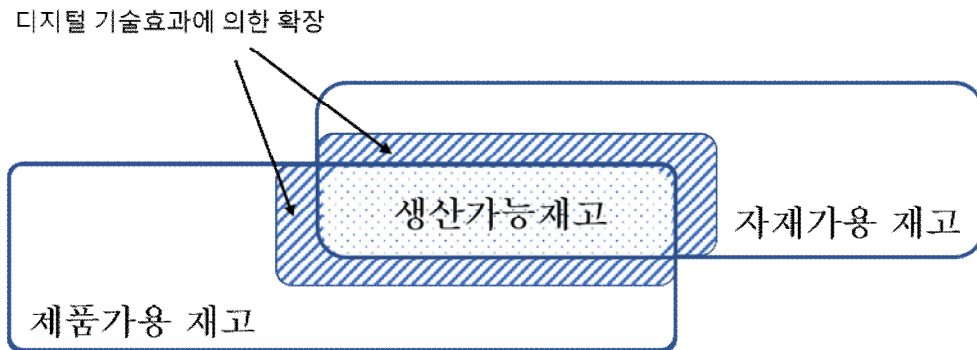
[그림 11] 다양한 최대생산량과 계획가능생산량의 관계도

[그림 11]은  $CT_P$ ,  $c_{max}$ , 및  $c_{PB}$  등 다양한 수준의 최대생산량 개념을 그 증감 요인과 함께 도식화한 것이다. 생산량 ( $Q$ )은 최대생산량을 초과할 수 없고 또한 제품의 가용성과 (product availability) 자재의 가용성에 (material availability) 따라 계획 가능한 최대생산량, 즉 계획가능생산량,  $Q_{max}$ 에 의해서 한번 더 제약을 받게 된다. 성실한 생산관리자라면 최대생산량을 초과하는 충분한 재고가 있을 때 최대한 많은 양의 생산을 계획하여 운영 성과를 극대화하고자 할 것이다. 생산관리자는 생산계획을 수립하는 과정에서 작성 중인 계획이 달성 가능한 계획인가를 지속적으로 검토한다. 그러므로 생산관리자가 계획의 달성가능성을 점검하는 과정에서 고려하는 요소가 바로  $Q_{max}$ 의 결정 요소가 된다. 본 연구의 시뮬레이션 모델은 일 최대생산량을 초과하지 않는 계획가능생산량이 존재하며 시뮬레이션의 실행 기간동안 상수로 가정한다. 또한, 계획한 생산량은 모두 수량 및 품질에서 출하가 가능한 양품으로 전환된다고 가정한다 (수량 100%).

### 4.4.4 계획가능생산량의 증대 방법

[그림 12]는 디지털 기술효과로 인해 이러한 계획가능생산량이 증가할 수 있음을 도식화한 것이다. 만약 디지털 기술효과가 최대한 발휘되어 자재 재고와 제품 재고의 현재 상황 및 미래의 상황이 완벽히 파악될 수 있다면 계획가능생산량의 최대치는 공정 자체가 가지는 필수 불가결한 제약 사항을 제외하고 계획가능한 수량이 될 것이다. 공정 자체가 가진 필수 불가결한 제약 때문에 발생하는 최소 손실을 공정최소손실 ( $d_p$ )이라는 상수로 정의할 때 스마트 공장 구축 후의 계획가능생산량,  $Q_{max}^1$ 은 식 (29)와 같다. 스마트 공장 구축 이전 즉, 현재 상태의 계획가능생산량은  $Q_{max}^0$ 로 표기한다.





[그림 12] 계획가능생산량 증대의 개념

$$Q_{\max}^1 = (1 - d_p) c_{PB} \quad (29)$$

스마트 공장은 생산 시스템 운영에 필요한 데이터의 가시성, 추적성, 투명성을 높이는 방식으로 운영 성과를 향상시킬 수 있다 (Chongwatpol, Sharda, 2013). 그렇다면 Hancoat는 가시성, 추적성, 투명성을 높임으로써 공정최소손실율을 ( $d_p$ ) 얼마까지 저하시킬 수 있을까? Hancoat의 생산관리자는 작업스케줄을 통해 생산팀이 하루에 달성해야 할 총작업량을 달성한다. 생산관리자가 생산현장에 하달하는 작업지시서 (즉, 스케줄)가 모두 제대로 수행됐을 때 하루의 총작업량 ( $Q_t$ )이 결정된다.

Hancoat의 생산관리자와 워크샵을 통해서 도출한 대략적인 생산 스케줄링 프로세스를 부록 A4에 수록하였다. Hancoat의 스케줄링 프로세스를 검토해 보면 생산관리자가 어떤 종류의 데이터를 참고해 작업 일정을 수립하는지 알 수 있다. 그 참고 데이터를 열거해 보면 ㉠ 입고 자재 리스트 ㉡ 생산 대기품 종류별 수량 ㉢ 위치 ㉣ 추가 재고 (금일 입고 예정인 제품) ㉤ 설비 운영 시간 등이며 이들 데이터가 입수된 후 개별 제품에 대해 긴급성 선정 규칙에 (긴급품 여부, 장기 미납 여부, 라인정지 등 현장 비상 상황 반영) 따라 재분류를 실시한다. 전술한 절차를 거쳐 최종적으로 해당일 스케줄링 대상 제품의 집합을 결정하게 되며 이후 관습적 스케줄링 규칙에 따라 제품의 투입 순서를 결정하게 되는 것이다. 결국, 계획가능생산량을 결정하는 요소는 참고 데이터 ㉠~㉤의 가용성이 된다. 만약 이들이 스마트 공장의 구축으로 실시간으로 가용해진다면 더 현실적인 스케줄링이 가능하기 때문에 현실적 최대생산량에 더 근접한 수준의 생산량 달성이

가능하다.

#### 4.4.5 스마트 공장의 구축 효과 추정

스마트 공장의 구축으로 계획가능생산량이 얼마나 증가되는지 알기 위해 최소손실율의 최소치를 추정하고자 한다. 전술한 바와 같이 스마트 공장이 성공적으로 구축된다면 생산관리자는 디지털 트윈을 이용하여 실시간으로 현장의 상황, 제품의 위치, 입고된 자재의 현황 등을 파악할 수 있어 스케줄 대상 제품의 집합을 형성하는 데 용이하다. 이 경우 달성 가능한 최대 생산량은 생산관리자가 다년간의 학습을 통해서 습득한 행잉 순서 결정 규칙에 따라 결정되며 이는 컴퓨터 알고리즘을 통해 구현하는 것이 가능하다. Hankoat와 거의 유사한 제조 시스템에서 스케줄링 알고리즘을 개발한 선행 연구의 결과를 인용하면 공정최소손실율을 구할 수 있을 것으로 사료된다. 선행 연구의 결과로부터 디지털 트윈이 계획가능생산량을 증가시키는 경로를 확인한 데 이어 그 규모 (magnitude) 또한 확인할 수 있게 되어 두 결과를 종합하면 스마트 공장 구축이 Hankoat의 운영 성과의 개선을 얼마만큼 가져올지 정량적으로 산출할 수 있게 된다.

Singgih et al. (2020)은 한 자동차 부품 전착 도장 공장의 스케줄링 문제를 연구하였다. 사례의 공장은 수천 개의 다양한 자동차 부품을 하나의 연속 컨베이어에 걸어 부식방지 도료로 코팅하는 확립된 도장 프로세스를 통과하도록 한다. 도장이 완료되면 컨베이어에서 코팅이 완료된 부품을 떼어내어 다시 포장 작업을 수행한다. 사례의 공장에서 도장 라인의 생산성은 행거 (부품을 매다는 포인트) 점유율에 따라 달라지고 단위 행거는 용량 한계가 존재한다. 행거 점유율이 떨어진다면 생산능력의 손실이 발생하는 것은 단위 행거가 충분히 사용되지 않았기 때문이다 (Singgih et al. 2020). Singgih et al. (2020)의 연구는 포장 라인 작업자의 작업로드 분산, 행거 점유율 향상을 위해 실행하는 행거 믹싱 (현장의 관행으로 하나의 행거에 다양한 부품을 행잉하는 작업을 말함), 그리고 동일한 제품은 연속 생산한다는 원칙 등 생산 현장의 현실적 제약 사항들을 반영하여 MIP<sup>31)</sup> 형태의 수리문제로 만들었지만 이러한 형태의 최적화 문제는 NP-hard 문제이기 때문에 2-Opt 및 Tabu Search 방식의 휴리스틱 알고리즘들로 변환하여 하루치의 투입 순서를 결정하는 현실적인 크기의 문제를 합리적인 연산 시간 안에 풀 수 있음을 증명하였다. 저자들은 증명에 사용한 입력 데이터와 전술한 알고리즘을 구현한 컴퓨터 소스 코드를 함께 웹페이지에 공개하였다 (POSTECH Logistics Lab, 2021). Singgih et al. (2020)은 생산 현장에서 총 35개의 문제를 (instance) 추출하여 상용 MIP solver의 솔루션, 2-Opt 및 Tabu Search 등의 휴리스틱 알고리즘들을 구동하여 도출한 솔루션들을 스케줄 품질의 평가 척도, 즉

31) Mixed Integer Programming; 선형계획 수리 모델의 일종으로 정수와 실수의 의사결정 변수들이 모두 사용되는 문제를 말함.

생산능력손실, 단속생산 패널티, 행거 믹싱 비용, 연속 행잉으로 인한 최대 작업로드등의 종합 점수와 함께 각 솔루션을 연산하는데 소요된 시간 등을 비교하여 휴리스틱 알고리즘들을 사용하여 현실적인 크기의 문제들을 풀 수 있음을 증명해 보였다.

본 연구에서 참고할 수 있는 Singgih et al. (2020)의 연구결과는 생산능력손실 지표인데 이는 무부하로 편성한 (즉, 아무것도 행잉 하지 않은 채 흘러보냄) 행거의 개수가 좌우한다. 생산능력손실은 목적함수인 스케줄링 품질지수에 포함되어 있다. 현실적 문제의 규모로서 총 600행거를 스케줄링 해야하는 5개의 문제에 대해 Opt-2 및 Tabu 알고리즘으로 계산한 결과 최소 40 행거의 생산능력손실이 발생하였다. 최적화 알고리즘을 구현하여 확보한 무부하 행거 개수를 스마트 공장 이후  $d_p$ 값을 산출할 때 참조로 사용할 수 있다. 하루에 600 행거분의 물량을 계획하여 40 행거의 생산능력손실이 발생했다면 40/600, 즉 0.067이 스마트 공장 이후  $d_p$ 가 된다. 이 수치를 식 (29)에 대입해보면 스마트 공장 구축 이후 시점의 일일 최대생산능력은 현실적 최대생산량의 약 93%까지 증가될 것으로 추정된다.

#### 4.5 시뮬레이션 결과

디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크에 따르면 (제 2장의 [그림 2] 참조) *Operation Performance Gap*을 계산하기 위해 현재 운영 성과와 변경된 운영 성과를 추정해야 한다. 다른 모든 조건을 동일하게 하기 위해 시뮬레이션 모델에서 모수  $c$ 만 변경한 채 실행한 결과를 비교하여야 한다. Hancoat의 어떤 한 분기 입고 실적을 입력한 상태에서 현재 설정<sup>32)</sup>과 ( $c = Q_{\max}^0$ ) 변경된 설정 ( $c = Q_{\max}^1$ ) 각 1회씩 두 번의 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과는 [그림13], [그림14]와 같이 산출되었다.

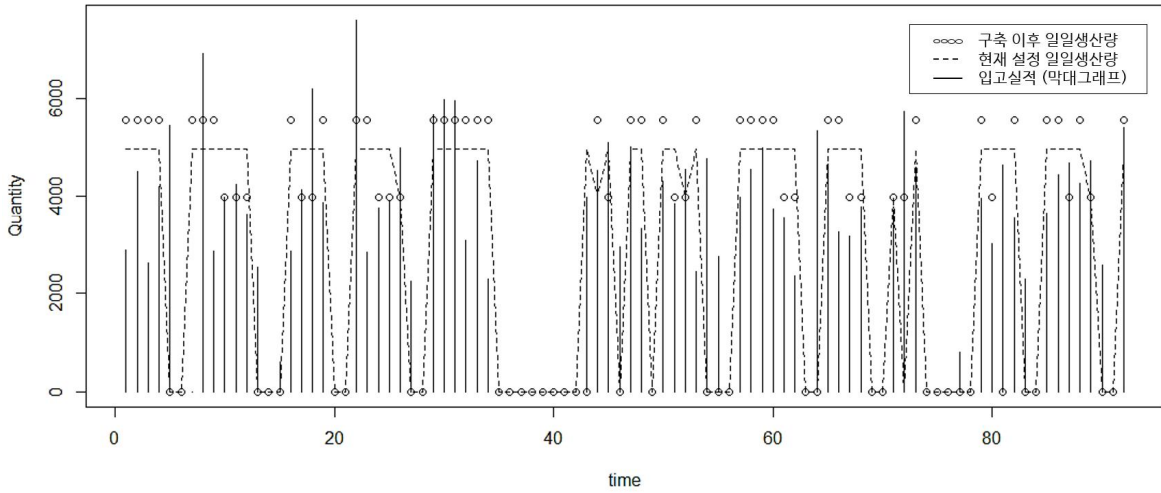
[그림 13]은 시간에 따른 일일생산량의 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다. 참고사항으로 같은 기간의 일일 입고 실적을 나란히 표시하였다. 최대생산능력이 구축 이후에 비해 작은 현재 설정 일일생산량은 많은 경우 최대생산량으로 생산한 날이 많은 반면 생산능력에 여유가 있는 구축 이후의 일일생산량은 관리자의 예상입고량에 (뉴스벤더모형으로 산출된 값이며 구축 이후와 현재 설정은 동일한 예상입고량을 가짐) 맞추어 생산을 한 날이 많았다.

[그림 14]는 시간의 흐름에 따른 두 시뮬레이션의 사이클타임 결과치를 비교한

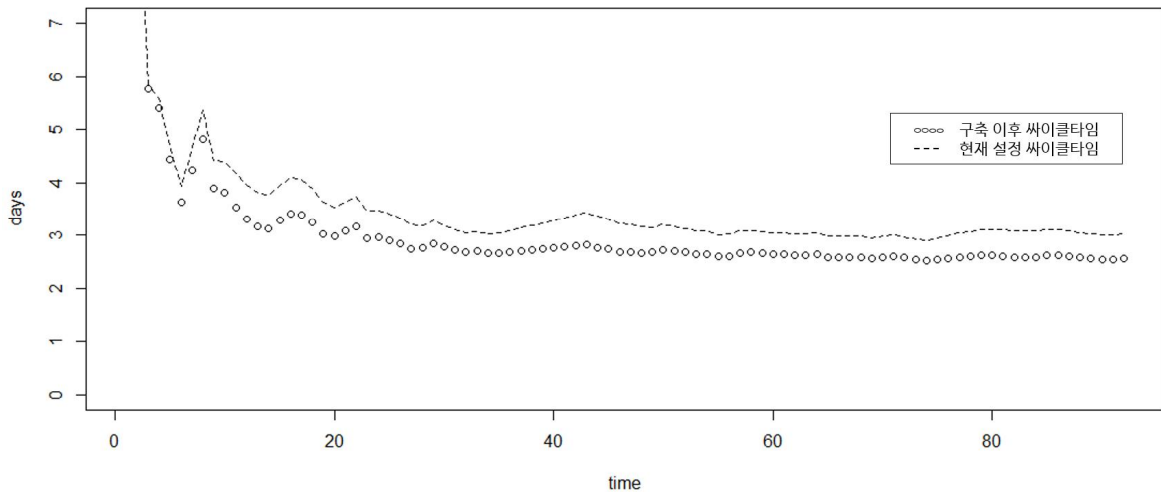
---

32)  $Q_{\max}^0$  는 확보한 입고, 생산, 재고 실적 데이터로 현재 사이클타임을 계산한 다음, 시뮬레이션 모델의  $c$ 값을 변화시켜가며 산출한 모델 사이클타임과 비교하여 가장 근접하는 사이클타임이 나타나는  $c$ 값을 채택하였다.

그래프이다. 동일한 기초재고를 설정한 상태에서 출발하므로 시뮬레이션 초반에는 큰 차이를 보이지 않다가 일정 시점 이후로는 지속적으로 스마트 공장 구축 이후의 사이클타임 추정치가 현재 설정보다 낮은 것을 알 수 있다. 이 기간 사이클타임의 평균 차이는 다음 절에서 재무적 성과로 환산이 가능하다.



[그림 13] 시뮬레이션 결과 비교 : 현재-구축이후 일일생산량



[그림 14] 시뮬레이션 결과 비교 : 현재-구축이후 사이클타임

## 4.6 재무적 성과 향상의 계량

### 4.6.1 운영 성과 척도의 재무적 성과 척도 전환

제 3장에서 식 (24)는 현금 전환주기의 구성요소를 재고자산 보유 기간, 매출채권 회수 기간, 매입채무 지급 기간으로 규정하였다. 본 절에서는 Hankoat에게 현금 전환 주기의 구성 요소는 어떤 시사점을 갖는지 검토 후 운영 성과 척도를 재무적 성과 척도로 공식을 통해 전환해 보기로 한다. Hankoat의 재고자산 보유 기간은 제품이 도/포장 작업을 위해 대기하는 기간과 ( $CT_q$ ) 도/포장 작업을 진행하는 기간 ( $CT_p$ ) 및 출하 대기 상태로 머무는 기간으로 나눌 수 있다. 여기서 출하대기 시간은 본 연구 범위에 포함되지 않으므로 이 기간에 비용이 발생하지 않는 것으로 가정하면 Hankoat의 재고 자산 보유 기간은 오직 도/포장 작업 대기기간에만 좌우된다고 할 수 있다.  $CT_p$ 시간 동안 인건비, 재료비 같은 변동비용 및 설비운영에 드는 각종 고정 비용이 집중적으로 발생하고  $CT_q$ 시간 동안에도 제품이 입고되는 순간 이를 운반하고 재고로 등록하는데 필요한 변동비와 적치장 확보 및 유지보수에 고정 비용이 소요된다. 그러므로 재공재고가 시스템 내에 체류하는 시간이 감소할수록 재무적인 이득이 증가할 것으로 예상된다.

Hankoat의 매입채무는 포장 자재, 용역 인원, 유틸리티 등 다양한 공급자들로부터 발생하며 이 중 포장 자재가 가장 크다. Hankoat는 포장 자재업자에 대한 매입 채무 지급 기간을 늘리고자 각종 대금 결제 방식을 검토하였고 ‘일대일 방식’<sup>33)</sup>이 가장 유리한 것으로 파악하였다. 이는 자재 보관 창고를 최소 규모로 유지하고 공급자와는 해당 포장 자재가 필요한 시점에만 공급하도록 약속하는 한편, 매입채무의 결제는 사용된 자재만 대상으로 하는 것이다. 즉, 공급업자는 예측 주문에 따라 미리 납품하는 것이 불가능하고 Hankoat의 도/포장 공정 투입 스케줄이 발표되어야만 해당 제품의 자재를 공급하는 것으로 계약을 체결하였다. 그러므로 Hankoat에서는 매입 채무가 월 1회 발생하고 (즉, 과거 1 개월간의 총사용량에 대하여 월 1회 청구) 그로부터 업체와 약정한 만기가 지나 지급이 되므로 매입채무 지급 기간은 일정하다. 단, 일대일 방식을 너무 강하게 고수하면 재고의 순기능인 대응성이 (responsiveness) 떨어지기 때문에 사급 제품의 예상치 못한 입고나 자재 공급업체의 생산 차질로 계획 생산량을 달성할 수 없게 되는 경우가 발생한다. 이는 오히려 재무적 이점을 상쇄할 수도 있으므로 좋은

33) 현장의 용어임.

균형점을 찾아야 할 것이다.

#### 4.6.2 기대 재무성과

결과적으로 매출채권 부문에서는 원청과의 불평등한 관계 때문에 개선의 여지가 없고, 매입채무 부분 또한 이미 ‘일대일’ 정책의 강력한 시행으로 더 이상 개선의 여지가 없으므로 스마트 공장을 구축하여 개선된 운영 성과를 Hankoat가 재무적으로 환산하고자 하면 현금 전환주기 구성요소 중 재고자산 보유기간의 감축을 측정하는 것이 가장 효율적인 방법인 것으로 사료된다. 시뮬레이션 수행 결과로 확인한 재고자산 보유기간 감축폭은  $\Delta CT_q = 0.4(\text{일})$ 로 추산된다 ([그림 14] 참고).

따라서, 만약 매출원가를 (cost of goods sold)  $COGS = 100$  (단위:억원) 이라고 가정하면

$$\frac{COGS}{365} \times \Delta CT_q = 100/365 \times 0.4$$

즉, 약 0.1(억/년)의 현금흐름증가를 가져올 것으로 기대된다.

#### 4.7 적용 결과

스마트 공장 구축을 통해 기대되는 재무적 성과인 0.1(억/년)의 현금흐름증가는 바로 섹션 2.4.1의 식 (2)<sup>34)</sup> 에서 우변에 있는  $R_i$ 가 된다. 매년 0.1(억/년)의 현금흐름이 (추가로) 발생한다면 이를 순현재가치로 전환하는 것은 식 (2)의 우변을 계산하는 것과 같다. 식 (2)의 우변은 모든  $i$ 에 대하여  $R_i = R$ 로 일정하므로 식 (30)에 제시된 연금의 현재가치 계산법에 의해 계산할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{R_i}{(1+k)^i} = \frac{R}{1+k} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{1+k}\right)} = \frac{R}{k} \quad (30)$$

식(30)에서  $k = 7\%$  (기업대출금리) 라고 가정하고  $R = 0.1$ 을 대입하면 약 1.42 (억원)이 산출되며 이 값이 곧 프로젝트 추진 여부의 기준이 되며 이는 현재 각 기업에

---

34) 식 (2) :  $K_{NPV} \leq \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R_i}{(1+k)^i}$  (단,  $k$ 는 연간이자율)

정부가 지원하는 일반적인 스마트 공장 추진 지원금 규모 대비 소폭 상회하는 수준이다.

## 5. 결 론

### 5.1 연구의 요약

본 연구는 주요 경제 대국들이 IT 신기술을 활용한 제조 경쟁력 제고를 국가적 과제로 추진하고 있는 현시점에, 한정된 투자자원을 가진 하청제조기업이 스마트 공장을 비용 효과적으로 구축하고자 할 때 사용할 수 있는 기대효과 추정 방법에 관한 것이다. 본 연구의 대상인 하청제조기업은, '사급자재'를 취급한다는 점, 가격과 수량이 정해져 있어 비용 절감만이 이익을 늘릴 수단이라는 점 등 뚜렷한 수익성 한계를 지니고 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나 최근 인력난의 가중과 산업안전 요건의 강화로 지속적인 사업 운영 및 생존을 위해 한정된 자원이지만 스마트 공장 구축에 투자해야 하는 처지에 있다.

스마트 공장의 운영성과를 추정하는 개념적 프레임워크를 확립하기 위해 문헌 연구에서는 IT의 도입 효과를 측정하기 위한 과거의 다양한 시도들을 고찰한 결과, 순수한 IT 도입 효과를 측정하기 위해서는 다양한 요인들의 영향을 받는 기업의 재무적 성과보다는 업무 프로세스, 즉 운영 성과의 향상 정도에 주목해야 한다는 공통된 결론을 확인할 수 있었다. 문헌 연구를 참고해 정립한 개념적 프레임워크는 스마트 공장 구축에 따라 발생한 디지털 기술효과가 기존 운영 시스템의 설정을 (configuration) 바꿈으로써 운영 성과의 향상을 가져와 중국에는 재무적 성과로 귀결되는 과정을 확인하는 일종의 가이드로 기능할 수 있으며, 이를 통해 산출한 재무적 성과를 현금으로 환산하여 그 이득과 투자비를 비교할 수 있어 프로젝트 추진 여부를 판단하는데 유용하게 사용될 수 있다.

하청제조기업의 수익증가분은 원가 절감분이 대부분을 차지하는데, 원가절감 또한 생산요소의 경제적 사용으로만 달성할 수 있기 때문에 타 업종에 비해 운영 성과가 재무적 성과로 잘 연결된다고 할 수 있다. 재무적 성과 중 운영 성과 척도와 직접적 연결 관계를 가지는 것으로 파악된 현금전환주기의 구성요소를 분해한 결과, 재고 유지 기간이 재고 운영 성과 척도인 평균 대기열의 함수인 것으로 드러나 디지털 전환 운영성과 산출 프레임워크를 따라 하청제조기업의 사례를 연구하면 화폐가치로 환산한 기대효과를 산출할 수 있다는 결론에 이르렀다.

본 연구의 중심 주제인 스마트 공장의 구축으로 인한 디지털 기술 효과의 추출을 위해 스마트 공장 우수사례를 검토한 결과 운영 성과에 영향을 줄 수 있는 대표적인 디지털 기술효과는 투명성과 추적성임을 확인하였으며, 이들 효과는 프레임워크를 적용하는



단계에서 제안한 스마트 공장 솔루션의 방향성을 제시할 때 디자인 요소로 고려할 수 있었다.

하청제조기업의 운영 시스템을 모형화하여 시뮬레이션 모델을 구축함으로써 공장의 운영 모수가 변화했을 때 쉽게 그 운영 성과의 차이를 포착할 수 있었다. 이를 위해 하청제조기업의 사례를 개발하였고, 해당 사례에서 생산관리자의 면담 및 워크숍을 통해 생산량 결정 방식을 수리 모형에 포함할 수 있었다. 사례기업의 생산관리자가 직면한 문제는 고객으로부터 입고되는 제품의 수량과 종류를 미리 알 수 없는 상황에서 비롯되는 것으로, 수요가 불확실한 가운데 현재 재고를 고려하여 해당일의 생산량을 예측하고 생산 자재 등 자원들을 대기시켜야 하는 데 있었다. 본 연구에서는 이러한 생산관리자 문제를 단일기간 뉴스벤더모형으로 정식화하였다.

다음으로 하청제조기업에 적합한 운영 성과 척도를 정립하여 이들 모두 하루하루 수행한 운영의 결과로부터 자동 누적 계산되도록 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 이후 사례기업의 한 분기간 실제 입고량의 실적데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 스마트 공장으로 향상된 최대생산량 모수를 취했을 때가 사례기업의 현재 최대생산량을 모수로 취했을 때보다 전체 시뮬레이션 시간에 걸쳐 사이클타임이 전반적으로 작다는 점을 확인하였다.

본 연구는 정량적 데이터를 이용해 프레임워크의 적용 사례를 제시한 데 그 특징이 있다. 사례연구에서 생산담당자는 도장라인에 투입되는 제품들의 순서를 면밀히 계획하여 정해진 시간동안 달성할 수 있는 최대생산량을 달성한다. 생산담당자의 스케줄링 과정을 살펴봄으로써 필요한 데이터가 무엇인지 파악할 수 있었고 그 요구데이터가 실시간으로 가용하다면 더 현실적인 스케줄링이 가능하므로 도장라인의 현실적 최대생산량에 더 근접한 수준에서 생산이 가능하다는 사실을 도출하였다. 스마트 공장의 구축 방향 중 하나인 디지털 트윈과 같은 실시간 공정현황 공유 솔루션이 있다면 생산량의 결정에 지대한 영향을 미치는 생산 일정계획 수립에 필요한 완전한 데이터를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 디지털 트윈에 대한 구체적인 예시를 보여주기 위해 모크업을 만들어 제시하였다. 스케줄링을 할 때 필요로 하는 데이터들이 완벽하다면 도달할 수 있는 최대생산가능량의 추정치는 이미 수행된 도장작업 투입순서에 관한 최적화 알고리즘 연구에서 언급된 성과 데이터를 활용하였다.

이들 최적화 알고리즘의 연구결과를 참고해 사례에서 스마트 공장이 도입됐을 때 변화될 것으로 예상되는 운영모델의 모수를 계산하였고 이를 반영한 모델로 시뮬레이션을 수행하였다. 현재 설정과 구축 이후 변경된 설정을 가정한 두 시뮬레이션

결과를 비교했을 때 구축 이후 설정을 가정한 모델이 전반적으로 더 작은 사이클타임으로 운영될 것으로 추정된다. 이러한 사이클타임의 평균 감소분을 계산하였고 이를 재무적 이득으로 환산 또한 가능함을 알 수 있다.

## 5.2 연구의 시사점

실무적으로 볼 때, 본 연구는 하청제조기업의 생산관리에서 중시되는 주요 관심 목표들을 재설정하였다. 하청제조기업에서는 부족한 인적자원의 보유로 목표에 의한 관리보다는 생산 현장의 관행에 얼마나 충실한가가 조직 성과의 척도로서 자리하고 있는 것이 현실이다. 좋은 지표의 조건에는 조직원이 그 지표가 어떻게 산출되는지를 이해할 수 있고, 열심히 하면 도달 가능하다는 확신을 가질 수 있어야 한다는 조건이 포함된다. 현장의 관행대로 조직 성과를 측정하면 상위관리자의 주관에 의해 각종 편향이 발생할 소지가 있어 좋은 지표의 조건을 충족시키기 어렵다. 따라서 관리자들은 본 연구에서 개발된 성과 척도들을 이해하고 사용함으로써 합리적인 조직관리를 할 수 있다.

그러나, 본 척도를 사용하는 현업 관리자에게는 여전히 운영 성과 척도가 생소하고 어렵게 느껴질 수 있어 주의가 요구된다. 본 연구의 시뮬레이션 모델을 실행하면 모수 변화에 따라 공정중재고(WIP), 사이클타임(CT), 산출율(TH) 등 운영 성과 척도가 변화하는 모습을 모사할 수 있기 때문에 공장관리자가 관리지표 간 상관관계에 대한 이해도 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

또 하나의 실무적 시사점으로는 스마트 공장 구축 프로젝트라는 혁신적 이미지에도 불구하고 재무적 성과 향상은 크게 기대할 수 없다는 점을 들 수 있다. 정부가 지원하는 스마트 공장 사업의 경우 통상 기업에게 50:50 원칙으로 지원하는데, 사례에서 스마트 공장 구축 기대효과를 산정해본 결과 통상 정부지원 수준을 감안했을 때 순수 투자금의 손익분기에 해당하는 수준의 작은 규모로 판단된다. 그것은 이미 확립된 프로세스를 오랜 시간 동안 반복하며 이미 상당한 운영 성과를 달성했기 때문에 스마트 공장을 통해 추가적으로 개선할 여지가 얼마 없기 때문으로 해석된다.

학문적인 관점에서 본 연구의 기여는 먼저, 운영관리 연구의 대상으로서 중소기업의 특수한 형태인 하청제조업을 규정하고 하청제조기업의 이익을 극대화하는 생산량 결정 방식에 관한 수리모형을 수립하였다는 데 있다. 이들 기업이 담당하고 있는 제조업의 저변으로서 역할에 비해 운영관리 분야에서 하청제조기업이 특별히 연구 대상으로서 주목받을 계기가 없었다. 그러나 COVID-19으로 인한 노동력 수급 불균형, 산업제해에 대한 사회의 인식 변화, 빅데이터와 IT 신기술의 활용도에 있어 기업간 격차 심화

등으로 인해 하청제조기업들의 환경이 재조명받을 수 있는 계기가 만들어 지고 있다. 본 연구는 하청제조기업의 스마트화를 주제로 선택함으로써 다양한 운영관리 방법론을 적용할 수 있는 분야를 제시했다고 볼 수 있다. 또한, 기업 성과 측정에 관한 연구분야에의 기여로는 IT Value에 관한 선행 연구를 참고하여 스마트 공장의 운영성과를 추정할 수 있는 디지털 전환 운영성과 산정 프레임워크를 수립하였고 실제 기업의 데이터를 사용해 프레임워크의 유용성을 실증한 점을 들 수 있다. 스마트 공장의 구축 효과는 정성적 특징을 갖는데 운영 시스템의 설정에 변화를 유도하는 디지털 기술효과라는 개념을 프레임워크에 도입함으로써 운영 성과 척도의 변화를 측정할 수 있게 되어 구축 효과를 정량화할 수 있음을 보였다.

마지막으로 언급할 수 있는 본 연구의 학문적 기여는 VSM, 수리모형, 대기행렬이론 및 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 모델링 등 다양한 방법론을 사용하여 생산 현장의 생생한 이미지를 포착한 사례 개발을 수행했다는 데 있다. 비록, 단일 회사만 대상으로 하였다는 한계가 있지만, 본 연구에서 개발한 사례는 장기간의 데이터 수집과 직원과의 인터뷰, 현장 관찰 등 연구 대상에 대한 밀착 관찰만이 달성할 수 있는 사실성을 확보하였다.

### 5.3 연구의 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구의 한계점으로는 첫째로, 수립한 재고-생산 모형이 납품기한에 (due-date) 대해 제약이 없다는 것을 전제로 한다는 점을 들 수 있다. 그 이유는 하청제조기업이 고객과 맺은 납품 공급 계약에서 납품 기한을 제품의 (즉, 사급 자재) 입고로부터 일정 기간내로 규정하고 있는 관행과 관련이 있다. 또한, 본 연구에서 제시한 프레임워크를 다양한 사례기업에 적용하기 위해 주의할 사항은 대상 운영모형을 파악할 때 개별 기업의 특수성을 감안한 시뮬레이션 모델을 수립해야 하며 그 기업이 필요로 하는 스마트 공장 프로젝트의 종류와 그 프로젝트가 해결할 수 있는 운영관리 상의 문제를 세밀히 파악해야 한다는 점을 들 수 있다. 즉, 시뮬레이션 모델이 현실 운영 시스템을 얼마나 잘 반영하고 있는지 검토하는 과정이 필요하다. 마지막 한계점으로는 사례에서 스마트 공장이 디지털 트윈 방향으로 구축되면 스케줄링 과정의 요구 데이터가 완벽히 제시된다는 매우 낙천적인 가정을 하고 있다는 점이다. 스케줄링 요구 데이터의 품질 수준에 대해 다양한 설정이 가능하다면 더욱 현실적인 시뮬레이션 모델이 가능할 것이다.

향후 연구 방향으로는 회계적인 이익 창출이 기업의 가치 창출 총량과 동일하다는 본 연구의 전제를 완화하는 것을 생각해 볼 수 있다. 본 연구에서는 시스템의 설정 변화 이전과 이후의 지표를 이익으로 (즉, 양의 현금흐름으로) 환산하여 프로젝트의 가치를 평가했기 때문에 향후에 장기적으로 나타날 수 있는 긍정적 효과들을 포착하지 못한다. 즉, 매출의 증가나 리스크의 저감 등 기업이 가진 다른 가치를 평가하는 것을 연구 범위에 포함할 수 있다. 첫째로 생각해볼 수 있는 가치로 사업 리스크 저감 효과 측면을 들 수 있다. 이는 스마트 공장의 우수사례에 등장하는 상당수 기업이 프로젝트 이후 근무환경이나 작업환경이 개선되었다고 보고하고 있다는 사실에 주목하면 쉽게 이해할 수 있다. 이러한 현장의 소리는 현재 사회적인 관심이 고조되고 있는 직장 내 안전, 환경, 보건 분야의 증진 문제가 향후 하청제조기업의 스마트 공장 도입 효과 관련 연구에서 다루어질 중요한 관점이 될 것을 예상하게 한다. 둘째는 매출의 증가 측면이다. 정부는 그 지원 대상을 넓히기 위해 광의의 정의를 사용해 스마트 공장을 홍보하고 있지만 실제로 대중들에게 매체를 통해 각인된 스마트 공장의 이미지는 무인화, 지능화, 자율화 같은 미래적인 것에 더욱 가깝다. 이러한 공장들은 다품종 소량생산으로 탁월한 경쟁력을 갖추고 범위의 경계를 이루기 위해 노력할 것으로 예상된다. 범위의 경계를 달성하기 위해 기업들은 상품 다각화에 노력하는 한편, 생산시설과 노동력을 ‘공유’하면서 다양한 상품을 생산할 수 있는 환경을 갖출 것으로 전망된다. 이러한 상품 다각화에 따른 재무적 성과는 비용의 감소보다는 매출의 증가와 연결되어 있어서, 이 과정에 기여하는 스마트 공장의 구축 효과는 본 연구에서 제시된 하청제조기업의 상황을 고려한 프레임워크로 측정할 수 있는 영역이 아니라고 판단된다. 이상의 향후 연구 과제를 제시하는 관점들은 4차 산업 혁명으로의 전환 시기의 제조강국들이 가지고 있는 고민과 그 맥락을 같이 한다.

향후 연구 방향의 또 다른 축은 기술적인 측면으로서 본 연구에서 다루지 않은 IT 기술인 인공지능과 기계학습을 활용한 스마트 공장이 하청제조기업의 운영성과에 미치는 영향을 다룰 수 있다. 간단히 설명하면, 고객으로부터 미리 확보한 입고 스케줄의 변동이 관리된다면 향후 재고수량의 예측이 가능하여 비용을 최소화할 수 있다는 가설의 검증이다. 본 연구에서는 고객의 기간별 입고예정량은 전혀 알 수 없다는 전제하에 매일의 생산관리자가 뉴스벤더모형같은 패러다임으로 재고-생산량을 결정한다고 가정하였다. 그러므로 입고제품의 종류별 수량에 대한 예측모델을 개발한다면 입고량의 변동을 모니터링해 가면서 상황에 맞게 최소비용 목표에 가장 부합되는 자재주문, 생산 대기 공간확보, 생산속도 의사결정을 내릴 수 있을 것으로 기대된다. 인공지능 및 기계학습 분야의 도구들이 필요로 하는 데이터, 예를 들면 입고계획 대비 실적의 차이에 대한 정보를 체계적으로 수집한다면 입고예측력이 향상될 수 있는 여지가 존재한다.

## 참고문헌

- 강선민. (2012). 수·위탁기업의 경영성과 분석. 대한경영학회지, 25(4), 2157-2183.
- 강선민, 한기원. (2015). 사급거래 수익인식: 총액법 vs 순액법. 회계저널, 24(4), 343-374.
- 고형일, 송영출. (2012). 현금전환주기가 수익성에 미치는 영향에 관한 연구. 경영컨설팅연구, 12(4), 1-20.
- 김광명, 박주식. (2019). B2B 기업의 시장지향성이 관계특유투자와 지각된 경제적 성과에 미치는 영향. 경영과 정보연구, 38(4), 113-136.
- 김범석, 하승인, 민재형. (2013). 비모수 방법을 이용한 SCM 현금화주기와 동반성장과의 관계. 로지스틱스연구, 21(1), 35-49.
- 김정아, 정종필. (2018). 중소기업들을 위한 IoT기반의 자율이동모듈을 활용한 스마트 창고관리 시스템 개발. 한국인터넷방송통신학회 논문지, 18(5), 237-244.
- 나형배, 황인극. (2018). 중소기업의 스마트 팩토리 현황 분석을 통한 향상 방안. 대한설비관리학회지, 23(3), 59-69.
- 미래와경영연구소. (2006). NEW 경제용어사전.
- 박기석, 이갑두. (2017). 중소기업특성과 성과관리시스템의 관련성. 세무회계연구, 54, 143-162.
- 사회문화연구소. (2000). 사회학 사전.
- 스마트제조혁신추진단. (2020). 스마트공장 사업관리시스템. 2021-04-01 방문. <https://www.smart-factory.kr/>
- 이공희, 이한식, 장영재. (2015). 예측방법론. 한국방송통신대학교출판문화원.
- 정종채. (2017). 하도급법 해설과 쟁점. 삼일인포마인.
- 조지훈, 신완선. (2019). 중소기업들을 위한 스마트공장 도입 준비도 진단 체계 개발 및 적용사례연구. 품질경영학회지, 47(1), 1-15.
- 중소기업기술정보진흥원. (2019). 2018 중소기업 정보화 수준 조사. 2021-04-01 방문. <https://www.tipa.or.kr/>
- 허윤영, 백원선. (2018). 재무적 제약이 특수관계자 거래를 이용한 운전자본관리에 미치는 영향. 회계학연구, 43(5), 67-115.
- 황규선, 박진우, 이정철. (2012). 제조 실행시스템의 성과 측정을 위한 프레임워크 개발 연구. 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, 2012(5), 2205-2213.

- Agatz, N., Bouman, P. & Schmidt, M. (2018). Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. *Transportation Science*, 52(4), 965–981.
- APICS. (2017). APICS Supply Chain Operations Reference Model Version 12.0. Chicago: APICS.
- Anupindi, R., Chopra, S., Deshmukh, S., Zemel, E. & Van Mieghem, J. A. (2012). *Managing Business Process Flows: Principles of Operations Management* (3e). Pearson Education.
- Barua, A., Kriebel, C. H. & Mukhopadhyay, T. (1995). Information Technologies and Business Value: An Analytic and Empirical Investigation. *Information systems research*, 6(1), 3–23.
- Bharadwaj, A. S., Bharadwaj, S. G., & Konsynski, B. R. (1999). Information Technology Effects on Firm Performance as Measured by Tobin's q. *Management Science*, 45(7), 1008–1024.
- Bianchi, C., Cosenz, F. & Marinković, M. (2015). Designing dynamic performance management systems to foster SME competitiveness according to a sustainable development perspective: empirical evidences from a case–study. *Int. J. Business Performance Management*, 16(1), 84–108.
- Bradley, J. R. (2004). A Brownian Approximation of a Production–Inventory System with a Manufacturer That Subcontracts. *Operations Research*, 52(5), 765–784.
- Brynjolfsson, E., Hitt, L. M., & Yang, S. (2002). Intangible assets: Computers and organizational capital. *Brookings papers on economic activity*, 1, 137–181.
- Cameron, D. B., Waaler, A., & Komulainen, T. M. (2018). Oil and Gas digital twins after twenty years. How can they be made sustainable, maintainable and useful? *Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling*, Oslo Metropolitan Univ.
- Chongwatpol, J., & Sharda, R. (2013). RFID–enabled track and traceability in job–shop scheduling environment. *European Journal of Operational Research*, 227(3), 453–463.
- Chuang, H. H.–C. & Oliva, R. (2015). Inventory record inaccuracy: Causes and labor effects. *Journal of operations management*, 39, 63–78.
- Cotteleer, M. J., & Bendoly, E. (2006). Order lead–time improvement following enterprise information technology implementation: An empirical study. *MIS Quarterly*, 30(3), 643–660.
- Daskin, M. S. (2011). *Service science*. John Wiley & Sons.

- Elgazzar, S. H., Tipi, N. S., Hubbard, N. J., & Leach, D. Z. (2012). Linking supply chain processes' performance to a company's financial strategic objectives. *European Journal of Operational Research*, 223(1), 276–289.
- Flyvbjerg, B. (2006). Five misunderstandings about case–study research. *Qualitative inquiry*, 12(2), 219–255.
- Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics - a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36(4), 37–66.
- Gerwin, D. (1981). Control and Evaluation in the Innovation Process: The Case of Flexible Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on engineering management*, 28(3), 62–70.
- Gijsbrechts, J. Boute, R. N., Van Mieghem, J. A. & Zhang, D. (2020). Can deep reinforcement learning improve inventory management? performance on dual sourcing, lost sales and multi–echelon problems. working paper.
- Harrison, J. M. & Van Mieghem, J. A. (1999). Multi–resource investment strategies: Operational hedging under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 113(1), 17–29.
- Hitt, L. M. & Brynjolfsson, E. (1996). Productivity, Business Profitability, and Consumer Surplus: Three Different Measures of Information Technology Value. *MIS Quarterly*, 121–142.
- Hitt, L. M., Wu, D. J. & Zhou, X. (2002). Investment in Enterprise Resource Planning: Business Impact and Productivity Measures. *Journal of Management Information Systems*, 19(1), 71–98.
- Hopp, J., W. & Spearman, M., L. (2000). *Factory physics : foundations of manufacturing management (2e)*. Chicago : Irwin.
- POSTECH Logistics Lab. Source Codes, Input & Solution Files for I. K. Singgih, O. Yu, B.–I. Kim, J. Koo, and S. Lee “Production Scheduling Problem in a Factory of Automobile Component Primer Painting” working paper, 2019. 2021–04–01. [http://logistics.postech.ac.kr/Painting\\_Line\\_Scheduling.html](http://logistics.postech.ac.kr/Painting_Line_Scheduling.html)
- Kaplan, R. S. N. & David P. (1996). *The balanced scorecard : translating strategy into action*. Boston, Mass. : Harvard Business School Press.
- Kim, B. (2000). Coordinating an innovation in supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 123(3), 568–584.
- Kim, B. (2014). *Supply Chain Management: A Learning Perspective*. Hankyung.

- Kogan, K. & Portougal, V. (2006). Multi-period aggregate production planning in a news-vendor framework. *Journal of the Operational Research Society*, 57(4), 423–433.
- Madapusi, A. & D'Souza, D. (2012). The influence of ERP system implementation on the operational performance of an organization. *International Journal of Information Management*, 32(1), 24–34.
- Matsuyama, K. (2006). The multi-period newsboy problem. *European Journal of Operational Research*, 171(1), 170–188.
- McAfee, A. (2002). The impact of enterprise information technology adoption on operational performance: An empirical investigation. 11.1 (2002): 33–53. *Production and Operations Management*, 11(1), 33–53.
- Melville, N., Kraemer, K., & Gurbaxani, V. (2004). Review: Information Technology and Organizational Performance: An Integrative Model of IT Business Value. *MIS Quarterly*, 28(2), 283–322.
- Meredith, J. (1998). Building operations management theory through case and field research. *Journal of operations management*, 16(4), 441–454.
- Van Mieghem, J. A. & Rudi, N. (2002). Newsvendor networks: Inventory management and capacity investment with discretionary activities. *Manufacturing & Service Operations Management*, 4(4), 313–335.
- Morrison, B. (2015). The problem with workarounds is that they work: the persistence of resource shortages. *Journal of operations management*, 39, 79–91.
- Olsen, T. L. & Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 113–122.
- Penrose, E. & Penrose, E. T. (1995). *The Theory of the Growth of the Firm*. Oxford University Press.
- Pound, E. S., Bell, J. H. & Spearman, M. L. (2014). *Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World*. McGraw-Hill Education.
- Senge, P. M. (1990). *The fifth discipline : the art and practice of the learning organization*. Doubleday Business.
- Singih, I. K., Yu, O., Kim, B.-I., Koo, J., & Lee, S. (2020). Production scheduling problem in a factory of automobile component primer painting. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1483–1496.



- Sodhi, M. S. & Tang, C. S. (2014). Guiding the next generation of doctoral students in operations management. *International journal of production economics*, 150, 28–36.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw–Hill.
- Sterman, J., Oliva, R., Linderman, K. W. & Bendoly, E. (2015). System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management. *Journal of operations management*, 39(40), 1–5.
- Storey, D. J. (1994). *Understanding The Small Business Sector [electronic resource]*. London : Taylor and Francis.
- Stuart, I., McCutcheon, D., Handfield, R., McLachlin, R. & Samson, D. (2002). Effective case research in operations management: a process perspective. *Journal of operations management*, 20(5), 419–433.
- Tao, F. & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop–Floor: A New Shop–Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427.
- Whitten, J. Bentley, L. D. (2007). *Introduction to Systems Analysis and Design*. McGraw–Hill.
- Wong, J.–T., Su, C.–T., & Wang, C.–H. (2012). Stochastic dynamic lot–sizing problem using bi–level programming base on artificial intelligence techniques. *Applied Mathematical Modelling*, 36(5), 2003–2016.

## 부 록

### A1. 스마트 공장 우수구축 사례 분석

※ 번호 1~3의 내용은 본문에서 소개하였음

※ 출처 : 스마트제조혁신추진단 (2020)에서 발췌

번호	종전 환경	주요편익	구축 기재	공통 현상
04	<p>“원자재와 제품의 LOT(자재이력관리) 추적이 어려워 제품에 하자가 발생해도 속수무책이었다.”</p> <p>“자재 발주 시 5% 정도 로스를 감안하여 발주...”</p> <p>“...공정별 소통의 부재로 생산일정의 차질 발생...”</p> <p>“작업지시서가 작업장을 한 바퀴 돌고 나면 너덜너덜해지기 일쑤였는데...”</p>	<p>“사무실에서는 생산관리자나 영업담당자가 생산현장에 가지 않고 MES서버의 수치만 봐도 라인의 가동현황, 생산량, 품질현황 등 생산 현장의 상황을 파악하고 관리함으로써...”</p> <p>“불량발생시 LOT추적으로 관련 제품만 회수 가능...”</p>	<p>주요 공정 출력 이상시 경보 시스템</p> <p>현황판 설치 및 업무지시 내용 표출</p> <p>(수량) 카운트 정보와 출력 정보 실시간 축적</p>	<p>데이터 수집이 자동화되었다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p> <p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p>
05	<p>“솔직히 현장의 업무방식은 주먹구구식이었어요. 문서도 제대로 갖추지 못하고 일할 때가 대부분이었으니까요..”</p> <p>“일단 공정별로 뛰어다니며 생산량 등 필요한 데이터를 얻어와...”</p> <p>“공정상의 불량인지, 재료 불량인지 파악이 어려움”</p>	<p>“생산 현장을 수시로 확인할 수 있기 때문에 불량, 고장 등의 문제에 빠르게 대처할 수 있게 되었다.”</p> <p>“원자재 불량인지, 작업자 불량인지, 장비 불량인지 파악이 쉬워서 문제 해결이 용이해졌어요.”</p> <p>“모니터를 통해 업무일정을 확인할 수 있기 때문에 소통의 어려움이 줄어들었어요.”</p>	<p>공정별 작업자가 실시간으로 데이터를 입력</p> <p>관리자가 작업계획을 수립하여 MES로 공유</p> <p>생산 개수 및 불량 개수를 입력해 현황을 공유</p>	<p>데이터 입력이 용이해졌다</p> <p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p>

번호	종전 환경	주요편익	구축 기재	공통 현상
06	<p>“생산량 집계하고 단순반복적인 업무를 수행하느라 직원들이 퇴근시간이 늦어지는...”</p> <p>“화이트보드에 기록한 생산스케줄을 가끔 가다 빼먹기도 하고 어떤 날은(어제) 기록한 것을 그대로 둔 채 작업에 들어가지도 합니다.”</p> <p>“불량이 발생하면 기계를 세우고 전수 조사를 해야 했어요.”</p>	<p>“자재 및 공정 현황 등 담당자에게 별도 문의 없이 MES로 실시간 파악 가능”</p> <p>“생산실적이 실시간으로 표시...”</p> <p>“각 공정별로 모니터가 있기 때문에 필요할 때마다 수시로 확인이 가능해졌습니다.”</p> <p>“LOT관리로 역추적이 쉬워져 불량품을 쉽고 빠르게 골라낼 수 있게 되었어요.”</p>	<p>작업지시서 디지털화</p> <p>중점관리 공정의 온/습도 자동 수집</p> <p>바코드 시스템 (원자재)</p> <p>LOT넘버 생성</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p> <p>데이터 입력이 용이해졌다</p> <p>데이터 수집이 자동화되었다</p>
07	<p>“원료는 선입선출이 중요하지만 관리부재로 유효기간을 넘겨 전량 폐기하는 경우도 적지 않았다”</p> <p>“수많은 연구 레시피가 만들어지고 있는데 수기로 작성할 때는 실수도 생기고 데이터가 누락되는 경우도 적지 않았어요.”</p> <p>“레시피를 엑셀로 작업하여 페이퍼 형태로 생산팀에 전달했거든요.”</p> <p>“원부자재 재고관리가 원활하지 않아 2~3주 앞을 내다보는 생산계획을 잡기가 힘들었지만...”</p>	<p>“경력자가 아니어도 어디에 어떤 재료가 있는지 쉽게 파악할 수 있기 때문에...”</p> <p>“모든 레시피가 전산으로 관리되고 관련부서가 공유하기 때문에 굉장히 편리...”</p> <p>“고객사에 정확한 납품일정을 확인해 주는 게 가능해졌기 때문에...”</p>	<p>제품검사 후 PDA로 출고현황 입력</p> <p>터치 패널 PC에서 생산실적 입력</p> <p>작업지시서 디지털화 (레시피 포함)</p> <p>바코드 시스템 (작업지시서)</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p> <p>데이터 입력이 용이해졌다</p>

번호	종전 환경	주요편익	구축 기재	공통 현상
08	<p>“고객이 특정 제품에 대해서 문의하면 현장에서 달려가 트레이를 하나하나 살핌”</p> <p>“원자재를 수기로 관리해”</p> <p>“생산관리나 작업지시 수기나 구두로 이루어진다.”</p>	<p>“직원들이 매우 편리해졌다고 자주 이야기합니다.”</p> <p>“PC와 현황판으로 적정 재고량을 확인할 수 있어서...”</p> <p>“제품번호나 바코드를 통해 상품이 현재 어느 공정에서 돌아가는지 알 수 있어서...”</p>	<p>바코드 시스템 (작업지시서)</p> <p>로트번호로 생산 현황 조회</p> <p>생산 이력 디지털화</p> <p>클라우드 데이터 서버</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>데이터 입력이 용이해졌다</p>
09	<p>“그간 수기나 전화 연락, 대면 등으로 해결해야 했던 일을...”</p> <p>“생산성과 실적을 수기로 관리...”</p> <p>“생산 정보에 대한 점검이나 확인에 있어 다소 시간 걸림”</p>	<p>“실시간으로 현황 확인 가능해 일부러 현장까지 찾아가 점검하는 일이 크게 줄었습니다.”</p>	<p>문제 발생시 메신저 서버로 보내져 모바일 전송</p> <p>SCM통해 협력사와 정보공유</p> <p>ERP통해 생산계획 담당자가 작업계획 생성-지시-리인에 전달</p>	<p>데이터 입력이 용이해 졌다</p> <p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>회사 내외부에서 데이터에 접속할 수 있다</p>

번호	종전 환경	주요편익	구축 기재	공통 현상
10	<p>“거래처에서 (주문이 들어 오면) 공정별로 얼마나 진행했는지 파악하고 싶어 하기 마련이죠. 그럴 때마다 직원들이 현장에 나가서 확인하고 알려주기 바빠...”</p> <p>“불량 발생 후 원인 점검에 대처 지연...”</p>	<p>“불량 원인을 기계로 분류하고 검사하니 개선해야 할 점이 확인해졌습니다.”</p> <p>“입출고 계산이 정확하게 이뤄지는 만큼 낭비가 적어졌죠”</p>	<p>PDA로 입고 기록</p> <p>현장작업자가 터치스크린으로 공정 정보 입력</p> <p>출하 전 생산 완료 정보 입력</p> <p>MES서버에 통합 저장</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>데이터 입력이 용이해 졌다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p>
11	<p>“문제가 생기면 납기를 수일씩 미뤄야하는 경우가 생기고...”</p> <p>“현장 작업자들이 그날의 업무를 수기로 작성...수기로 작성하는 업무에 대한 신뢰성 문제...”</p> <p>“데이터를 집계하는데 오랜 시간이 걸리다 보니 정작 개선안은 소 잃고 외양간 고치는 식...”</p>	<p>“실시간으로 개선방안을 찾을 수 있다는 게 가장 큰 장점”</p> <p>“담당자만 알고 있던 핵심정보에 대한 관리”</p> <p>“그날의 작업 결과를 장부에 적어야 하는 불편함이 사라지면서 업무 효율이 크게 좋아졌다.”</p> <p>“...자재 이력 등 업무 데이터의 수집과 관리가 쉬워진 것도 장점입니다.”</p> <p>“작업 이력관리 한번으로 모든 서류작업이 끝나기 때문에, 업무를 마친 뒤 처리해야 하는 잔업이 줄면서...”</p>	<p>바코드 시스템 (제품입고)</p> <p>PDA 이용한 검사 결과 입력</p> <p>LOT 추적과 바코드 제품 식별</p> <p>라인별 모니터 - 설비 이상 여부와 체크 사항 관리</p>	<p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p> <p>데이터 입력이 용이해 졌다</p> <p>부서간 통합된 데이터를 공유한다</p>
12	<p>단가이력관리 어려움</p> <p>영업관리 수기 관리로 어려움</p> <p>재고 관리 어려움</p> <p>생산품 이력관리 및 추적 확인 어려움</p>	<p>인적 오류가 줄었고 불량률이 감소</p> <p>신속한 의사 결정</p> <p>품질이력 확인이 손쉬워짐</p> <p>약품 재고 관리 용이</p> <p>작업 조건 입력만으로 현장을 컨트롤</p>	<p>표면처리 데이터 확보</p> <p>엑스레이 도금 두께 측정기</p> <p>유무선 네트워크 구축</p> <p>데이터 시각화</p> <p>동적 차트 (공정을 하루, 일주, 월 단위로 그래프 표출)</p>	<p>데이터 수집이 자동화되었다</p> <p>데이터 입력이 용이해 졌다</p> <p>현장 데이터 수집이 실시간으로 이루어진다</p>

## A2. 단계별로 본 스마트 공장

구분	현장자동화	공장운영	기업자원관리	제품개발	공급사슬관리
고도	IoT/loS 기반의 CPS화				인터넷 공간상의 비즈니스 CPS 네트워크 협업
	IoT/loS화	IoT/loS(모듈)화 빅데이터 기반의 진단 및 운영			
중간2	설비제어 자동화	실시간 공정제어	공장운영 통합	시뮬레이션과 일괄 프로세스 자동화	다품종 개발 협업
중간1	설비데이터 자동집계	실시간 의사결정	기능 간 통합	기술 정보 생성 자동화와 협업	다품종 생산 협업
기초	실적집계 자동화	공정물류 관리 (POP)	관리 기능 중심 기능 개별 운용	서버를 통한 기술/납기 관리	단일 모기업 의존
ICT 미적용	수작업	수작업	수작업	수작업	전화와 이메일 협업

※ 출처 : 스마트제조혁신추진단 (2020)

### 약어 풀이

- IoT/loS - Internet of Things / Internet of Services
- CPS - Cyber Physical System
- ICT - Information and Communications Technology
- POP - Point of Production

### A3. 확장모델 소스코드 (R)

```
library(deSolve)
data.actual <- My.Data

A.mean <- mean (data.actual$Orders)           #A. is for arrival
A.cv <- 0.20                                  #cv=coeff. of variance
A.sd <- A.mean * A.cv                         #sd=mean*cv
r <- 2
h <- 0.07
S <- A.mean + A.sd * qnorm(r/(r+h))          #s is newsvendor optimal Q

cpb <- My.cpb
cnow <- My.Qmax0
dp <- My.dp
cexp <- (1-dp)*cpb

sim.end.time <- length (data.actual$sim_time)
START<-0; FINISH<-sim.end.time; STEP<-1
simtime <- seq(START, FINISH, by=STEP)
Inventory.0 <- data.actual$sim_w[1]

stocks <- c(
  sInventory = Inventory.0,
  sSumA = 1,
  sdINV = 0,
  sFGI = 0)

auxs <- c(
  aa = 1000, #aa value is not used if ext_arrive exists
  ac = cnow, #ac is capacity parameter
  ar = r,
  ah = h,
  aCTq = 0,
  aCTp = 9/24,
  aCT = 0,
  aWIPq = 0,
  aTH = 0,
  aWIP = 0)
```

```

ext_arrival <- function(arrive.t, k) {
  return(ifelse(k<1, 0, arrive.t[[2]][k]))
}

ext_process <- function(process.t, k) {
  return(ifelse(k<1, 0, process.t[[3]][k]))
}

model <- function (time, stocks, auxs, arrival.data.frame, process.data.frame) {
  with(as.list(c(stocks, auxs)), {

    fArrive <- ext_arrival(arrival.data.frame, time)
    fProcess <- ifelse (ext_process(process.data.frame, time) < 1, 0,
      ifelse (sInventory < 0, 0,
        ifelse (sInventory < S, 0,
          ifelse (sInventory > ac, ac, S))))

    dInventory_dt <- fArrive - fProcess
    fAt <- fArrive
    dAt_dt <- fAt
    fdINV <- sInventory
    dINV_dt <- fdINV
    dFGI <- fProcess

    aCTq <- sdINV / sSumA
    aWIPq <- sdINV / time
    aTH <- aWIPq / aCTq
    aCT <- aCTp + aCTq
    aWIP <- aTH * aCT

    return(list(c(dInventory_dt, dAt_dt, dINV_dt, dFGI), dINV=fdINV, At=fAt,
      Process=fProcess, Arrive=fArrive,
      WIP=aWIP, CT=aCT, TH=aTH, WIPq=aWIPq, CTq=aCTq))

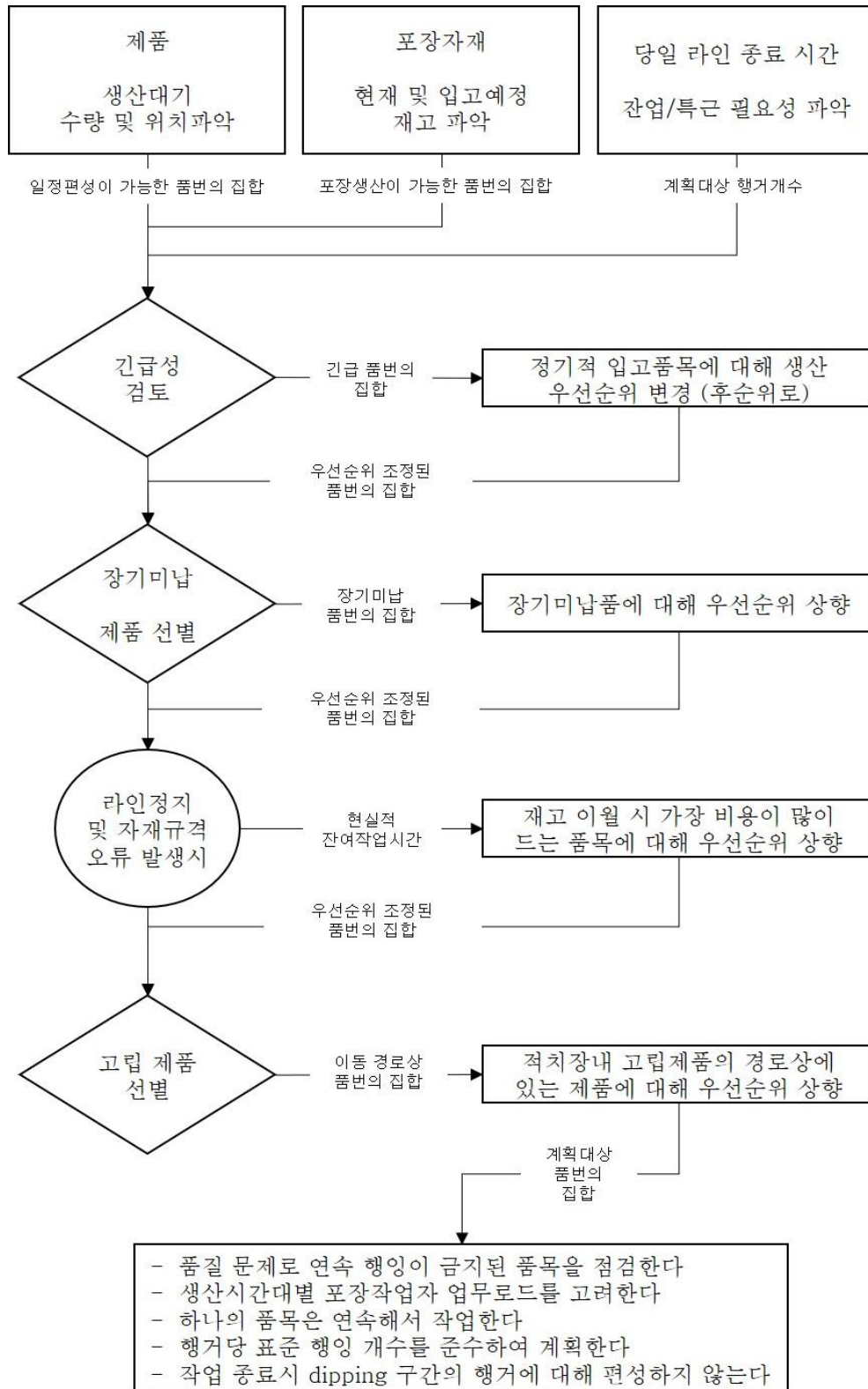
  })
}

o<-data.frame(ode(y=stocks, times=simtime, func = model,
  parms=auxs, method="euler", arrival.data.frame=data.actual,
  process.data.frame=data.actual))
o <- o[-1,] # erase row at time 0

```



A4. Hankoat의 작업 스케줄링 프로세스



## Abstract

Smart Factory is smartization movement of manufacturing shop floors. Responding to the imperative of digital transformation the government established and endowed a private-public joint corporation with the authority to subsidize small and medium enterprises (SMEs) Smart Factory projects.

Meanwhile, subcontract manufacturing is a popular business model in such industries as automotive, shipbuilding, electronics and accounts for a significant portion of SMEs in its number. Its profitability is constrained not only by its hierarchical position to accept given price and quantity of jobs set from the user companies but also user-supplied material handling. These business characteristics set structural limitations on subcontract manufacturers' effort of reducing cost and increasing sales to discourage large-scale IT investment (e.g., Smart Factory, Enterprise Resource Planning).

The purpose of this study is to help subcontract manufacturers select cost-effective Smart Factory projects by providing a framework called Digital Transformation - Operation Performance Estimation Framework (DT-OP Estimation Framework) for estimating the financial equivalent of operational performance increase from operation system configuration change that would follow successful implementation. In order to achieve the purpose DT-OP Estimation Framework for estimating the expected operational performance measures of post-digital transformation is suggested. Under the guidance of this framework, close observation of a subcontract manufacturer captured a daily operation decision process which was reflected in the subcontractor-unique mathematical model. Followed by mathematical model building operational performance measures for the subcontract manufacturer were defined. A simulation model was developed so that the change in the parameters of the operation system could result in the change in the operation performance measure. Consequently, this study shows the change in the operational performance measures can be converted into the expected financial performance change. In order to address the applicability of the DT-OP estimation framework, this study features an analysis of historical operational data to show a numerical example with which other subcontract manufacturers can follow the same course of analysis and simulation to obtain their own expected Smart Factory performance estimation.

This research used various methodologies to model subcontract manufacturing operations to present the quantitative effect of Smart Factory investment. For the conceptualization of the

framework, past researches regarding the enterprise IT value were reviewed, and for the mathematical models, relevant mathematical models of the production and inventory operation discipline were evaluated. To collect and analyze qualitative data describing business processes and quantitative data regarding operation performance, a series of unstructured manager interviews, workshops, and case study development were performed. For simulation, a system dynamics approach was used to reflect operation managers' daily decision-making under certain configuration settings.

The result of the study argues that the expected monetary surplus which subcontractors could gather from the implementation of Smart Factory is not likely to be large, nor neglectable. This expectation can be attributed to the readily diminished gap between the best possible performance and performance status quo., achieved through repeating the established business processes over a long time. In other words, smartization project of existing business processes alone is not expected to bring about a substantial value increase. because the project would only be able to change parameters of current configurations of operations.

Managerial implications can be found by operation managers while running the simulation model. Operation managers can expect to improve their insight into the relationship between parameters and operational performances over time as well as the relationship among operational performance measures.

Production and inventory literature can be richer with this study because operation models and the data of daily total in-flow from upstream and daily production quantity both obtained from real subcontractor manufacturing companies are scarce. So this research is expected to expand the boundary of existing studies of SMEs and start-ups' operations whose shop floors do not tend to leave enough amount of data that are inevitable to data transparency and traceability. By presenting the result of the simulation run with historical data obtained from the focal firm, this study can also contribute to the variety of quantifying methodologies calculating the economic value of Smart Factory.