



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](#)

의류학박사 학위논문

의류 봉제 라인의 디지털 트윈
구현을 위한 공정 시뮬레이터 개발

**Process Simulation for the Digital Twin
System in Apparel Assembly Line**

2023년 2월

서울대학교 대학원

의류학과

김민석

의류 봉제 라인의 디지털 트윈 구현을 위한 공정 시뮬레이터 개발

지도교수 김 성 민

이 논문을 의류학박사 학위논문으로 제출함
2022년 10월

서울대학교 대학원
의류학과
김 민 석

김민석의 박사 학위논문을 인준함
2023년 1월

위 원 장 이 주 영 (인)

부위원장 박 주 연 (인)

위 원 김 주 연 (인)

위 원 윤 창 상 (인)

위 원 김 성 민 (인)

국문초록

4차 산업혁명에 대비하기 위한 스마트 공장(smart factory)의 구현은 제조 산업의 최대 관심사 중 하나이다. 본 연구에서는 의류 제조 산업에서의 스마트 공장을 구현하기 위한 첫걸음으로 디지털 트윈(digital twin) 시스템에서 활용될 수 있는 가상의 의류 봉제 라인을 자동으로 생성하고, 실제 의류 봉제 라인을 모사할 수 있는 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다.

먼저, 의류 봉제 라인의 최적화를 위한 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 모듈화 개념을 적용한 혼합 작업 할당 기법을 제시하였다. 생산하려는 의류의 공정을 분석하여 각 작업을 모듈로 분류하고, 단일 작업-복수 작업자 할당 방식과 다중 작업-단수 작업자 할당 방식으로 그룹화된 작업을 배분하여 워크스테이션을 생성하는 알고리즘을 구현하였다. 그리고 작업자의 작업 숙련도를 고려한 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱을 추가로 수행하였다. 라인 밸런싱 결과를 확인하기 위해 남자 셔츠 100벌을 생산하는 실험에서 선행 연구의 31.7% 작업 인원만으로 총생산시간이 67.3%만큼 단축되었으며, 작업자 수가 동일한 경우에는 총생산시간이 85.7%만큼 단축되었다. 총생산시간이 획기적으로 단축된 이유는 설계 단계의 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 한정된 선행 연구와 달리 본 연구에서는 작업 배분에 따른 라인 밸런싱과 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱을 모두 수행했기 때문이며, 실험 결과를 고려할 때 설계 단계의 의류 봉제 라인 밸런싱 문제에서 작업 배분은 반드시 고려되어야 한다.

다음으로, 혼합 작업 할당 기법으로 라인 밸런싱이 수행된 의류

봉제 라인이 자동으로 생성되고, 생성된 의류 봉제 라인을 활용하여 시뮬레이션을 수행할 수 있는 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터를 검증하기 위해 의류 제조 공장으로부터 얻은 테크니컬 자켓의 공정 분석 데이터를 가지고 사례 연구를 수행하였다. 의류 봉제 라인의 자동 생성 및 수정 기능 테스트 결과, 약 97.4%의 워크스테이션에서 작업이 정상적으로 배분된 의류 봉제 라인이 생성되었다. 또한 다양한 시나리오로 개발된 시뮬레이터의 활용 가능성을 검토했으며, 개발된 시뮬레이터가 주문 선정, 생산 계획, 의류 봉제 라인 계획 및 운영에 활용될 수 있음이 확인되었다. 개발된 의류 봉제 라인 전용 시뮬레이터는 기존의 상용 시뮬레이션 소프트웨어에서의 레이아웃 작성이나 의류 봉제 라인의 모델링과 같은 시간이 오래 걸리는 수작업을 자동으로 대체하였기 때문에 빠른 대응이나 지속적인 수정이 용이하다는 점에서 이점이 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제시한 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법은 라인 밸런싱 문제 해결에 효과적이며, 개발된 봉제 라인 시뮬레이터는 자동으로 가상의 의류 봉제 라인을 생성하여 편리할 뿐만 아니라 시뮬레이션 기능을 통해 실제 의류 봉제 라인의 최적 운영에 활용될 수 있다. 그리고 자동으로 생성되는 의류 봉제 라인은 디지털 트윈의 가상 대응물로 활용될 수 있으며, 실제 의류 봉제 라인의 감시(monitoring)를 위한 추가적인 연구를 통해 의류 봉제 라인의 완전한 디지털 트윈 시스템을 구현할 수 있을 것이라 기대한다.

주요어 : 디지털 트윈, 의류 봉제 라인, 라인 밸런싱, 혼합 작업 할당 기법, 봉제 라인 시뮬레이터, 라인 운영 최적화

학 번 : 2018-38004

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 필요성	1
제 2 절 연구의 목적	6
제 2 장 이론적 배경	7
제 1 절 의류 봉제 라인 밸런싱	7
1. 의류 봉제 라인의 이해	7
2. 의류 봉제 라인 밸런싱의 이해	12
제 2 절 디지털 트윈을 위한 의류 봉제 라인 시뮬레이터 ...	18
1. 디지털 트윈의 이해	18
2. 의류 봉제 라인의 디지털 트윈	19
3. 상용 시뮬레이션 소프트웨어	23
제 3 장 연구방법	26
제 1 절 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법	27
1. 공정 분석	29
2. 모듈 분류	32
3. 작업자 수와 생산량 설정	34
4. 모듈별 워크스테이션 수 산정	36
5. 모듈별 워크스테이션 생성	38
6. 작업자 배치	41

제 2 절 의류 봉제 라인 시뮬레이터	45
1. 의류 봉제 라인 시뮬레이터 개발	45
2. 사례 연구	50
제 4 장 결과 및 고찰	57
제 1 절 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법	57
1. 워크스테이션 생성 및 작업 배분	57
2. 작업자 배치	59
3. 작업자 배치 전·후 분석	61
4. 단계별 라인 밸런싱의 효과	66
제 2 절 의류 봉제 라인 시뮬레이터	70
1. 의류 봉제 라인 시뮬레이터 개요	70
2. 의류 봉제 라인 자동 생성	72
3. 자동 생성된 의류 봉제 라인 검토	74
4. 시나리오를 통한 사례 연구	80
제 5 장 결 론	86
제 1 절 요약 및 연구의 의의	86
제 2 절 연구의 한계 및 제언	89
참고문헌	91
Abstract	98
부 록	101

표 목 차

Table 1. Tasks and SAM of men's shirt (Chan et al., 1998)	30
Table 2. Comparison of process analysis data for five technical jackets ·	52
Table 3. Scenarios for the evaluation of the developed simulator	56
Table 4. Workstation generation in modules	58
Table 5. Worker assignment by line balancing method	60
Table 6. Worker assignment by reducing working time method	60
Table 7. Statistics before and after worker assignment	61
Table 8. Total production time before and after worker assignment	62
Table 9. Idle time before and after worker assignment	64
Table 10. Total production time for different line balancing methods	66
Table 11. Statistics of line balancing methods	68
Table 12. Estimated work time in changing the number of workers ·	80
Table 13. Estimated work days and number of machines required	81
Table 14. Changes in the number of workers due to absenteeism	82
Table 15. Changes in task assignment at the join module	83

그림 목차

Fig. 1. Assembly line area in an apparel manufacturing factory	8
Fig. 2. Schematic illustration of apparel assembly line area	9
Fig. 3. Apparel manufacturing process	19
Fig. 4. Schematic diagram for a digital twin of apparel assembly line ..	21
Fig. 5. Module-based mixed task assignment process	28
Fig. 6. Task precedence relationship (Chan et al., 1998)	31
Fig. 7. Module classification	33
Fig. 8. Modular schematic diagram (Lin, 2008)	35
Fig. 9. Schematic diagram for Toyota sewing system	38
Fig. 10. Process flow of task grouping and workstation formation	40
Fig. 11. Process flow of worker assignment	42
Fig. 12. Schematic diagram for modular production	46
Fig. 13. Input format of process analysis data	48
Fig. 14. Flat sketch of five technical jackets	51
Fig. 15. Metadata for technical jacket	53
Fig. 16. Overview of the developed apparel assembly line simulator	71
Fig. 17. Generated apparel assembly line for technical jacket A	73
Fig. 18. Line balancing for technical jackets	75
Fig. 19. Line balancing by changing the number of workers	78
Fig. 20. Changes in the join module due to absenteeism	84

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성

2016년 세계 경제 포럼에서 4차 산업혁명이 소개된 이후로 4차 산업혁명에 대한 관심이 증가하였다. 4차 산업혁명은 현재 진행형이며, 그 범위가 매우 포괄적이기 때문에 파악하기 어려운 측면이 있다. 따라서 4차 산업혁명에 대해 가늠하기 위해서는 그 범위를 제조 산업으로 한정하여 이전 산업혁명과 비교해 볼 필요가 있다. 지난 세 차례의 산업혁명을 살펴보면, 1차 산업혁명은 증기기관을 생산에 본격적으로 활용한 기계화 생산의 시대이다. 2차 산업혁명은 전기의 공급과 컨베이어 벨트를 도입을 바탕으로 한 대량 생산의 시대이며, 3차 산업혁명은 전자 및 정보기술(IT)을 바탕으로 한 자동화 생산의 시대이다. 지난 세 차례의 산업혁명은 증기기관, 전기, 정보기술과 같은 핵심기술을 바탕으로 한 생산 방식의 획기적인 변화를 의미한다. 따라서 제조 산업에서의 4차 산업혁명 역시 특정 핵심기술을 바탕으로 한 생산 방식의 획기적인 변화일 것이라 예측할 수 있으며, 그 핵심기술로는 사이버-물리 시스템(cyber-physical system)이 거론되고 있다(Kagermann et al., 2013; Monostori et al., 2016; Sinha and Roy, 2020).

4차 산업혁명에 관심과 더불어 제조 산업에서는 스마트 공장(smart factory) 또는 스마트 제조(smart manufacturing)라 일컬어지는 새로운 제조 시스템의 구현에 큰 관심이 있다(Osterrieder et al., 2020). 스마트 공장은 2011년 독일 정부의 제조 기술 혁신을 위한 인더스트리 4.0 이니셔티브(Industrie 4.0 initiative)의 핵심으로 처음 소개되었다(Kagermann et al., 2013). 스마트 공장은 물리적 자산과 정보 시스템의 통합을 구현

하기 위해 제조 중심의 사이버-물리 시스템을 기반으로 하는 최적화된 지능형 제조 시스템이다(Shi et al., 2020). 스마트 제조는 미국에서 처음 소개된 개념으로 미국 국립표준기술연구소에 따르면, 공장, 공급 네트워크 및 고객 요구의 변화하는 수요와 조건을 충족하기 위해 실시간으로 대응하는 완전히 통합된 협업 제조 시스템이다(National Institute of Standard and Technology, 2014). 최근에는 사물인터넷(internet of things) 개념을 바탕으로 제조의 물리적 자산을 가상공간과 통합하는 사이버-물리 시스템 구현에 중점을 두고 있다(Kusiak, 2018). 결국 제조 산업의 주요 관심은 4차 산업혁명의 핵심기술로 간주되는 사이버-물리 시스템을 기반으로 스마트 공장 또는 스마트 제조(이하, 스마트 공장으로 통일)를 구현하는 것에 있다.

사이버-물리 시스템이란 가상 컴퓨팅에 의해 물리적 자산의 감시(monitors)와 제어가 통합된 시스템이다(Kusiak, 2018). 기술이 발전함에 따라 센서를 설치하고 네트워크를 구성하는 비용이 획기적으로 줄어들어 사물인터넷 기술이 각광을 받게 되었다. 따라서 제조 산업에서도 제조 현장에 사물인터넷 기술을 적용하여 가상 컴퓨팅을 통해 생산설비의 감시와 제어가 동시에 가능하게 되었다. 즉, 모든 생산설비에 사물인터넷 기술을 적용하여 생산 전반에 걸쳐 가상공간에서 감시와 제어를 동시 수행할 수 있는 시스템을 구현함으로써 유연 생산, 적응 생산, 생산 최적화에 대응하는 것이 사이버-물리 시스템의 목적이다(Monostori et al., 2016). 여기서 생산설비의 제어가 가능한 시스템이란 통신을 통해 생산설비 시스템을 직접 제어하는 것을 의미하며, 결국 사이버-물리 시스템은 제조의 자동화를 바탕으로 하는 개념이다(Riedl et al., 2014).

그러나 의류 제조는 전형적인 노동집약적 산업으로, 명품을 제외하고 부가가치가 낮다. 따라서 지난 수십 년간 의류 제조 산업은 기술 발전에 투자하기보다 상대적으로 인건비가 저렴한 개발도상국으로 제조 공장을 이전하였다. 오늘날 의류는 중국을 거쳐 베트남, 인도네시아, 인도, 방글

라데시, 스리랑카와 같은 동남아시아 및 남아시아 국가에서 주로 생산 중이나, 이 국가들도 점차 발전함에 따라 인건비가 빠른 속도로 상승하고 있다 (Lopez-Acevedo and Robertson, 2016). 이에 따라 의류 제조 산업에서도 저개발 국가로의 이동이 지속될 수 없음을 한계를 느끼고 있으며 때마침 불어온 4차 산업혁명, 스마트 공장에 대한 관심과 함께 기술 개발과 투자를 준비하고 있다(Jung et al., 2021).

그러나 의류 제조 산업의 자동화 수준은 너무 낮다(Kim et al., 2020). 특히, 대량 생산 중심의 의류 제조 공장에서는 다수의 의류 봉제 라인이 주요 생산 영역으로 봉제 라인마다 많은 수의 봉제 작업자가 필요하다. 봉제 라인에 속한 작업자는 본인에게 부여된 작업을 작업물에 수행하고 다음 작업자에게 넘기는 행위를 반복하며, 모든 작업자가 하나의 작업물에 부여된 작업을 한 번씩 수행하면 한 벌의 의류가 완성된다. 즉, 의류 제조 산업의 주요 생산 영역인 의류 봉제 라인은 여전히 포드 시대의 조립 라인 형태와 크게 다르지 않다. 결국 의류 제조 산업의 기술 발전은 2차 산업혁명의 기술 수준과 3차 산업혁명의 기술 수준 사이에 머물러 있으며, 의류 제조 산업에서 인간의 노동은 여전히 필수적인 요소이다.

이처럼 의류 제조 산업과 다른 제조 산업 사이에는 기술 격차가 존재한다. 따라서 다른 제조 산업에서 효과가 입증된 개념을 의류 제조에 적용하고 연구함으로써 기술 격차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 모듈화 개념은 이미 자동차, 컴퓨터, 전자 등의 제조 산업에 도입되었으며, 제조에서의 모듈화는 생산의 복잡성을 줄이기 위한 생산설계를 의미한다 (Miguel, 2005). 또한, 모듈화를 통해 고객 맞춤 수준의 다양성을 확보할 수 있으며, 비슷한 부품의 표준화를 통해 자원의 활용도를 높일 수 있다 (Miller and Elgård, 1998).

한편 2008년 글로벌 금융위기 이후로 선진국을 중심으로 서비스업보다 제조업의 일자리가 안정적이고 좋은 일자리라는 인식의 전환이 발생하였다. 이와 같은 인식의 전환과 함께 저렴한 인건비를 이유로 해외로 이전한 제조 시설을 다시 본국으로 들여오는 것을 장려하는 리쇼어링

(reshoring) 정책이 미국을 비롯한 일부 선진국에서 4차 산업혁명의 관심과 맞물려 추진되기 시작하였다. 특히 코로나-19의 전 세계적인 유행과 동시에 전 세계적인 마비 상황을 인류 전체가 경험했으며, 국제무역이 급격히 위축됨에 따라 전 세계의 다양한 기업이 복잡하게 연결된 글로벌 가치사슬(global value chain)을 기반으로 하는 생산의 위기가 더욱 부각되었다(Maul, 2020). 이에 따라 미국을 중심으로 일부 선진국은 주요 산업의 생산 시설 자국화에 더욱 심혈을 기울이고 있다(Bolter and Jim, 2020). 결국, 전 세계적인 위기 상황으로 인해 제조업의 리쇼어링은 선택이 아닌 필수가 되었으며 의류 제조 산업 역시 예외가 아니다. 그러나 인건비의 비중이 높은 의류 제조 산업의 리쇼어링이 이뤄지기 위해서는 스마트 공장의 구현이 필연적으로 수반되어야 한다(Ancarani and Mauro, 2018).

이처럼 의류 제조 산업에서의 스마트 공장 구현이 필연적임에도 불구하고 의류 제조 산업에서의 스마트 공장에 관한 연구는 거의 없으며, 다른 산업에서의 스마트 공장에 관한 연구 역시 여전히 초기 단계에 있다. 또한, 실제 제조 현장에서 스마트 공장을 구현하는 연구 역시 매우 적을 뿐만 아니라 굉장히 제한적으로 수행되었다. 결국, 제조 현장에서 스마트 공장을 구현하기 위해서는 여전히 많은 연구가 필요하다. 그리고 산업마다 처한 환경과 기술 수준이 다르기 때문에 일반적으로 통용되는 개념의 스마트 공장을 곧바로 구현하는 것은 어렵다. 따라서 의류 제조 산업에서 스마트 공장 구현의 첫걸음을 떼기 위해서는 의류 공장의 제조 영역 중 어떤 영역을 선정하여 어떤 기술을 접목하고 어느 수준으로 스마트 공장을 구현할지를 먼저 결정하여야 한다(Kim et al., 2020).

최종적으로 옷이 완성되는 의류 봉제 라인은 의류 생산의 핵심 영역이며, 생산시간 단축은 공장의 이익과 직결된다. 그리고 라인 밸런싱(line balancing)을 통한 봉제 라인의 지속적인 관리는 생산시간 단축의 주요 수단이다. 라인 밸런싱의 목표는 봉제 라인에서 병목현상의 발생을 막는 것이며, 이는 봉제 라인에 속한 작업자들의 작업 시간이 최대한 균일하

도록 봉제 라인을 구성하고 운영함으로써 해결할 수 있다. 그러나 작업 순서, 기계, 작업 난이도, 작업자 숙련도, 자원 등의 제약 조건을 고려하여 작업자들의 작업 시간이 최대한 균일하도록 봉제 라인을 구성하고 운영하는 것은 매우 어려운 일이다.

그러나 앞에서 언급했듯이 의류 봉제 라인은 많은 작업자에 의해 구성되며 봉제 라인의 자동화 수준은 매우 낮다. 따라서 가상 컴퓨팅을 통한 물리적 자산의 직접 제어가 가능한 시스템인 사이버-물리 시스템을 곧바로 봉제 라인에서 구현하는 것은 무리가 있다. 사이버-물리 시스템의 구현을 위해서는 먼저 디지털 트윈(digital twin)이 구현되어야 한다 (Zheng and Sivabalan, 2020). 스마트 공장을 위한 디지털 트윈은 센서 데이터의 실시간 동기화 및 설계 단계에서의 평가 과정을 통해 실시간 최적화, 의사결정 및 사전 유지 보수를 가능하게 하는 물리적 자산의 가상 대응물(virtual counterpart)이다(Negri et al., 2017). 사이버-물리 시스템과 디지털 트윈은 사물인터넷 기술을 바탕으로 물리적 자산을 가상 공간에 통합하고 가상 대응물을 통해 상황에 따른 적절한 의사결정을 그 목적으로 한다는 점에서 유사하다. 그러나 사이버-물리 시스템은 실제와 가상 사이의 상호작용에 중점을 둔 개념으로(Monostori, 2018), 가상 컴퓨팅을 통한 물리적 자산의 감시뿐만 아니라 제어도 가능해야 한다. 반면 디지털 트윈은 동기화된 가상 대응물에 중점을 둔 개념으로, 가상 대응물을 통한 물리적 자산의 감시에 초점을 맞추고 있다. 따라서 가상 컴퓨팅을 통한 물리적 자산의 직접 제어보다는 가상 대응물을 활용하여 물리적 자산 운영의 적절한 의사결정을 하는 것이 디지털 트윈의 목표이다. 그리고 가상 대응물을 활용하여 미리 시뮬레이션을 수행해봄으로써 물리적 자산 운영을 위한 의사결정에 도움을 줄 수 있다. 따라서 디지털 트윈 시스템을 개발하기 위해서는 물리적 자산의 감시를 구현하는 것 못지않게 가상 대응물의 구현과 구현된 가상 대응물을 활용하여 시뮬레이션을 수행할 수 있는 소프트웨어가 필요하다.

제 2 절 연구의 목적

본 연구에서는 의류 제조 산업에서 스마트 공장을 구현하기 위한 첫 걸음으로 의류 생산에 핵심 영역인 의류 봉제 라인을 우선 디지털 트윈 시스템을 구현해야 할 제조 영역으로 선정하였다. 그리고 봉제 라인의 디지털 트윈 시스템을 구현하기 위해 가상 대응물로 활용될 수 있는 가상의 의류 봉제 라인을 자동으로 생성하고, 실제 의류 봉제 라인을 모사할 수 있는 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 또한 개발된 시뮬레이터에서 생성되는 봉제 라인의 설계 과정에서 발생하는 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 모듈화 개념이 적용된 혼합 작업 할당 기법을 제시하고자 한다. 구체적인 연구의 목적은 다음과 같다.

첫째, 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 새로운 라인 밸런싱 기법인 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법을 제시하고자 한다. 제시한 혼합 작업 할당 기법으로 워크스테이션마다 그룹화된 작업을 배분하고, 작업자의 작업 숙련도를 고려하여 작업자 배치하는 방식으로 라인 밸런싱을 단계적으로 수행하는 알고리즘을 구현하고, 선행 연구와의 비교를 통해 단계적 라인 밸런싱의 효과를 검증하고자 한다.

둘째, 구현된 알고리즘으로 라인 밸런싱이 수행된 가상의 의류 봉제 라인을 자동으로 생성하고 의류 생산을 시뮬레이션할 수 있는 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 그리고 개발된 시뮬레이터를 검증하기 위한 사례 연구를 수행하고자 한다. 의류 제조 공장에서 일어날 수 있는 다양한 상황을 시나리오로 제시하고, 시뮬레이션을 통해 실제 의류 봉제 라인의 최적 운영을 위한 의사결정에 도움을 줄 수 있음을 검증함으로써 봉제 라인 시뮬레이터의 디지털 트윈 활용 가능성을 모색하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 의류 봉제 라인 밸런싱

1. 의류 봉제 라인의 이해

Fig. 1과 같은 대량 생산 기반의 의류 제조 공장은 Fig. 2와 같이 여러 의류 봉제 라인으로 구성되며, 의류 봉제 라인은 여러 워크스테이션(workstation)으로 구성된다. 여기서 워크스테이션은 한 명의 작업자가 작업을 수행하는 공간을 의미한다. 일반적으로 하나의 의류 봉제 라인은 일정 기간 동안 단일 품번의 옷을 생산하기 위해 계획된다. 생산 계획된 옷의 공정 순서를 고려하여 의류 봉제 라인의 워크스테이션마다 작업이 할당되며, 각 작업에 필요한 기계가 설치된다. 그리고 할당된 작업과 설치된 기계를 고려하여 작업 수행에 적합한 작업자를 워크스테이션에 배치한다. 작업 할당, 기계 설치, 작업자 배치가 완료된 의류 봉제 라인에 사전 준비된 의류 패턴이나 부자재 같은 작업물을 투입하고 공정 순서에 따라 각 워크스테이션에 할당된 작업을 작업자가 한 번씩 순차적으로 수행하면 한 벌의 옷이 완성된다.



Fig. 1. Assembly line area in an apparel manufacturing factory
(Source: Aug. 2., 2022., Yongjin factory in Indonesia by the author)

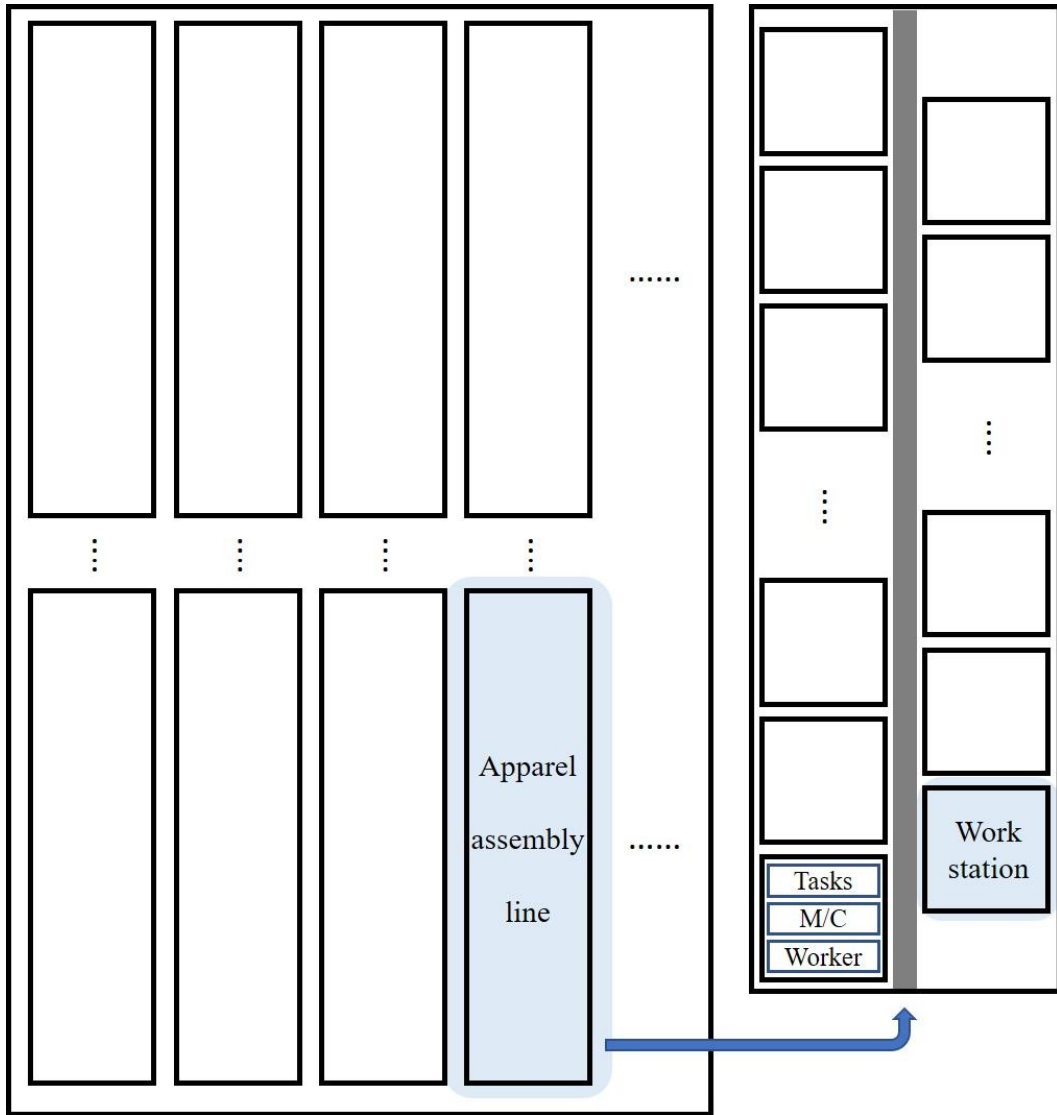


Fig. 2. Schematic illustration of apparel assembly line area

따라서 단일 의류 봉제 라인에서는 생산계획된 옷의 제조에 가장 적합하도록 워크스테이션을 구성한다. 그리고 실제 생산이 시작되면 작업자가 배치된 워크스테이션에 익숙해짐에 따라 작업량에 비례하여 작업속도가 빨라진다(Cao and Ji, 2021). 만약 봉제 라인에서 생산하는 옷을 변경하려면, 변경하려는 옷의 제조에 적합하도록 워크스테이션을 새롭게 구성하여야 한다. 그리고 워크스테이션을 새롭게 구성하려면 새로운 기계를 설치하기 위한 시간이 소요될 뿐만 아니라 작업자가 새로운 워크스테이션에 다시 적응해야 하기 때문에 봉제 라인에서 생산하는 옷의 잦은 변경은 생산 속도에 큰 영향을 미친다. 즉, 작업자의 작업 숙련도가 의류 생산에 큰 영향을 미치기 때문에 의류 제조 공장에서는 단일 의류 봉제 라인에서 한 품번의 옷을 오랜 기간 동안 생산할 수 있도록 계획하며, 생산하는 품번을 변경할 때에도 가급적 비슷한 옷으로 변경을 계획한다.

한편 의류 제조 산업에서는 생산 및 작업계획을 위해 봉제 과정에서 옷을 완성하는 데 수행되는 모든 작업을 표준 작업으로 분류하고, 표준 작업을 수행할 기계를 선정한다. 그리고 분류된 각각의 표준 작업을 선정된 기계로 수행하는 데 걸리는 시간을 측정하여 각 작업의 기준 허용 시간(standard allowable minutes or standard minute value, 이하 SAM으로 통일)을 산정한다. 이와 같이 표준 작업을 분류하고 표준 작업의 기준 허용 시간을 측정한 대표적인 시스템으로는 GSD(general sewing data)가 있다(Hui and Ng, 1999).

단일 의류 봉제 라인에서 특정 품번의 옷을 생산하기로 결정하면, 이 봉제 라인을 위한 레이아웃(layout)을 작성한다. 라인 레이아웃을 작성하기 위해 해당 옷의 의류 샘플과 패턴, 그리고 자재명세서(bill of material) 등을 참고하여 옷을 완성하기 위한 전체 공정을 단위 작업으로 세분화한다. 그리고 세분화된 단위 작업을 표준 작업에 적절히 매치하고, 매치된 표준 작업의 기준 허용 시간을 모두 더하면 한 벌의 옷을 완성하는 데 걸리는 예상 시간을 산정할 수 있다. 다음으로, 이 봉제 라인에 배치할 작업자 수를 결정하면 한 벌의 옷을 완성하는 데 걸리는 예

상 시간을 작업자 수로 나누어 각 작업자가 작업을 수행해야 할 기준 작업 시간을 산정할 수 있다. 이 기준 작업 시간과 공정 순서, 단위 작업의 기준 허용 시간을 고려하여 단위 작업을 그룹화하고, 그룹화된 작업을 워크스테이션마다 할당한다. 그리고 워크스테이션마다 할당된 작업을 수행하는데 필요한 기계의 설치 계획을 작성한다. 끝으로, 할당된 작업의 난이도와 기계, 그리고 작업자의 기술 수준을 고려하여 각 워크스테이션에서 작업을 수행할 작업자를 배치한다. 이와 같이 의류 봉제 라인에서 옷을 생산하기 위한 총체적 계획을 라인 레이아웃이라 한다.

2. 의류 봉제 라인 밸런싱의 이해

계획된 라인 레이아웃에 따라 실제 의류 봉제 라인을 설치하고 생산을 시작하면 의류 봉제 라인에 작업물이 투입된다. 작업자는 투입된 작업물에 본인이 할당받은 작업을 수행하고 공정 순서에 따라 다음 작업자에게 작업물을 넘긴다. 이와 같은 과정을 모든 작업자가 순차적으로 수행하면 한 벌의 옷이 완성된다. 워크스테이션 사이 작업물의 이동거리는 매우 짧기 때문에 작업물의 이동시간이 거의 소요되지 않는다고 가정하면 의류 봉제 라인에서 처음 한 벌의 옷이 완성되는 데 걸리는 시간은 모든 작업자의 작업 수행 시간의 합이다. 그러나 작업이 지속될수록 생산에 영향을 미치는 여러 사건으로 인한 작업자들의 작업속도 차이 때문에 각 워크스테이션에는 작업자가 작업해야 할 작업물이 쌓이게 되고 이때부터는 마지막 작업자가 할당된 작업을 수행할 때마다 한 벌의 옷이 완성된다.

만약 이 의류 봉제 라인에 어떤 작업자가 할당된 작업을 수행하는 시간이 다른 작업자들보다 지속적으로 오래 걸리는 경우, 이 작업자가 작업해야 할 작업물이 다른 작업자들보다 많이 쌓여 작업 부하량이 커지고 이 작업자 이후의 워크스테이션에는 작업물이 잘 흐르지 않게 되는데 이를 병목현상이라 한다. 이와 같은 병목현상이 발생하면 생산시간과 생산량에 지대한 영향을 끼치게 된다. 따라서 병목현상을 제거하는 것이 봉제 라인 관리의 핵심이다. 병목현상을 제거하기 위해서는 단일 의류 봉제 라인에 배치된 모든 작업자가 본인에게 할당된 작업을 수행하는 데 걸리는 시간이 최대한 균일하도록 봉제 라인을 설계하고 운영하는데, 이를 의류 봉제 라인 밸런싱이라 한다. 봉제 라인의 배치된 모든 작업자의 작업 수행 시간이 동일하다면 병목현상은 발생하지 않으나, 실제 현장에서는 모든 작업자의 작업 수행 시간이 동일하기 어렵기 때문에 병목현상

이 빈번하게 발생한다.

옷을 완성하기 위해 세분화된 단위 작업은 그 난이도와 작업 시간이 제각각이며, 단위 작업을 수행하는 필요한 기계도 다양하다. 이와 동시에 공정 순서와 작업자의 기술 수준을 고려하면서 모든 작업자의 작업 수행 시간이 동일하도록 라인 레이아웃을 계획하는 것은 쉽지 않다. 따라서 라인 밸런싱을 위해 라인 레이아웃을 계획하는 것은 매우 어려운 문제이며, 라인 밸런싱 문제는 NP-난해(nondeterministic polynomial-hard) 문제로 알려져 있다(Bongomin et al. 2020a).

이러한 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 설계 단계에서 해결하기 위해서는 크게 작업 배분 과정에서 라인 밸런싱을 수행하는 방법과 작업자 배치 과정에서 라인 밸런싱을 수행하는 방법이 있다. 대체로 선행 연구에서는 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 정의하고 이를 해결하기 위해 연구를 수행하였다.

Chan et al.(1998)은 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 작업자 배치를 통해 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 하였다. 남성 셔츠의 제조 공정을 41개의 작업으로 세분화하고, 각 작업의 기준 허용 시간을 측정하였다. 또한, 작업 순서를 파악할 수 있는 작업 우선순위 관계도와 모든 작업에 대하여 작업자 41명의 기술 수준을 표현한 작업자의 작업 숙련도를 표로 제공하였다. 그리고 각 작업을 하나의 워크스테이션으로 간주하여 작업마다 적합한 작업자를 배치하는 방식으로 라인 밸런싱을 수행하였다. 즉, 라인 밸런싱을 위한 작업의 배분 없이 단일 작업에 최적의 작업자 한 명을 배치하는 방식(single task-single worker assignment method)으로 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 하였다. 그러나 작업자별 기술 수준을 고려하더라도 작업별 기준 허용 시간의 편차가 크기 때문에 단일 작업-단수 작업자 할당 방식으로 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하기에는 한계가 있다.

Zeng et al.(2012)도 특수한 유전 알고리즘을 적용한 작업자 배치를 통해 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 하였다. 16개 작업으로

공정을 세분화하고 작업 우선순위 관계뿐만 아니라 각 작업의 기준 허용 시간도 제공하였다. 그리고 작업자 21명의 기술 수준을 표현한 작업자의 작업 숙련도를 표로 제공하였다. 작업 수보다 더 많은 작업자를 의류 봉제 라인에 배치하여 기준 허용 시간이 긴 단일 작업에 여러 작업자를 배치되는 방식으로 라인 밸런싱을 수행하였다. 즉, 이 연구에서도 작업 배분에 따른 라인 밸런싱을 고려하지 않고 하나의 작업에 여러 작업자를 배치할 수 있는 단일 작업-복수 작업자 할당 방식(single task-multiple worker assignment method)으로 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 하였다. 그러나 여전히 기준 허용 시간이 짧은 작업에서 발생하는 작업별 기준 허용 시간의 편차 때문에 의류 봉제 라인 밸런싱 문제 해결에는 한계가 있다.

Chen et al.(2021)도 메타 휴리스틱(meta heuristic) 알고리즘을 이용한 작업자 배치를 통해 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 했으며, Chan et al.(1998)이 제공한 데이터를 이용하였다. 세 가지 메타 휴리스틱 알고리즘을 사용하여 단일 작업-단수 작업자 할당 방식을 수행했을 뿐만 아니라 여러 작업을 그룹화하여 워크스테이션을 생성하고 작업자를 배치하는 방식으로 라인 밸런싱을 시도하였다. 즉, 다중 작업-단수 작업자 할당 방식(multi task-single worker assignment method)으로 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 하였다. 그러나 각 작업의 기준 허용 시간을 고려하여 작업을 그룹화하고 이를 워크스테이션에 배분한 것이 아니라, 작업 우선순위 관계도에서 각 분기를 워크스테이션으로 지정하고 작업자 배치만으로 라인 밸런싱을 수행했기 때문에 결과가 좋지 않았다.

결론적으로 여러 선행 연구에서 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 정의하고, 이를 해결하고자 했으나 작업자의 작업 숙련도를 고려한 작업자 배치만으로 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하기에는 한계가 있다. 따라서 워크스테이션마다 작업자를 배치하기 전에 작업 순서와 각 작업의 기준 허용 시간을 고려한 작업 배분을 통해 라인

밸런싱이 수행되어야 한다. 그리고 작업 배분을 수행할 때에는 기준 허용 시간이 긴 작업에 대응하기 위해 단일 작업-복수 작업자 할당 방식이 고려되어야 하고 기준 허용 시간이 짧은 작업에 대응하기 위해 다중 작업-단수 작업자 할당 방식이 고려되어야 한다.

한편, 작업 배분 과정에서 의류 봉제 라인 밸런싱을 수행한 연구도 있다. Bongomin et al.(2020a)는 카고 바지를 제조하는 의류 봉제 라인의 밸런싱을 위해 작업의 기준 허용 시간을 고려하여 작업을 그룹화하는 순위 위치 가중치 휴리스틱 방법(ranked positional weight heuristic method)을 적용하였다. 워크스테이션의 자원 제약을 고려할 때와 고려하지 않을 때의 두 가지 시나리오를 제시하고 라인 밸런싱의 효율성을 측정하였다. 각 워크스테이션의 자원 제약을 고려하지 않을 때 순위 위치 가중치 휴리스틱 방법이 더 높은 효율성으로 균형 잡힌 의류 봉제 라인을 생성했으나 자원 제약이 있는 경우에는 라인 밸런싱 효과가 좋지 않았다. 순위 위치 가중치 휴리스틱 방법은 작업 그룹화를 수행 과정에서 위치 가중치를 우선순위로 작업을 그룹화하기 때문에 연관성이 적은 작업이 묶이는 경우가 빈번하게 발생하여 작업 흐름이 굉장히 복잡해지는 단점이 있다. 의류 봉제 라인의 설계 과정에서 모듈화 개념을 적용하면 공정 흐름이 복잡해지는 단점을 상쇄할 수 있다.

의류 봉제 라인에 모듈화 개념의 적용을 시도하는 연구도 수행되었다.

Lin(2008)은 Chan et al.(1998)이 제시한 문제에 모듈화 개념을 적용하였다. 작업 우선순위 관계도에서 각 분기를 모듈로 지정했으나, 이는 유전 알고리즘의 해를 빨리 찾기 위함이며 의류 봉제 라인 밸런싱의 개선을 고려하지는 않았다.

Kim and Kim(2020)은 최적의 생산라인을 설계하기 위한 모듈 기반의 의류 생산라인 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 직물 원단의 절단, 전처리, 봉제, 마무리가 포함된 생산라인의 설계가 가능할 뿐만 아니라 설계된 생산라인을 바탕으로 생산 시뮬레이션 수행이 가능하다. 그러나 생산라인의 설계가 모듈 수준에서 구현되었으며, 워크스테이

선별 작업 배분이나 작업자 배치는 고려되지 않았다.

Jung et al.(2021) 역시 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 모듈화 개념이 적용된 의류 봉제 라인을 가지고 실험을 진행하였다. 그러나 모듈화 개념을 적용하여 미리 작성된 라인 레이아웃을 바탕으로 의류 봉제 라인을 수작업으로 구현하였다.

따라서 의류 봉제 라인의 설계 단계에서 모듈화 개념을 적용하고 작업 배분을 통한 라인 밸런싱과 작업자 배치를 통한 라인 밸런싱을 단계적으로 수행하는 알고리즘을 구현하고 단계별 라인 밸런싱 효과를 확인한 연구는 아직 시도된 적이 없다.

한편, 라인 레이아웃의 계획을 통한 의류 봉제 라인의 설계 단계에서의 라인 밸런싱뿐만 아니라 의류 봉제 라인의 운영 단계에서도 라인 밸런싱을 수행할 수 있다. 의류 봉제 라인의 설계 단계에서 라인 밸런싱이 수행되었더라도 실제 의류 봉제 라인에서 생산이 지속되고 사건이 발생함에 따라 병목현상이 발생할 수 있다. 따라서 사전에 계획된 라인 레이아웃을 바탕으로 가상의 의류 봉제 라인을 구현하고 생산 시뮬레이션을 통해 병목현상을 파악하고, 그 병목지점에 조치를 취함으로써 라인 밸런싱을 수행할 수 있다(Jung et al., 2021). 또한 제조 현장에서의 사례 연구를 통해 의류 봉제 라인에 린 제조(lean manufacturing), 그룹 테크놀로지(group technology), 자원 관리(resource management) 등의 새로운 운영 기법을 적용하여 라인 밸런싱을 수행할 수 있다. 이와 같은 의류 봉제 라인의 운영 단계에서의 라인 밸런싱도 작업 재배분이나 작업자 재배치를 통해 수행할 수 있다.

Cui and Yan(2015)는 유니폼용 셔츠를 생산하는 의류 봉제 라인을 개선하기 위해 그룹 테크놀로지 기법을 적용하는 방식으로 라인 밸런싱을 수행하였다. 기존의 의류 제조 공장에서 작성된 라인 레이아웃을 바탕으로 설치된 의류 봉제 라인의 문제점을 분석하였다. 그리고 분석된 문제점을 해결하기 위해 전문가가 그룹 테크놀로지 기법을 적용하여 작업을 새롭게 그룹화하거나 작업자 배치를 변경함으로써 의류 봉제 라인 밸런

싱을 수행하였다.

Kumar et al.(2019)는 여아 티셔츠를 생산하는 의류 봉제 라인을 개선하기 위해 가치 흐름 매핑(value stream mapping)과 같은 린 도구(lean tool)를 적용하는 방식으로 라인 밸런싱을 수행하였다. 전문가의 현재 상태 지도(current state map) 분석을 통해 문제점을 해결하기 위한 개선 사항이 도출되고, 도출된 개선 사항을 미래 상태 지도(future state map)에 매핑하는 방식으로 의류 봉제 라인 밸런싱을 수행하였다.

Fatima and Tufail(2021)은 카고 반바지를 생산하는 의류 봉제 라인을 개선하기 위해 자원관리 방법론을 적용하는 방식으로 라인 밸런싱을 수행하였다. 전문가가 카고 반바지를 생산하는 기존 의류 봉제 라인의 문제점을 분석하고 자원관리 방법론을 적용하여 특정 공정의 작업 방식을 향상시킴으로써 의류 봉제 라인 밸런싱을 수행하였다.

그러나 그룹 테크놀로지, 린 제조, 자원관리 방법론과 같이 새로운 운영 기법을 의류 봉제 라인 밸런싱에 적용하는 방식은 기존 의류 봉제 라인의 문제점을 분석하고 새로운 해결책을 찾는 과정에서 전문가에게 대한 의존도가 높기 때문에 지속적으로 의류 제조 공장에 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

제 2 절 디지털 트윈을 위한 봉제 라인 시뮬레이터

1. 디지털 트윈의 이해

물리적 제품의 모든 정보를 포함하는 가상의 표현물(representation)이라는 디지털 트윈의 개념은 2003년 미시간대학교 제품 생명 주기(life cycle) 관리 과정에서 버추얼리 퍼펙트(virtually perfect)라는 용어로 처음 소개되었다(Grieves, 2014; Grieves and Vickers, 2017). 그리고 2012년 나사(National Aeronautics and Space Administration)에 의해 “디지털 트윈이란 최적의 물리적 모델, 센서 업데이트, 비행 이력 등을 활용하여 해당 플라잉 트윈의 수명을 반영하는 시스템의 통합된 다중물리학, 다중스케일, 확률론적 시뮬레이션이다.”로 정의되었으며(Glaessgen and Stargel, 2012), 디지털 트윈의 개념이 우주선의 생산 및 운영을 위한 나사 기술 로드맵에 반영되었다. 그리고 디지털 트윈 모델은 현실공간의 물리적 제품, 가상공간의 가상 제품, 그리고 가상과 현실 제품 사이의 데이터와 정보를 통한 연결의 세 가지 부분으로 구성된다(Grieves, 2014).

제조 산업에서는 4차 산업혁명을 위한 스마트 공장 구현의 핵심 기술로 디지털 트윈 개념을 받아들여, 실제 공장의 디지털 트윈으로 가상의 공장을 구현하는 것이 목표이다. 이를 위해서 실제 공장에서 제조 공정에 활용되는 물리적 자산을 가상 자산으로 구현한다. 그리고 물리적 자산에서 얻은 데이터를 활용하여 물리적 자산의 미러링이 가능하도록 그에 대응하는 가상 자산과 연결한다. 연결된 가상 자산을 통한 물리적 자산의 감시뿐만 아니라 시뮬레이션을 통해 획득한 정보를 다시 물리적 자산 최적화에 반영한다. 이와 같이 가상 자산을 활용한 물리적 자산의 감시와 시뮬레이션의 반복적인 작업을 통해 실제 공장을 최적으로 운영하는 것이 디지털 트윈의 목적이다.

2. 의류 봉제 라인의 디지털 트윈

의류 제조 산업에서의 의류 생산 과정은 Fig. 3과 같은 제조 공정을 따른다.

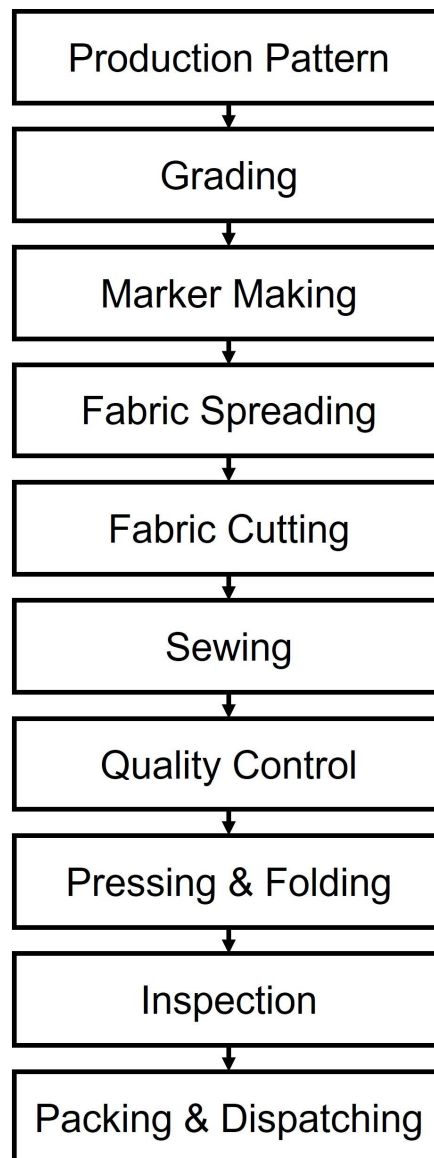


Fig. 3. Apparel manufacturing process

따라서 의류 제조 산업에서 실제 공장의 완전한 디지털 트윈을 구현하기 위해서는 모든 제조 공정을 포함하는 가상의 공장을 구현하여야 한다. 그러나 의류 제조 산업에서의 스마트 공장에 관한 연구는 아직 초기 단계이기 때문에 의류 공장의 완전한 디지털 트윈을 곧바로 구현하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 의류 공장의 핵심 영역이라 할 수 있는 의류 봉제 라인으로 연구 범위를 한정하였다.

의류 봉제 라인의 디지털 트윈은 Fig. 4와 같이 실제 의류 봉제 라인, 가상의 의류 봉제 라인, 그리고 실제 의류 봉제 라인과 가상의 의류 봉제 라인 사이의 데이터와 정보를 통한 연결로 구성된다. 따라서 의류 봉제 라인의 디지털 트윈을 구현하기 위해서는 이러한 구성 요소를 모두 구현하여야 한다.

실제 의류 봉제 라인과 가상의 의류 봉제 라인 사이의 연결 부분은 크게 미러링 파트와 최적화 파트로 구분할 수 있다. 먼저, 미러링 파트를 구현하기 위해서는 실제 의류 봉제 라인을 구성하는 기계, 작업자, 작업물 등에 센서를 부착한다. 그리고 센서에서 얻은 데이터를 클라우드 컴퓨팅과 같은 기술로 수집한다. 수집한 데이터를 기계 학습 등의 기술로 분석하여 의류 봉제 라인을 감시하기 위한 데이터를 추출한다. 그리고 추출한 데이터를 활용하여 실제 의류 봉제 라인을 가상의 의류 봉제 라인으로 미러링한다.

Lee et al.(2013, 2014)은 의류 제조 산업에서 자원 할당 및 품질보증(quality assurance)를 위해 RFID(radio frequency identification) 기술 기반의 시스템을 제안하였다. 작업물에 RFID 태그를 부착하고 태그 신호를 감지하는 RFID 판독기를 기계마다 부착하였다. 이를 통해 작업물의 이동을 파악함으로써 의류 봉제 라인의 작업 진행 상황 및 병목지점을 확인하였다. 그리고 의류 봉제 라인 끝에 설치된 품질 검사(quality inspection) 구역에서 RFID 판독기와 함께 품질 데이터를 입력하고, 이를 무선 네트워크로 수집하는 시스템을 구현하였다.

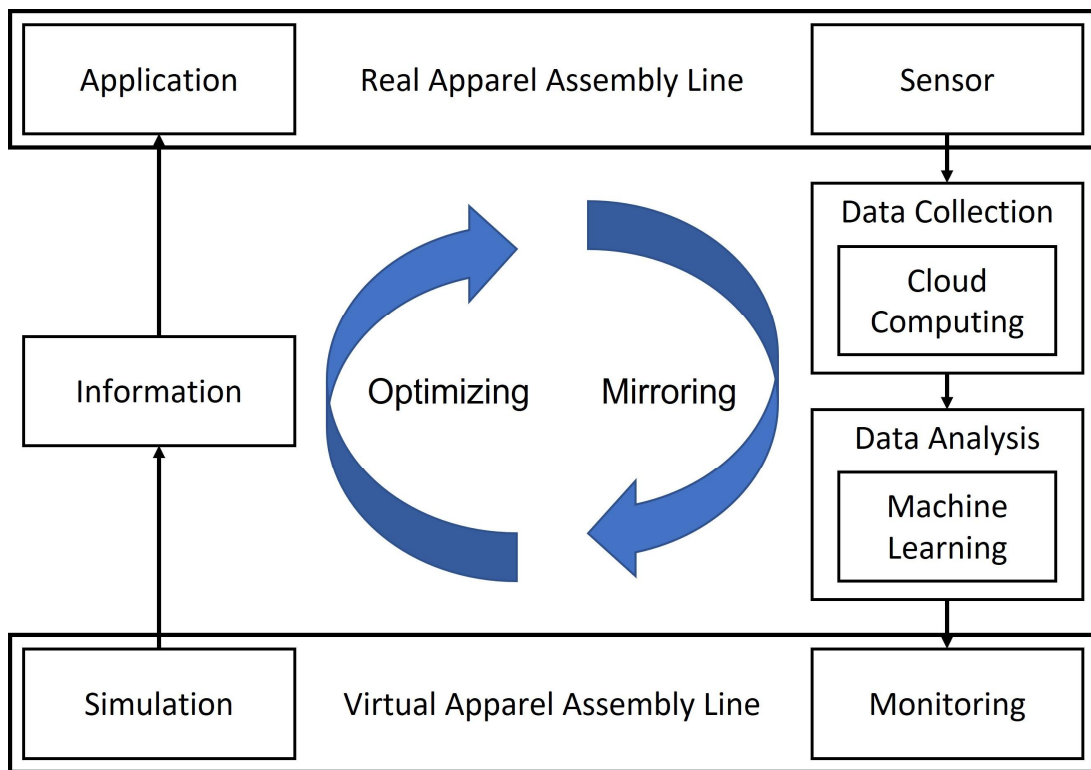


Fig. 4. Schematic diagram for a digital twin of apparel assembly line

Jung et al.(2020)은 의류 봉제 라인에 속한 작업자의 업무 성과를 측정하기 위해 사물인터넷 기반의 전력 감시 시스템을 제안하였다. 이를 위해 기계마다 전력 감시 장비를 설치하여 전력 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 와이파이(wi-fi) 통신을 통해 서버로 전송하는 시스템을 구현하였다. 그리고 수집된 전력 데이터를 근사 알고리즘 분석을 통해 작업자의 작업 시간, 작업량, 병목지점을 확인하였다.

Kim and Kim(2021)은 단위 작업의 주기 시간을 측정하기 위한 스마트 인솔을 개발하였다. 개발된 스마트 인솔은 봉제 작업 과정에서 나타나는 작업자 발바닥의 압력분포를 측정하기 위한 압력 센서와 무선 통신 모듈로 구성되며, 수집된 압력분포 데이터를 분석함으로써 단위 작업의 주기 시간을 계산하였다.

다음으로, 최적화 파트를 구현하기 위해서는 시뮬레이션이 가능한 가상의 의류 봉제 라인을 구현하여야 한다. 그리고 실제 의류 봉제 라인에서 얻은 데이터를 활용한 가상의 의류 봉제 라인에서의 시뮬레이션을 통해 실제 의류 봉제 라인의 최적화를 위한 밸런싱 관련 정보를 얻을 수 있다. 시뮬레이션을 통해 얻은 정보를 실제 의류 봉제 라인에 적용함으로써 실제 의류 봉제 라인의 최적화를 수행할 수 있다. 결국, 가상의 의류 봉제 라인을 활용한 실제 의류 봉제 라인의 감시와 시뮬레이션의 반복적인 작업을 통해 실제 의류 봉제 라인을 최적으로 관리하는 것이 의류 봉제 라인 디지털 트윈의 목적이다.

3. 상용 시물레이션 소프트웨어

계획 및 일정에 따라 의류를 지속적으로 생산하는 실제 공장에서 실험을 수행하는 것은 사실상 많은 제약이 따르기 때문에 시물레이션 기술은 의류 생산에서도 다양한 문제를 해결하기 위해 많이 활용되었다. 특히, 직물 원단의 연단 및 절단의 일정 최적화 연구(Wong et al., 2005; Kwong et al., 2006; M'hallah and Bouziri, 2016), 주문 추적 및 할당에 관한 연구(Guo et al., 2014), 의류 봉제 라인 밸런싱에 관한 연구(Zeng et al., 2012; Jung et al., 2021)에서 시물레이션 기술이 활용되었다.

의류 봉제 라인과 같은 제조 영역을 시물레이션할 수 있는 다양한 상용 시물레이션 소프트웨어가 있으며, 대표적으로 로크웰 오토메이션(Rockwell Automation)이 개발한 아레나(Arena), 플렉심 소프트웨어 프로덕츠(FlexSim Software Products)가 개발한 플렉심(FlexSim), 더 애니로직 컴퍼니(The AnyLogic Company)가 개발한 애니로직(AnyLogic) 등이 있다. 이와 같은 상용 시물레이션 소프트웨어는 이산 사건 시물레이션(discrete event simulation)을 기반으로 제조뿐만 아니라 물류, 유통, 운송 등의 다양한 산업 분야에서 활용할 수 있는 범용 시물레이션 소프트웨어이다. 그리고 플렉심과 같은 몇몇 상용 시물레이션 소프트웨어는 사이버-물리 시스템으로 활용이 가능하도록 개발되는 추세이다.

제조는 투입된 작업물에 공정 순서를 따라 차례로 개별 작업을 수행하는 과정이라 할 수 있다. 여기서 개별 작업을 이산 사건으로 볼 수 있으며, 개별 작업의 수행은 작업의 시작과 끝 사이에 시간 지연으로 구현할 수 있다. 따라서 제조는 공정 순서에 따라 개별적인 이산 사건 발생 유무에 따른 시물레이션으로 구현할 수 있다. 그러나 상용 시물레이션 소프트웨어는 제조뿐만 아니라 다양한 산업 분야에서 활용할 수 있도록 범용성을 갖는 것이 특징이며, 특히 범용성을 위한 도구로 모델링 객체(modeling object)를 제공한다. 모델링 객체는 시물레이션을 수행하려는

시스템을 모델링할 때 사용할 수 있는 준비된 가상의 구성 요소로 기계, 작업자, 작업물의 흐름 등이 포함된다.

상용 시뮬레이션 소프트웨어마다 차이가 있을 수 있으나 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 가상의 의류 봉제 라인을 구현하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 구현하고자 하는 의류 봉제 라인의 사전 계획된 라인 레이아웃이 필요하다. 그리고 사전 계획된 라인 레이아웃을 참고하여 가상의 의류 봉제 라인을 상용 시뮬레이션 소프트웨어상에 직접 모델링해야 한다. 가상의 의류 봉제 라인 모델링은 워크스테이션, 기계, 작업자, 작업물의 흐름 등의 모델링 객체를 이용하여 구현할 수 있다.

Bongomin et al.(2020b)는 확률적 작업 시간과 재단물의 묶음 처리를 고려한 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 제안했으며, 라인 밸런싱을 위해 일정한 수의 워크스테이션을 유지하면서 주기 시간 최소화를 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 가상의 의류 봉제 라인은 의류 제조 공장에서 얻은 라인 레이아웃을 기반으로 아레나 소프트웨어를 사용하여 수동으로 모델링되었다.

Jung et al.(2021)도 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘을 통한 작업자 재배치를 시뮬레이션하였다. 이 연구에서도 시뮬레이션을 위한 가상의 의류 봉제 라인을 구현하기 위해 의류 제조 공장에서 얻은 라인 레이아웃을 가지고 애니로직 소프트웨어를 사용하여 수동으로 모델링이 수행되었다.

단일 의류 봉제 라인의 워크스테이션은 생산하는 의류 스타일에 따라 다양하게 구성할 수 있지만 많게는 수십 개로 구성될 수 있다. 그리고 워크스테이션마다 기계를 설치하고 작업자를 배치해야 한다. 또한, 의류를 완성하기 위한 공정 역시 수십에서 수백 개의 단위 작업으로 세분화되며, 세분화된 작업 역시 워크스테이션마다 배분하여야 한다. 그리고 작업물의 흐름을 표현하기 위한 워크스테이션 사이의 연결도 필요하다. 기존의 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 의류 봉제 라인을 구현하기 위해서는 이와 같은 모든 과정을 수동으로 모델링하여야 하는데 대량

생산 기반의 의류 제조 공장은 수십 개의 의류 봉제 라인을 가지고 있다. 또한, 라인 밸런싱 문제는 의류 봉제 라인의 구성 단계뿐만 아니라 의류 봉제 라인의 재설계 또는 조정 단계에서도 지속적으로 발생한다 (Bongomin et al., 2020a). 이는 의류 봉제 라인의 관리를 위해서는 의류 봉제 라인이 지속적으로 변경되어야 함을 의미한다. 따라서 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 가상의 의류 봉제 라인을 모델링하고 지속적으로 관리하기는 매우 손이 많이 가는 작업이다.

제 3 장 연구방법

본 연구에서는 의류 봉제 라인의 디지털 트윈 중 최적화 파트에 활용될 수 있도록 가상의 의류 봉제 라인을 구현하고, 구현된 의류 봉제 라인을 이용하여 시뮬레이션을 수행할 수 있는 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 라인 밸런싱이 수행된 가상의 의류 봉제 라인을 별도의 모델링 과정 없이 자동으로 생성할 뿐만 아니라 가상의 의류 봉제 라인 수정이 용이하도록 의류 봉제 라인 전용 시뮬레이션 소프트웨어로 개발되었다. 그리고 자동으로 생성되는 의류 봉제 라인의 밸런싱을 위해 단일 작업-복수 작업자 할당 방식과 다중 작업-단수 작업자 할당 방식을 동시에 고려하는 작업 배분과 작업자의 작업 숙련도를 고려한 작업자 배치를 단계적으로 수행하는 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법을 제시하였다.

제 1 절 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법

본 연구에서 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 제시한 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법은 Fig. 5와 같은 단계적 절차를 따른다.

먼저, 생산할 옷이 결정되면 옷을 제조하기 위한 여러 작업으로 공정을 세분화한다. 그리고 세분화한 작업마다 적합한 기계를 선정하고 작업마다 기준 허용 시간을 측정하여 공정 분석 데이터를 생산한다. 다음으로, 세분화한 작업과 작업 순서를 고려하여 휴리스틱으로 모든 작업을 모듈로 분류한다. 다음으로, 의류 제조 공장의 리소스(resource) 현황과 납기 일정, 생산 계획 등을 종합적으로 고려하여 의류 봉제 라인의 작업자 수와 생산량을 결정한다. 워크스테이션은 한 명의 작업자가 작업하는 공간이기 때문에 의류 봉제 라인의 작업자 수와 워크스테이션 수는 동일하며, 작업자 수가 결정되면 모듈별 작업 비율을 계산하여 모듈별 워크스테이션 수를 산정한다. 다음으로, 워크스테이션에 작업을 배분하기 위한 작업 그룹화를 모듈별로 수행한다. 이를 위해 도요타 봉제 시스템(Chen et al., 2021) 개념이 차용되었다. 도요타 봉제 시스템은 라인 밸런싱을 위해 작업 흐름에 따라 단수 작업자가 다중 작업을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 특정 작업을 복수 작업자가 수행할 수 있도록 설계된 시스템이다. 차용된 도요타 봉제 시스템 개념을 바탕으로 혼합 작업 할당 방식의 모듈별 작업 그룹화 알고리즘을 구현하였다. 이 작업 그룹화 알고리즘을 통해 작업 배분을 통한 라인 밸런싱이 먼저 수행하였다. 끝으로, 작업자의 작업 숙련도를 고려하여 워크스테이션마다 작업자 배치를 수행하여, 작업자 배치를 통한 라인 밸런싱을 추가적으로 수행하였다.

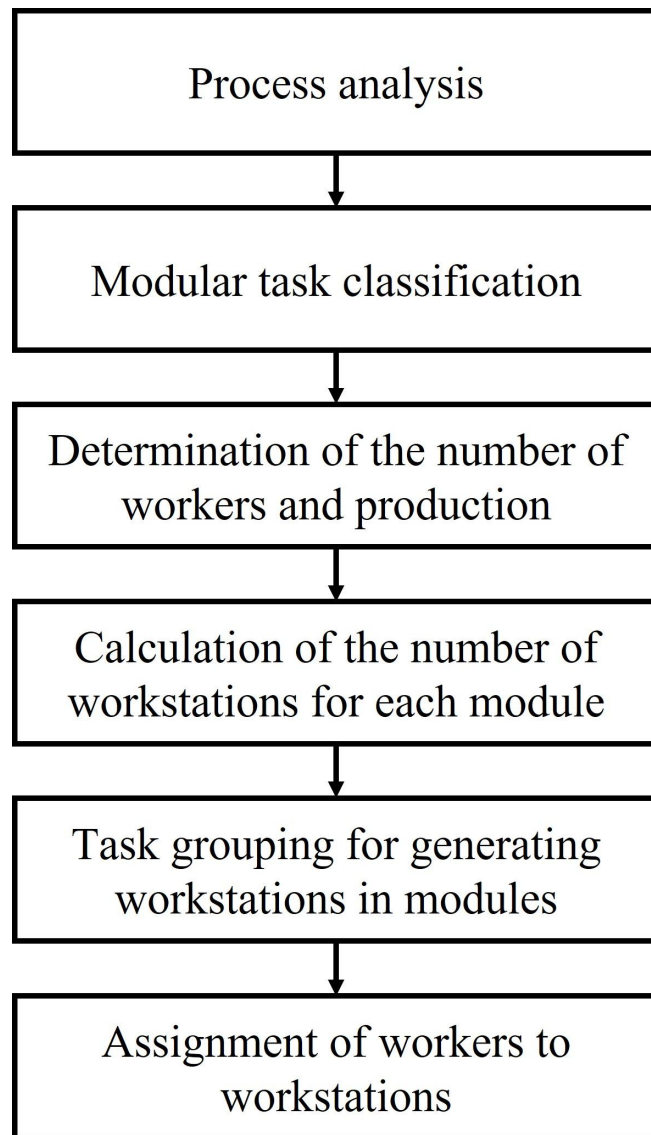


Fig. 5. Module-based mixed task assignment process

1. 공정 분석

본 연구에서는 의류 봉제 라인 밸런싱 문제에 이미 여러 연구에서 활용된 적 있는 Chan et al.(1998)의 데이터를 사용하여 실험을 진행하였다. 이는 남자 셔츠의 제조를 위한 데이터로 41개의 작업과 작업의 우선순위 관계도, 그리고 41개의 작업에 대한 41명의 작업자 숙련도를 나타내는 표(부록의 Table A1)로 구성된다. 남자 셔츠 제조 공정에 관한 구체적인 내용은 Table 1과 같다. 작업의 기준 허용 시간은 각 작업을 100번 연속으로 수행하는 데 걸리는 시간으로 측정되었기 때문에 작업의 기준 허용 시간에는 작업의 수행 시간과 여유시간이 포함되어 있으며, 각 작업을 1번 수행하는 데 걸리는 시간은 평균값을 사용하였다. 그리고 41개의 작업은 Fig. 6와 같은 선후 관계를 가지며, 작업의 선후 관계를 바탕으로 작업 순서가 고려되었다. 끝으로, 사용된 기계에 관한 정보는 별도로 제시되지 않았기 때문에 의류 봉제 라인 밸런싱에 기계는 고려되지 않았다.

Table 1. Tasks and SAM of men's shirt (Chan et al., 1998)

Task No.	Task name	SAM* (min)
1	Spot fuse collar fall	41
2	Top fuse collar fall	30
3	Sew collar stay pocket	25
4	Runstitch collar fall	48
5	Trim, turn and press collar fall	30
6	Topstitch collar fall	65
7	Hem collar band	28
8	Attach collar band	46
9	Turn and press collar band	57
10	Topstitch collar band	56
11	Sew collar band buttonhole	32
12	Sew collar band button	41
13	Set centre front placket	37
14	Hem right front edge	19
15	Trim neckline	28
16	Sew centre front buttonhole	30
17	Sew right front button	29
18	Hem pocket mouth	47
19	Crease pocket	66
20	Set pocket	54
21	Sew yoke pleats	33
22	Set yoke label	20
23	Set yoke	34
24	Join shoulder	55
25	Set sleeve under placket	47
26	Set sleeve top placket	67
27	Finish sleeve placket	44
28	Sew sleeve placket buttonhole	36
29	Sew sleeve placket button	65
30	Set sleeve	58
31	Topstitch armhole	64
32	Join side seam	23
33	Hem bottom	32
34	Hem cuff	28
35	Runstitch cuff	57
36	Turn and press cuff	49
37	Topstitch cuff	50
38	Sew cuff buttonhole	55
39	Sew cuff button	32
40	Set cuff	43
41	Set and close collar	48

* SAM: Standard allowable minutes: time required to perform each task 100 times.

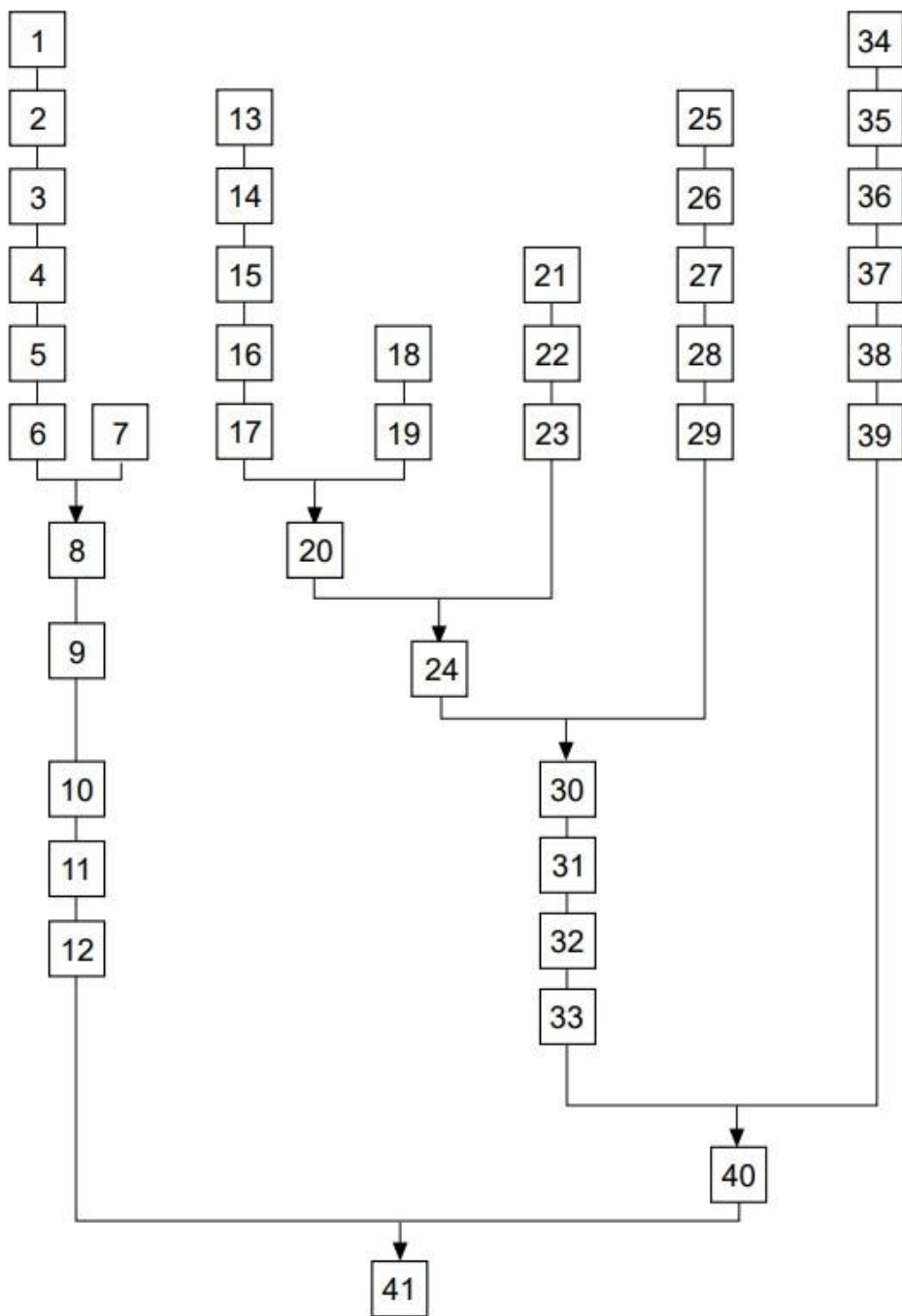


Fig. 6. Task precedence relationship (Chan et al., 1998)

2. 모듈 분류

전체 작업과 작업 선후 관계도를 고려하여 Fig. 7과 같이 모든 작업을 모듈로 분류하였다. 작업 #1-12는 셔츠의 칼라를 만드는 공정으로 Collar 모듈로 분류하였다. 작업 #13-20은 셔츠의 앞판을 만드는 공정이며, 작업 #21-23은 셔츠의 뒤판을 만드는 공정이다. 뒤판을 만드는 공정이 비교적 간단하기 때문에 작업 #13-23를 Torso 모듈로 분류하였다. 작업 #25-29는 셔츠의 소매를 만드는 공정으로 Sleeve 모듈로 분류하였으며, 작업 #34-39는 셔츠의 커프스를 만드는 공정으로 Cuff 모듈로 분류하였다. 끝으로, 작업 #24, 30-33, 40, 41은 각 모듈에서 완성된 부속들을 결합하여 옷을 완성하는 공정으로 Join 모듈로 분류하였다.

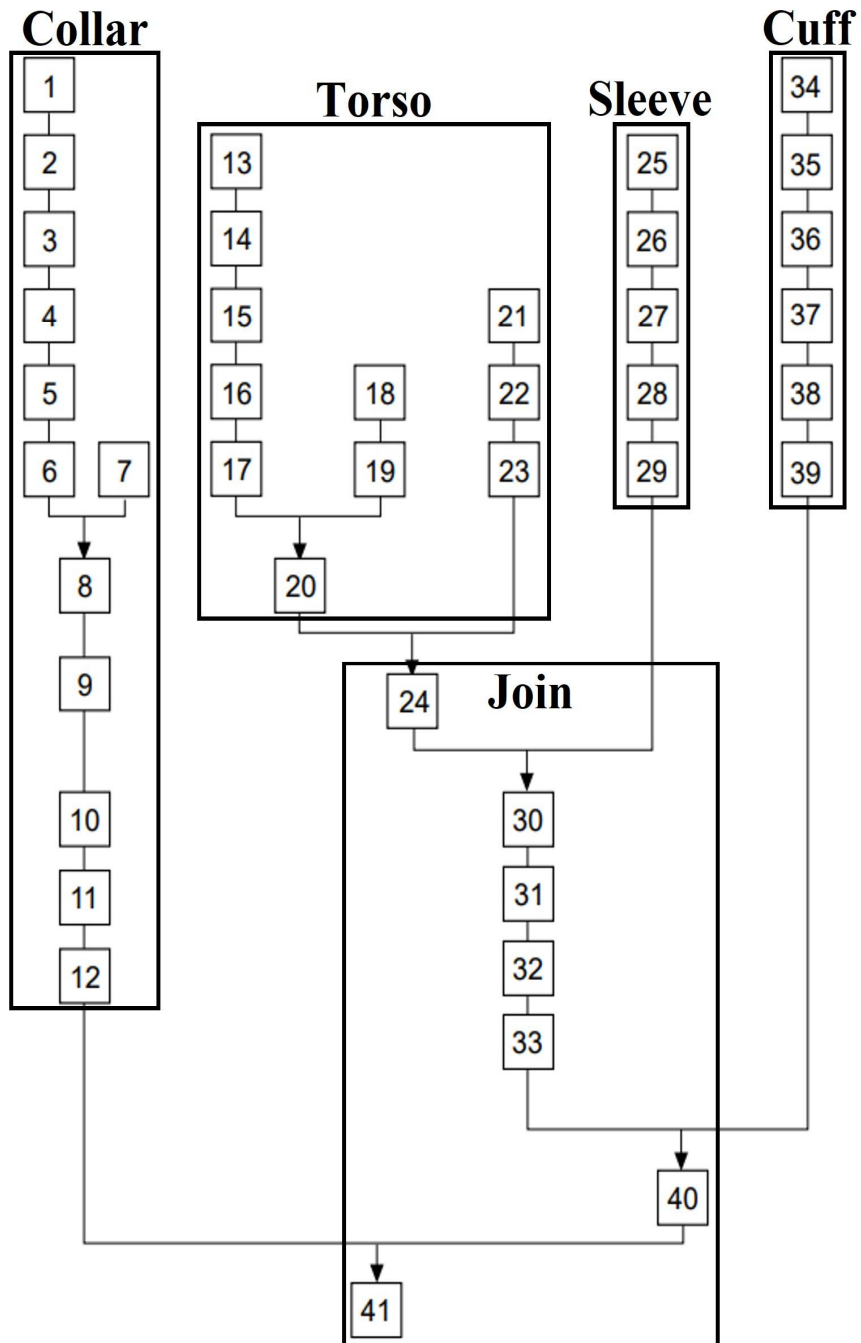


Fig. 7. Module classification

3. 작업자 수와 생산량 설정

단일 의류 봉제 라인의 작업자 수와 생산량은 의류 제조 공장의 리소스 현황과 납기 일정, 생산 계획 등을 종합적으로 고려하여 설정된다. 그러나 본 연구에서는 선행 연구와의 결과 비교를 위해 선행 연구와 동일한 작업자 수와 생산량을 설정하였다. Chan et al.(1998)은 단일 작업마다 단수 작업자를 배치하는 단일 작업-단수 작업자 배치 방식으로 라인 밸런싱을 수행했기 때문에 작업자 수를 41명으로 설정하였다(Table 1, Fig. 6 참고). Chen et al.(2021)은 Fig. 8과 같은 Lin(2008)의 모듈 개념을 워크스테이션으로 받아들여 워크스테이션마다 작업을 그룹화하여 작업자를 배치하는 방식으로 작업자 수를 13명으로 설정하였다. 본 연구에서는 단일 작업마다 한 명의 작업자를 배치하는 방식은 고려하지 않고 여러 작업을 그룹화하여 한 명의 작업자에게 배분하는 방식을 우선적으로 고려했기 때문에 기본 작업자 수를 13명으로 설정하였다. 두 선행 연구 모두 생산량을 100벌로 설정했기 때문에 본 연구에서도 생산량을 100벌로 설정하였다.

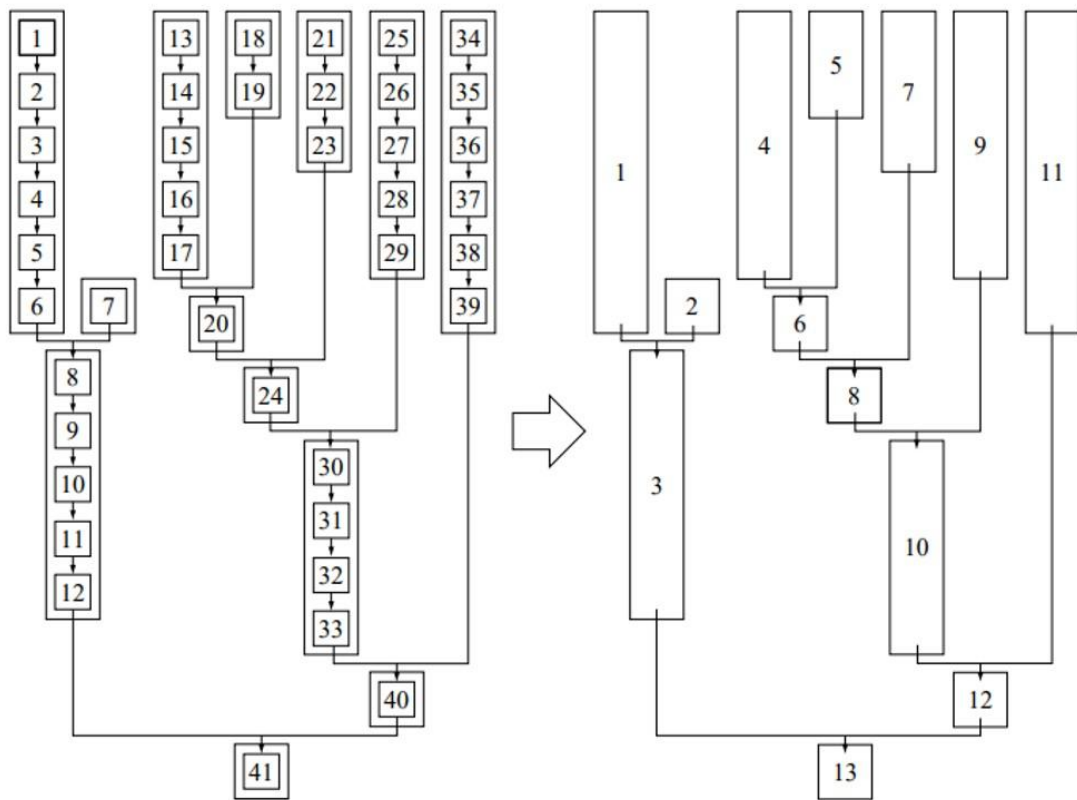


Fig. 8. Modular schematic diagram (Lin, 2008)

4. 모듈별 워크스테이션 수 산정

하나의 워크스테이션에서 한 명의 작업자가 작업을 수행하기 때문에 작업자 수와 워크스테이션 수는 동일하다. 모듈별 워크스테이션 수는 총 기준 허용 시간 대비 모듈의 기준 허용 시간의 비율을 이용하여 구하며, 각 모듈에 필요한 워크스테이션 수를 구하는 과정은 다음과 같다.

먼저, 식(1)과 같이 모듈에 속하는 모든 작업의 기준 허용 시간(S_{t_j})을 합하여 모듈별 기준 허용 시간(T_{M_i})을 구한다.

$$T_{M_i} = \sum S_{t_j} (t_j \in M_i) \quad (1)$$

다음으로, 식(2)와 같이 모든 모듈의 모듈별 기준 허용 시간을 합하여 총 기준 허용 시간(T_{tot})을 구한다.

$$T_{tot} = \sum T_{M_i} \quad (2)$$

끝으로, 식(3)과 같이 모듈별 기준 허용 시간을 총 기준 허용 시간을 나눈 값에 총 워크스테이션 수(N_0)를 곱하여 모듈별 워크스테이션 수(N_{M_i})를 산정한다.

$$N_{M_i} = \frac{T_{M_i}}{T_{tot}} \times N_0 \quad (3)$$

이때 모듈별 워크스테이션 수는 정수이어야 한다. 따라서 N_{M_i} 값을 반올림하였다. 그러나 반올림의 오차로 인해 모듈별 워크스테이션 수의

합이 총 워크스테이션 수와 틀릴 수 있다. 이 경우에는 모듈별 라인 밸런싱을 위해 식(4)와 같이 모듈별 기준 작업 시간의 편차가 최소가 되도록 모듈별 워크스테이션 수를 조정하였다.

$$\{N_{M_i}\} = \min\left(\sum (S_{tot} - S_{M_i})^2\right) \quad (4)$$

모듈별 기준 작업 시간(S_{M_i})은 식(5)와 같이 모듈별 기준 허용 시간을 모듈별 워크스테이션 수로 나눈 값으로 모듈의 작업 배분 기준 시간으로 활용된다.

$$S_{M_i} = \frac{T_{M_i}}{N_{M_i}} \quad (5)$$

그리고 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간(S_{tot})은 식(6)과 같이 총 기준 허용 시간을 총 워크스테이션 수로 나눈 값이다.

$$S_{tot} = \frac{T_{tot}}{N_0} \quad (6)$$

5. 모듈별 워크스테이션 생성

산정된 모듈별 워크스테이션 수만큼 워크스테이션을 만들고 워크스테이션마다 작업을 할당하고 기계를 설치해야 한다. 그러나 사용한 데이터에는 기계에 관한 정보가 표시되지 않았기 때문에 워크스테이션 생성할 때 기계는 고려하지 않았다. 모듈 내 작업 배분을 위한 작업 그룹화는 Fig. 9와 같이 도요타 봉제 시스템 개념을 적용하였다. 그리고 도요타 봉제 시스템과 함께 의류 봉제 라인 밸런싱을 위해 다중 작업-단수 작업자 할당 방식뿐만 아니라 단일 작업-복수 작업자 할당 방식도 고려하였다.

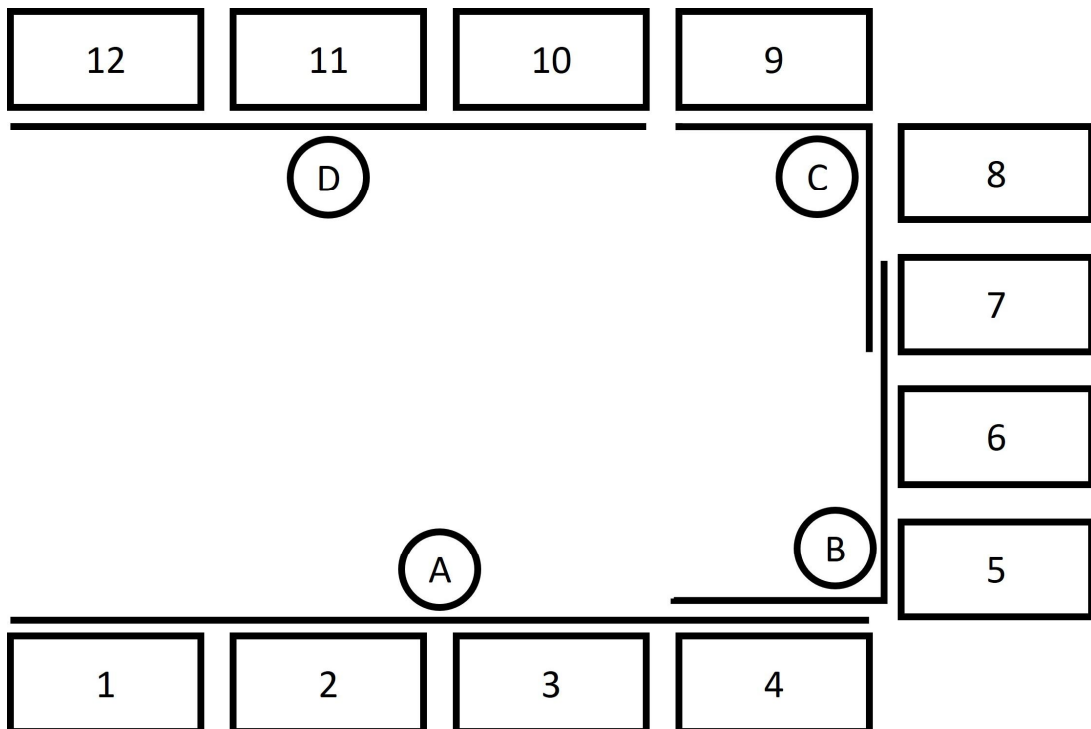
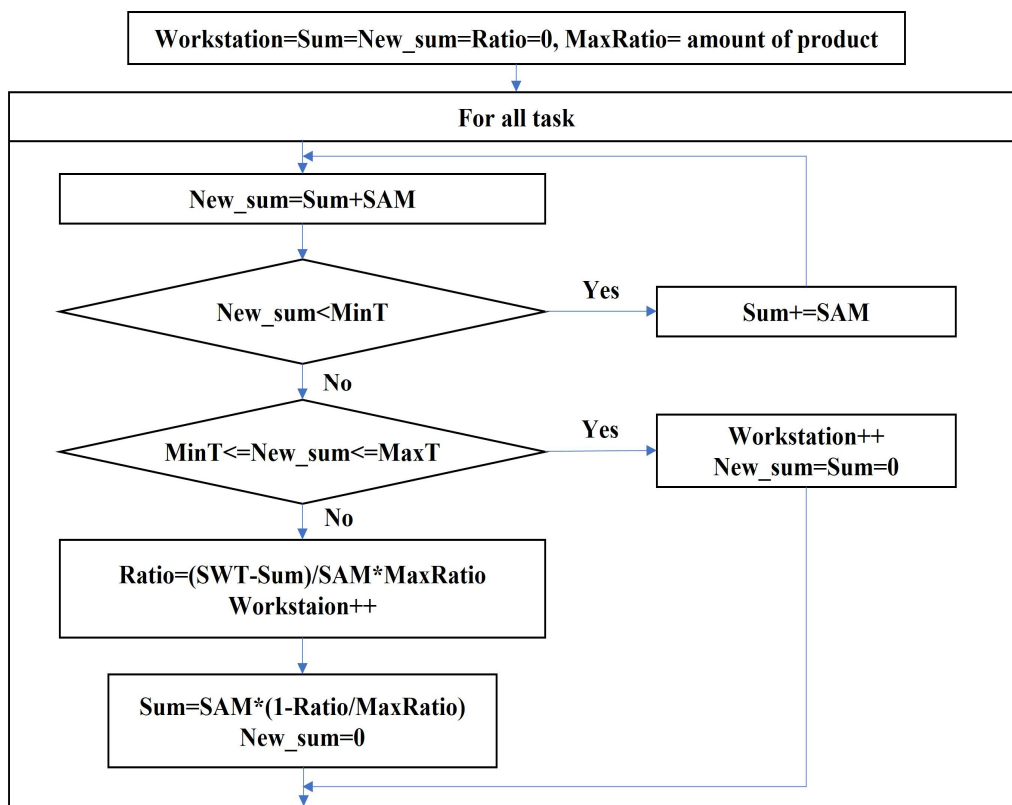


Fig. 9. Schematic diagram for Toyota sewing system
(A, B, C, D: worker, 1, 2, 3, ..., 12: task)

Fig. 9의 개념도에서 숫자는 작업을 의미하며 알파벳은 작업자를 의미한다. 예를 들어, 작업 #1-4를 묶어 첫째 워크스테이션에 배분하고, 그 워크스테이션에 작업자 A를 배치한다. 마찬가지로 작업 #4-7을 묶어 둘째 워크스테이션에 배분하고 작업자 B를 배치한다. 작업 #4는 라인 밸런싱을 위해 작업자 A와 B가 작업하는 공유 작업이며, 작업 흐름에 따라 작업 #4를 작업자 A가 작업하기도 하고 작업자 B가 작업하기도 한다. 이와 같은 도요타 봉제 시스템 개념을 구현하기 위해 모듈 내에서 작업을 묶어 워크스테이션을 생성하는 알고리즘은 Fig. 10과 같다.

이론적으로, 할당된 작업을 모든 작업자가 수행하는 시간이 의류 봉제 라인의 작업 기준 시간의 95 ~ 105% 범위에 포함되면 병목현상이 발생하지 않는다(Cui and Yan, 2015). 따라서 모듈 내에서 작업 순서를 따라 작업의 기준 허용 시간의 합이 모듈별 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 범위에 들어올 때까지 작업을 묶어 하나의 워크스테이션으로 구성하였다. 그리고 기준 허용 시간의 합이 모듈별 기준 작업 시간의 105%를 초과하면 기준 허용 시간의 합이 모듈별 기준 작업 시간의 100%가 되도록 마지막 작업을 다음 워크스테이션과 공유하였다. 즉, 현재 워크스테이션과 다음 워크스테이션의 작업 공유 비율은 셔츠의 생산량을 기준으로 현재 워크스테이션의 기준 허용 시간이 모듈별 기준 작업 시간의 100%가 되는 작업량을 계산하여 산정하였다.

모든 워크스테이션의 기준 허용 시간이 기대 작업 시간의 100%가 되도록 작업을 그룹화하면 라인 밸런싱 측면에서 최적일 수 있다. 그러나 기준 작업 시간의 100%가 되도록 작업을 그룹화하면 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 범위에 들도록 작업을 그룹화할 때보다 더 많은 공유 작업이 발생한다. 이는 제조 현장의 복잡도를 가중시키기 때문에 생산 측면에서 더 최적이라 하기 어려우며, 워크스테이션별 기준 허용 시간의 차이는 다음의 작업자 배치로 상쇄할 수 있다.



* SAM: standard allowable minutes, SWT: standard work time, $MinT=SWT*0.95$, $MaxT=SWT*1.05$

Fig. 10. Process flow of task grouping and workstation formation

6. 작업자 배치

작업이 할당된 워크스테이션에 작업자의 작업 숙련도를 고려하여 작업자를 배치한다. 작업자의 기술 수준은 0 ~ 1.5 사이의 숫자로 표현되며, 0은 작업자가 해당 작업의 기술이 전혀 없음을 의미하고 1.5는 작업자가 해당 작업에 완전히 숙련되었음을 의미한다. 식(7)과 같이 작업 i 의 기준 허용 시간(S_i)을 작업자의 기술 수준을 나타내는 수(L_{ij})로 나누면 작업자 j 가 작업 i 를 수행할 때 걸리는 작업의 조정된 기준 허용 시간(S_{ij})을 구할 수 있다. 총 41개 작업에 대한 작업자 41명의 기술 수준은 부록의 Table A1과 같다.

$$S_{ij} = \frac{S_i}{L_{ij}} \quad (7)$$

작업의 기준 허용 시간은 작업을 수행하는 데 걸리는 시간을 측정한 일반 작업자의 평균값이라면 각 작업자의 기술 수준을 고려한 작업의 조정된 기준 허용 시간은 특정 작업자가 그 작업을 수행할 때 걸리는 시간을 측정한 것을 의미한다. 따라서 식(8)과 같이 모듈마다 생성된 워크스테이션에 배분된 작업의 기준 허용 시간을 작업마다 작업자의 기술 수준을 나타내는 수로 나눠서 모두 더하면 해당 워크스테이션의 배분된 작업을 작업자 j 가 수행할 때 걸리는 워크스테이션의 조정된 기준 허용 시간(W_{ij})을 구할 수 있다.

$$W_{ij} = \sum S_{ij} (i \in W_{ij}) \quad (8)$$

작업자 배치는 Fig. 11과 같이 라인 밸런싱 방식과 작업 시간 단축 방식의 두 가지 방법으로 수행하고, 그 결과를 비교하였다.

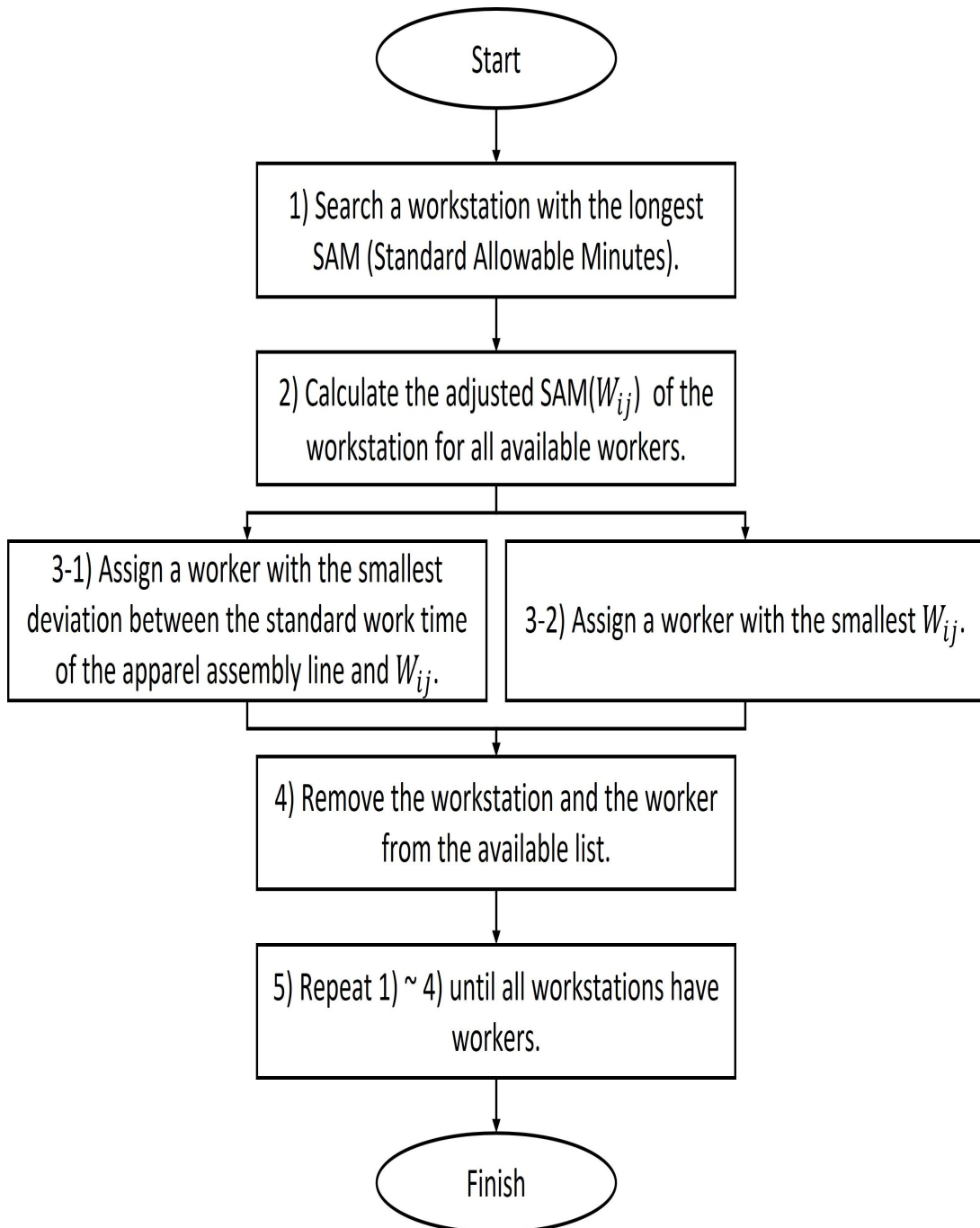


Fig. 11. Process flow of worker assignment

작업 그룹화에 따른 라인 밸런싱은 모듈 단위로 수행하기 때문에 전체 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간과 각 워크스테이션에 배분된 작업의 기준 허용 시간 사이에 편차가 발생할 수 있다. 따라서 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치는 워크스테이션마다 배분된 작업을 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간과 가장 가깝게 수행하는 작업자를 배치하는 방식으로, 이와 같은 작업자 배치를 통해 라인 밸런싱을 추가로 수행할 수 있다. 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치 방법은 Fig. 11과 같다(3-1 경로 참고). 먼저, 배분된 작업의 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션을 찾는다. 배분된 작업의 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션에서 병목 현상이 발생할 가능성이 제일 크기 때문에 우선적으로 작업자 배치를 고려하였다. 다음으로, 배분된 작업의 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션에 작업자의 기술 수준을 고려하여 해당 워크스테이션의 조정된 기준 허용 시간을 모든 가용 작업자에 대하여 계산한다. 계산한 모든 가용 작업자의 조정된 기준 허용 시간을 비교하여 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간과 가장 편차가 작은 작업자를 그 워크스테이션에 배치한다. 배치된 작업자는 가용 작업자 목록에서 제거하고, 작업자가 배치된 워크스테이션도 배치 예정 워크스테이션 목록에서 제거한다. 이와 같은 과정을 모든 워크스테이션에 작업자를 배치할 때까지 반복한다. 즉, 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치는 기준 허용 시간이 긴 워크스테이션에는 해당 작업의 숙련자를 배치하고 기준 허용 시간이 짧은 워크스테이션에는 해당 작업의 초보자를 배치하는 방식이다.

한편, 의류 생산에서 제조 시간 단축은 최우선 목표 중 하나이다. 작업 그룹화에 따른 작업 배분으로 라인 밸런싱이 한번 수행되었기 때문에 작업자 배치 단계에서는 라인 밸런싱을 고려하지 않고 가용 작업자 중에서 워크스테이션마다 작업 시간을 최대한 단축하는 작업자를 배치하는 것이 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치이다. 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치는 Fig. 11과 같다(3-2 경로 참고). 작업 시간 단축 방식도 배분된 작업의 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션부터 작업자를 배

치한다. 다음으로, 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션의 작업자 작업 숙련도를 고려한 조정된 기준 허용 시간을 모든 가용 작업자에 대하여 계산한다. 계산한 모든 가용 작업자의 조정된 기준 허용 시간을 비교하여 기준 허용 시간이 가장 짧은 작업자를 해당 워크스테이션에 배치한다. 배치된 작업자는 가용 작업자 목록에서 제거하고, 작업자가 배치된 워크스테이션도 배치 예정 워크스테이션 목록에서 제거한다. 이와 같은 과정을 모든 워크스테이션에 작업자를 배치할 때까지 반복한다. 즉, 작업 시간 단축 방식은 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션부터 가용 작업자 중 해당 워크스테이션의 가장 숙련된 작업자를 차례대로 배치하는 방식이다.

제 2 절 디지털 트윈을 위한 의류 봉제 라인 시뮬레이터

1. 의류 봉제 라인 시뮬레이터 개발

앞 절에서 소개된 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법으로 설계 단계에서 라인 밸런싱이 수행된 가상의 의류 봉제 라인을 자동으로 생성하고, 생성된 의류 봉제 라인으로 의류 생산 시뮬레이션을 수행할 수 있는 모듈 기반 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다. C++ 빌더 10.2를 사용하여 윈도우 운영체제에서 단독으로 실행할 수 있는 소프트웨어 형태로 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다.

1.1. 모듈 기반 의류 봉제 라인

기본적으로 모듈은 크게 각각의 부속을 만드는 모듈과 만들어진 부속을 모아 결감으로 결합하는 Join 모듈, 안감과 결감을 결합하는 Assembly 모듈로 구성할 수 있다. Fig. 12는 테크니컬 자켓의 생산을 위해 구성한 모듈 기반 의류 봉제 라인의 예이며, Part, Hood, Front, Back&Sleeve, Lining의 부속을 만드는 모듈과 Part, Hood, Front, Back&Sleeve 모듈에서 만들어진 결감 부속을 모아 결감을 만드는 Join 모듈, 그리고 Join 모듈에서 만들어진 결감과 Lining 모듈에서 만들어진 안감을 결합하는 Assembly 모듈로 구성된다. 한편, 블라우스처럼 안감이 없는 옷은 결감의 부속을 만드는 모듈과 결감의 부속을 모아서 옷을 완성하는 Join 모듈만으로 구성할 수 있다. 모듈의 개수에 제한이 없을 뿐만 아니라 모듈에서 완성된 부속의 다음 모듈도 설정할 수 있기 때문에 생산하려는 의류 종류에 관계 없이 다양한 형태의 모듈 기반 의류 봉제 라인을 구성할 수 있다.

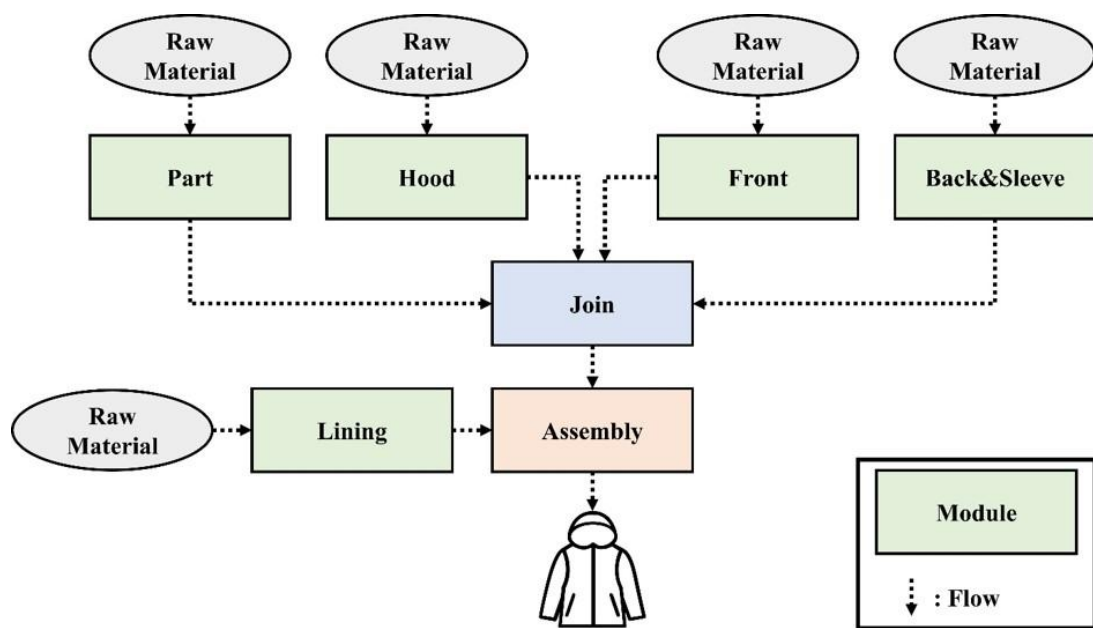


Fig. 12. Schematic diagram for modular production

1.2. 입력 데이터

입력 데이터는 크게 공정 분석 데이터와 기계, 작업자 정보 등을 담은 메타데이터(Fig. 15)로 구성된다.

Fig. 13은 개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 위한 입력 데이터의 예이다. 이는 여성 블라우스 공정 분석 데이터를 활용하여 만든 입력 데이터로 Part, Front, Back&Sleeve의 부속을 만드는 세 가지 모듈과 세 가지 모듈에서 생산된 부속을 모아서 옷을 완성하는 Join 모듈로 구성된다. 각 모듈에는 작업 순서에 따라 세분화된 작업으로 구분되어 있으며, 각 작업은 [작업 순서, 작업명, 작업에 사용하는 기계, 작업의 기준 허용 시간(단위: 초)]의 형태로 표시된다. 의류 종류에 관계 없이 Fig. 13과 같은 형태의 입력 데이터를 준비하면 의류 봉제 라인 시뮬레이터에 사용할 수 있다.

입력 데이터를 불러오고 생산량을 설정하면 혼합 작업 할당 기법으로 라인 밸런싱된 가상의 의류 봉제 라인이 자동으로 생성된다. 모듈별 작업 비중에 따라 워크스테이션 수가 결정되고, 각 워크스테이션마다 그룹화된 작업이 할당되며 작업에 사용할 기계가 설치된다. 이때 설치에 필요한 기계 대수는 충분하다고 가정하였다. 그리고 작업자 배치는 각 작업을 기준 허용 시간으로 수행하는 것을 기본으로 가정하였다.


```

[PA]
Name=W Normal Blouse
Style Number=NKA393BFBA
Module=3
  Name=Part
  Next=Join
    1,Marking collar outside lower for button&button hole,Hp,7.2
    2,Attach cx-3 to collar inside upper,S/N,26.85
    3,Attach cx-3 to collar inside lower,S/N,26.25
    5,Join collar inside upper to collar outside upper,S/Nc,35.31
    6,Turn collar upper,Hp,9
    7,Topstitch collar inside upper+collar outside upper,S/N,25.68
    8,Stitch close collar upper,S/N,15.015
    9,Join collar inside lower to collar outside lower+attach to collar upper,S/Nc,30.03
    4,Helper stitch collar inside lower,S/N,17.355
    10,Turn collar lower,Hp,9
    11,Topstitch collar inside lower+collar outside lower,S/N,22.32
    12,Marking cuffs for button&button hole,Hp,10.8
    13,Attach cx-3 to facing cuffs,S/N,34.5
    14,Join facing to cuffs,S/Nc,45.54
    15,Turn cuffs,Hp,18
    16,Topstitch facing+cuffs,S/N,33.12
  Name=Front
  Next=Join
    20,Marking front center for button&button hole&topstitch hem,Hp,25.2
    21,Join front side to front center,I/L,54.24
    22,Attach piping to front side+front center,Chain Co,43.392
    45,Stitch fold center front right,S/N,29.04
    46,Topstitch center front right,S/N,29.04
    48,Topstitch center front left,S/N,29.04
  Name=Back&Sleeve
  Next=Join
    23,Marking back center for main label&dart&topstitch hem,Hp,9
    33,Marking sleeve for cut opening sleeve vent,Hp,14
    17,Cut opening on sleeve,Hp,30
    28,Join dart on back 2 ea,S/N,12
    29,Join back side to back center,I/L,53.28
    30,Attach piping to back side+back center,Chain Co,42.624
Join=1
  Name=Join
    18,Attach piping to vent,S/N Co,15.84
    19,Stitch end on vent,S/N,12
    34,Join shoulder,I/L,14.88
    35,Attach piping to shoulder,Chain Co,11.90
    36,Topstitch shoulder,S/N,12.09
    37,Join sleeve to body,Chain,50.4
    38,Overlock sleeve+body,40/L,31.5
    39,Join side seam,I/L,81.12
    40,Attach piping to side seam,Chain Co,64.896
    41,Attach cuffs to sleeve lower,S/N,24.48
    42,Stitch close cuffs,S/N,24.48
    25,Join size label,S/N,15
    32,Attach care label to back,S/N,2.88
    26,Attach size label to main label loop,S/N,1.92
    27,Attach main label loop to back upper lining,S/N,3.84
    50,Attach collar to body,S/N,21.36
    51,Stitch close collar,S/N,21.36
    54,Topstitch hem,S/N,72.93
    47,Button hole on center front right 6 ea,N/I,90
    49,Attach button to center front left 6 ea,Button,45
    52,Attach button to collar 3 ea,Button,22.5
    53,Button hole on collar 1 ea,N/I,15
    43,Attach button to cuffs 4 ea,Button,30
    44,Button hole on cuffs 2 ea,N/I,30
    31,Attach button to care label 1 ea,Button,7.5

```

Fig. 13. Input format of process analysis data

1.3. 시뮬레이션

자동으로 생성된 가상 의류 봉제 라인에서 의류 생산을 시뮬레이션하기 위해 이산 사건 시뮬레이션 기반의 의류 봉제 라인 시뮬레이터가 개발되었다. 설정된 모듈과 작업자 수, 그리고 작업량을 반영하여 모듈별 워크스테이션의 수가 산정되고 혼합 작업 할당 기법을 따라 작업이 그룹화되어 워크스테이션마다 배분된다. 이처럼 모듈별로 생성된 워크스테이션이 작업 순서를 기반으로 배열되어 모듈 기반 의류 봉제 라인이 자동으로 모델링된다. 그리고 개별 워크스테이션에서의 작업 수행을 이산 사건으로 여겨 작업 순서에 따른 각 워크스테이션에서의 작업 수행을 워크스테이션의 기준 허용 시간 지연으로 구현함으로써 이산 사건 시뮬레이션을 구현하였다.

각 워크스테이션에서의 작업 수행은 개별적이기 때문에 워크스테이션에서 작업자가 작업을 수행하는 도중에 선행 워크스테이션에서 작업이 완료되는 경우가 발생할 수 있으며, 따라서 선행 워크스테이션에서 완료된 작업물을 보관할 공간이 필요하다. 대기하는 작업물을 워크스테이션마다 큐(queue)의 형태로 구현했으며, 구현된 큐는 작업물의 선입선출을 기반으로 운영된다. 또한, Join, Assembly 모듈과 같이 선행 모듈에서 완성된 부속이 합쳐지는 모듈의 경우, 선행 모듈로부터 모든 부속이 모여야 Join, Assembly 모듈의 첫 번째 워크스테이션에 작업물이 이동하도록 큐를 구현하였다.

개발된 모듈 기반 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 통해 자동으로 생성된 가상의 의류 봉제 라인에서 의류 생산 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 시뮬레이션 동안 각 워크스테이션의 남은 작업량과 작업 진행 상황을 감시하여 병목지점, 생산 현황 등을 파악할 수 있다. 또한, 시뮬레이션이 완료되면 설정한 생산량을 완료하는 데 걸리는 시간인 총생산시간을 확인할 수 있다.

2. 사례 연구

개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터의 자동 의류 봉제 라인 생성, 라인 밸런싱, 시뮬레이션 기능 등을 검증하기 위한 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구를 위해 글로벌 브랜드의 주문을 받아 OEM(original equipment manufacturer) 방식으로 인도네시아 공장에서 의류를 생산하는 한국 중견기업으로부터 실제 생산에 활용되는 공정 분석 데이터를 제공받았다. 제공받은 공정 분석 데이터를 활용하여 개발된 시뮬레이터에서 라인 밸런싱이 수행된 가상의 의류 봉제 라인이 자동으로 생성되는지 확인했으며, 이를 위해 생산하는 의류 스타일 변경에 따른 라인 밸런싱 결과와 작업자 수 변경에 따른 라인 밸런싱 결과를 검토하였다. 끝으로, 다양한 시나리오에 따른 생산 시뮬레이션을 통해 의류 봉제 라인 시뮬레이터의 활용 가능성을 검토하였다.

2.1. 공정 분석 데이터

사례 연구를 위해 Fig. 14와 같은 테크니컬 자켓(technical jacket)의 생산을 위한 공정 분석 데이터 5종을 의류 제조 공장으로부터 제공받았다. 선행 연구에서 데이터로 활용된 셔츠나 바지와 같은 의류에 비해 테크니컬 자켓은 제조 공정이 많고 복잡하며, 제조 공정에서 다양한 기계를 사용한다. 따라서 개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터에서 테크니컬 자켓 생산을 위한 가상의 의류 봉제 라인이 자동 생성된다면, 다른 종류의 의류 생산을 위한 가상의 의류 봉제 라인 생성 역시 가능할 것이라 판단되어 테크니컬 자켓을 사례 연구를 위한 아이템으로 선정하였다.

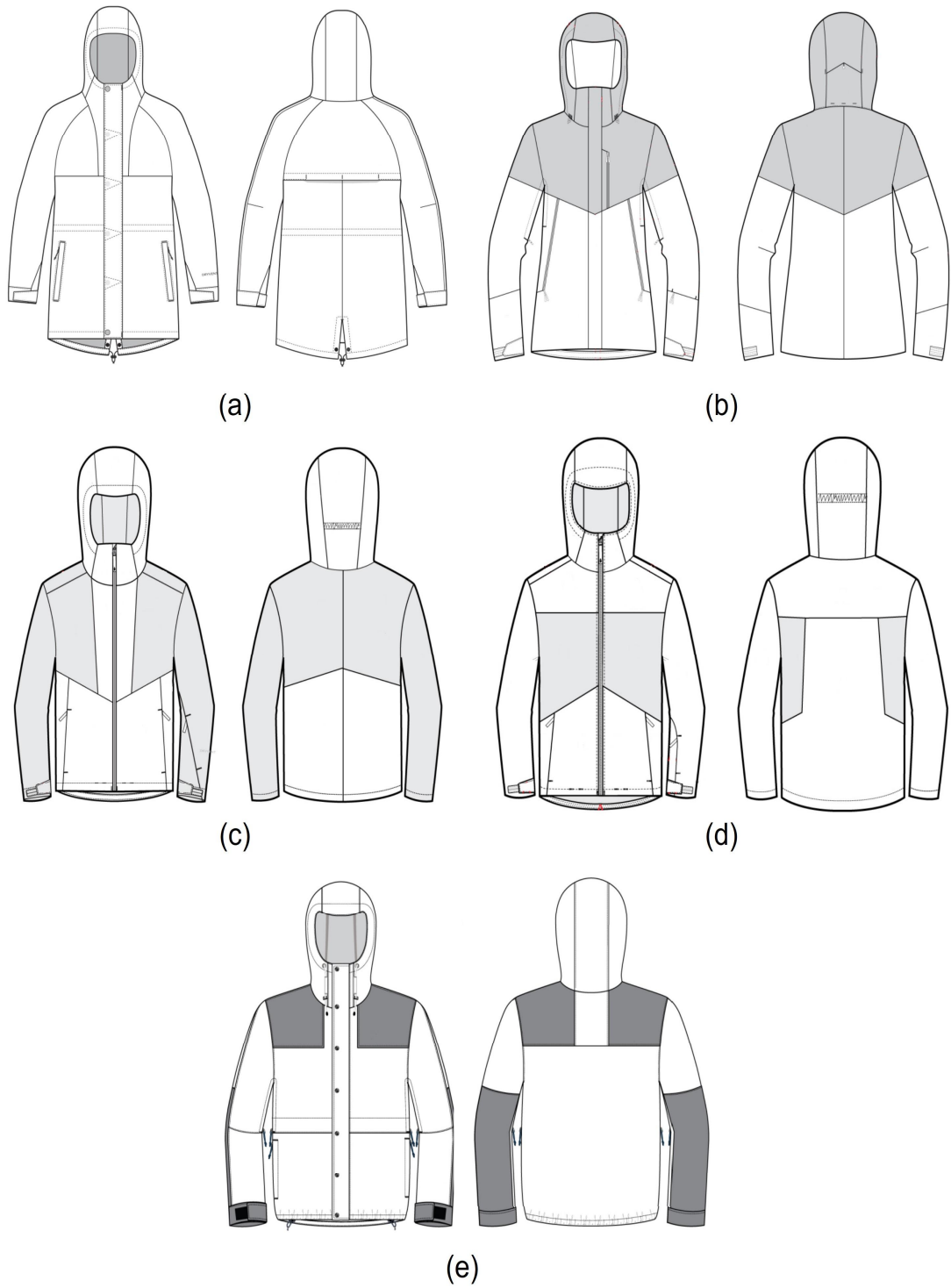


Fig. 14. Flat sketch of five technical jackets
 (a) jacket A, (b) jacket B, (c) jacket C, (d) jacket D, (e) jacket E

제공받은 테크니컬 자켓의 공정 분석 데이터는 크게 모듈, 작업 번호, 작업명, 기계, 기준 허용 시간의 정보를 제공한다. 공정 분석 데이터는 한 별의 테크니컬 자켓을 완성하기 위한 모든 공정이 단위 작업으로 세분화되어 있으며, 세분화된 작업은 작업 번호로 구분된다. 그리고 각 작업을 수행하는 데 적합한 기계와 그 기계로 해당 작업을 수행했을 때 기대되는 기준 허용 시간을 제공한다. 또한 각 작업은 자켓의 구성에 따라 모듈로 분류되어 있으며, 모듈 내에서 작업 순으로 작업이 표시되어 있다. 부록의 Table A2는 제공받은 테크니컬 자켓 A의 공정 분석 데이터이다.

Table 2는 제공받은 테크니컬 자켓 5종의 공정 분석 데이터에서 모듈 수, 작업 수, 기계 종류, 총 기준 허용 시간을 비교한 표이다. 모듈은 모두 7개로 구성되어 있으며, 한 별을 완성하기 위한 세분화된 작업은 202 ~ 322개, 작업에 필요한 기계 종류는 11 ~ 14종, 한 별을 완성하는 데 걸리는 기준 허용 시간은 80 ~ 127분이다. 작업 수, 기계 종류, 총 기준 허용 시간을 비교할 때, 동일 품목인 테크니컬 자켓 안에서도 다양한 스타일이 선정되었음을 확인할 수 있다.

Table 2. Comparison of process analysis data for five technical jackets

Technical jacket	Number of module	Number of work	Kinds of machine	Total SAM* (min)
A	7	217	11	111.8
B	7	322	14	126.8
C	7	222	13	80.1
D	7	216	14	80.3
E	7	202	12	102.7

* SAM: Standard Allowable Minutes

2.2. 봉제 작업과 보조 작업

실제 의류 제조 공장에서는 작업의 중요도, 기계 대수, 기계의 사용 빈도 등을 고려하여 봉제 작업과 보조 작업으로 구분하고, 작업자 역시 봉제 작업자와 보조 작업자로 구분한다. 그리고 의류 봉제 라인 레이아웃도 봉제 작업과 보조 작업을 나누어 작성한다. 따라서 실제 의류 제조 현장에서 사용할 수 있도록 봉제 작업과 보조 작업이 구분된 의류 봉제 라인의 생성도 가능한 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다.

```
[Worker]
Class=5
  Operator=50
    4 O/L,D/N,D/Ncor,S/N,S/Nc,Nechi
  Helper=10
    Hp
  Seamsealing=10
    S/S
  HelperWithMachine=10
    B/T,Crossbar,Eyelet,N/I,Velcro,Snap
  Preparation=5
    Heat Transfer,Laser Cut,Heat Press
```

Fig. 15. Metadata for technical jacket

봉제 작업과 보조 작업은 작업에 사용되는 기계에 따라 분류할 수 있으며, Fig. 15는 봉제 작업과 보조 작업이 구분된 메타데이터의 예이다. 메타데이터는 기계에 대한 정보와 작업자 정보를 담고 있다. 기계에 대한 정보에는 사용되는 기계의 종류와 기계 계층(class)이 분류되어 있으며, 작업자 정보에는 작업자 수와 작업자 계층이 포함되어 있다. 기계 계층과 작업자 계층은 자유롭게 지정할 수 있으며, 계층을 지정함으로써 각 상황에 맞게 봉제 작업과 보조 작업을 구분할 수 있다.

여기서 Operator는 봉제 작업자를 의미하며, 옆의 숫자는 설정된 봉제 작업자 수이다. 그리고 4 O/L, D/N, D/Ncor, S/N, S/Nc, Nechi는 봉제 작업에 속하는 기계로 각각 오버록(overlock), 삼봉(double needle), 바이

어스삼봉(double needle with Attachment), 본봉(single needle), 칼본봉(single needle cut), 날라리(marrow stitch)의 봉제 기계를 의미한다. 따라서 공정 분석 데이터에서 이와 같은 기계로 수행하도록 지정된 작업은 봉제 작업으로 분류된다. Helper, Seamsealing, HelperWithMachine, Preparation은 모두 보조 작업으로 분류되며, 옆의 숫자는 설정된 각 보조 작업의 작업자 수이다. 마찬가지로 각 보조 작업에 속하는 기계를 지정하면, 지정된 기계로 수행하는 작업은 보조 작업으로 분류된다. 이처럼 메타데이터를 활용하여 봉제 작업과 보조 작업이 구분된 의류 봉제 라인을 생성할 수 있으며, 의류 봉제 라인 밸런싱 또한 봉제 작업과 보조 작업이 구분되어 혼합 작업 할당 기법으로 각각 수행된다.

2.3. 시나리오

개발된 모듈 기반 의류 봉제 라인 시뮬레이터의 시뮬레이션 활용 가능성을 검토하기 위해 Table 3과 같이 시뮬레이터를 활용하여 해결할 수 있는 세 가지 시나리오를 고려하였다. 먼저, 세 가지 시나리오의 공통 가정으로 작업자는 하루 8시간만 근무하며, 모든 직물과 부자재는 의류 봉제 라인에 바로 투입 가능한 상태로 준비되었다고 가정하였다. 그리고 봉제 작업 이외에 작업을 고려하지 않았다.

먼저, 테크니컬 자켓 A의 주문량이 2,000벌일 때, 의류 봉제 라인의 작업자 수를 몇 명으로 산정하는 것이 적정한지를 시뮬레이션을 통해 검토하는 것이 시나리오 1이다. 전체적인 생산 및 납기 일정을 고려할 때 의류 봉제 라인의 작업일수는 8일이라고 가정하였다. 또한, 가용 봉제 작업자 수는 70명이며, 기계는 충분하다고 가정하였다.

다음으로, 테크니컬 자켓 5종의 주문이 1,000벌씩 동시에 들어왔을 때, 어떤 주문을 선택하는 것이 적정한지를 시뮬레이션을 통해 검토하는 것이 시나리오 2이다. 공장의 생산 능력 이외에 사항은 주문 선택에 영향을 미치지 않으며, 현재 하나의 의류 봉제 라인만 운영할 수 있다고 가정하였다. 생산 계획을 고려할 때 의류 봉제 라인의 가용 가능한 작업일

수는 4일이다. 그리고 가용 봉제 작업자 수는 40명이며, 의류 봉제 라인을 구성하기 위해 가용 가능한 봉제 기계는 오버록 15대, 삼봉 2대, 바이어스삼봉 2대, 본봉 40대, 칼본봉 20대, 날라리 1대이다.

끝으로, 테크니컬 자켓 A를 생산하기로 예정된 의류 봉제 라인에서 1명의 작업자가 결근했을 때 의류 봉제 라인을 어떻게 운영할지를 시뮬레이션을 통해 검토하는 것이 시나리오 3이다. 의류 봉제 라인은 40명의 봉제 작업자로 구성되어 있으며, 현재 추가적으로 투입 가능한 봉제 작업자가 없다고 가정하였다.

Table 3. Scenarios for the evaluation of the developed simulator

common assumptions		<ul style="list-style-type: none"> - Working eight hours a day. - All fabrics and subsidiary materials are ready to be put directly into the assembly line. - Operations other than sewing are not considered.
Scenario 1: Selection of the number of workers	situation	How many workers will be selected on the apparel assembly line to produce on schedule?
	assumptions	<ul style="list-style-type: none"> - Order quantity of jacket A: 2,000 pieces - Considering the plan, the proper number of working days for the assembly line is eight days. - 70 available sewing workers - No mechanical restrictions.
Scenario 2: Order selection	situation	If multiple orders are placed at the same time, which order should be selected?
	assumptions	<ul style="list-style-type: none"> - Orders of five technical jackets come in at the same time, 1,000 pieces each. - It does not affect the selection of orders other than the production capacity of the factory, and there is currently room to operate only one assembly line. - The usable working days for the assembly line is four days. - 40 available sewing workers - Available sewing machines are: 4 O/L: 15 units, D/N: 2 units, D/Ncor: 2 units, S/N: 40 units, S/Nc: 20 units, Nechi: 1
Scenario 3: Worker absentee- ism	situation	How should the assembly line operate when one worker is absent?
	assumptions	<ul style="list-style-type: none"> - One sewing worker is suddenly absent from work on an assembly line scheduled to produce technical jacket A. - No additional sewing workers can be added to the assembly line. - the assembly line consists of 40 sewing workers.

Note. 4 O/L: Overlock, D/N: Double Needle, D/Ncor: Double Needle with Attachment, S/N: Single Needle, S/Nc: Single Needle cut, Nechi: Marrow Stitch

제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법

의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 총 41개의 작업으로 이루어진 남자 셔츠 데이터에 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법을 적용하였다. 선행 연구와의 비교를 위해 작업자를 13명, 생산량을 100벌로 설정하였다. 구현된 알고리즘을 따라 휴리스틱으로 분류된 다섯 가지 모듈에 워크스테이션 수가 산정되고, 모듈별 워크스테이션이 생성되었다. 그리고 모듈마다 작업 그룹화가 수행되어 각 워크스테이션에 작업이 배분되었으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

1. 워크스테이션 생성 및 작업 배분

모듈 기반 혼합 작업 할당 기법을 구현한 알고리즘에 의해 Collar 모듈, Torso 모듈, Sleeve 모듈, Cuff 모듈, Join 모듈에 각각 4개, 3개, 2개, 2개, 2개의 워크스테이션이 생성되었다. 워크스테이션 #1에서 묶인 작업 1-2-3-4(60)의 의미는 작업 #1, #2, #3, #4가 워크스테이션 #1에 배분되었으며, 작업 #4는 워크스테이션 #2와의 공유 작업을 의미한다. 그리고 4(60)은 공유 작업 #4에 대하여 총 100번의 작업량 중 60번의 작업이 워크스테이션 #1에 배분되었음을 의미한다. [] 안의 숫자는 모듈별 작업 그룹화의 기준이 되는 기준 작업 시간이며, 기준 허용 시간은 워크스테이션마다 배분된 묶인 작업을 100번 수행하는 데 걸리는 시간을 의미한다. 끝으로, 모든 워크스테이션의 기준 허용 시간이 모듈별 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 범위에 들어옴을 고려할 때 워크스테이션 생성 및 작

업 배분 알고리즘이 잘 구현되었음을 확인할 수 있다.

Table 4. Workstation generation in modules

Module	Work station	Grouped tasks	SAM* (min)	SAM/SWT (%)
Collar [124.8 min]	1	1-2-3-4(60)	124.8	100.0
	2	4(40)-5-6-7(38)	124.8	100.1
	3	7(62)-8-9	120.4	96.5
	4	10-11-12	129.0	103.4
Torso [132.3 min]	5	13-14-15-16-17(63)	132.3	100.0
	6	17(37)-18-19-20(16)	132.4	100.0
	7	20(84)-21-22-23	132.4	100.0
Sleeve [129.5 min]	8	25-26-27(35)	129.4	99.9
	9	27(65)-28-29	129.6	100.1
Cuff [135.5 min]	10	34-35-36	134.0	98.9
	11	37-38-39	137.0	101.1
Join [161.5 min]	12	24-30-31(76)	161.6	100.1
	13	31(24)-32-33-40-41	161.4	99.9

Note. The number in [] means the standard work time (SWT) for each module, and the number in () means the workload of each worker in the shared work.

* SAM: Standard allowable minutes: time required to accomplish 100 grouped tasks.

2. 작업자 배치

다음으로, 생성된 워크스테이션마다 작업자의 작업 숙련도를 고려하여 작업자를 배치하였다. 작업자 배치는 라인 밸런싱 방식과 작업 시간 단축 방식으로 수행되었다. 먼저, 라인 밸런싱 방식은 모듈별 라인 밸런싱이 수행된 의류 봉제 라인의 워크스테이션에 작업자를 배치할 때 가용 작업자 중에서 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간에 가장 가깝게 수행할 수 있는 작업자를 배치하는 방식이다. 배분된 작업의 기준 허용 시간이 가장 긴 워크스테이션부터 차례로 작업자를 배치했으며, 그 결과는 Table 5와 같다. 워크스테이션 #12 > #13 > #11 > #10 > #6 > #7 > #5 > #9 > #8 > #4 > #2 > #1 > #3 순으로 작업자를 한 명씩 배치하였다. 그리고 이 순서대로 모든 가용 작업자의 워크스테이션별 조정된 기준 허용 시간을 계산하였다. 모든 가용 작업자 중에서 워크스테이션별 조정된 기준 허용 시간이 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간에 가장 가까운 작업자가 한 명씩 차례로 배치되었다.

작업 시간 단축 방식은 모듈별 라인 밸런싱이 수행된 의류 봉제 라인의 워크스테이션에 작업자를 배치할 때 가용 작업자 중에서 각 워크스테이션에 배분된 작업을 가장 빨리 수행할 수 있는 작업자를 배치하는 방식이다. 배분된 작업의 기준 허용 시간이 가장 오래 걸리는 워크스테이션부터 차례로 작업자를 배치했으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 작업자를 배치하는 순서는 라인 밸런싱 방식과 동일하며, 마찬가지로 워크스테이션 순서대로 모든 가용 작업자의 워크스테이션별 조정된 기준 허용 시간을 계산하였다. 그리고 모든 가용 작업자 중에서 워크스테이션별 조정된 기준 허용 시간이 가장 짧은 작업자가 한 명씩 차례로 배치되었다.

Table 5. Worker assignment by line balancing method

Module	Workstation	Worker No.	Adjusted SAM* (min)
Collar	1	26	132.6
	2	17	132.6
	3	32	146.3
	4	6	128.8
Torso	5	22	137.5
	6	13	143.8
	7	30	137.2
Sleeve	8	23	133.8
	9	28	136.8
Cuff	10	11	134.6
	11	1	134.7
Join	12	40	131.7
	13	35	143.0

* SAM: Standard allowable minutes: time required to accomplish 100 grouped tasks.

Table 6. Worker assignment by reducing working time method

Module	Workstation	Worker No.	Adjusted SAM* (min)
Collar	1	6	118.8
	2	9	107.9
	3	27	89.0
	4	38	87.4
Torso	5	22	137.5
	6	7	115.9
	7	29	119.8
Sleeve	8	2	116.5
	9	10	115.8
Cuff	10	13	112.0
	11	41	125.6
Join	12	40	131.7
	13	35	143.0

* SAM: Standard allowable minutes: time required to accomplish 100 grouped tasks.

3. 작업자 배치 전·후 분석

작업자 배치에 따른 라인 밸런싱 결과를 평가하기 위해 워크스테이션 별 기준 허용 시간을 이용하여 작업자 배치 전, 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치와 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치의 통계량을 Table 7과 같이 비교하였다.

Table 7. Statistics before and after worker assignment

Statistics	Before	After	
		line balancing	reducing working time
Mean (min)	134.5	136.4	117.0
Min. (min)	120.4	128.8	87.4
Max. (min)	161.6	146.3	143.0
S.D.	12.2	5.0	15.6

Table 7에서 평균값은 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간을 의미한다. 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치를 수행하면 작업자 배치 전보다 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간이 약간 증가했으나, 최솟값, 최댓값, 표준편차를 비교할 때 최솟값과 최댓값의 편차가 줄고 표준편차 역시 감소했기 때문에 라인 밸런싱이 더 고르게 수행되었음을 확인할 수 있다. 이와 반대로 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치를 수행하면 작업자 배치 전보다 의류 봉제 라인의 기준 작업 시간은 많이 감소했으나, 최솟값, 최댓값, 표준편차를 비교할 때 최솟값과 최댓값의 편차가 크게 증가하고 표준편차 역시 증가했기 때문에 라인 밸런싱 결과는 오히려 나빠졌음을 확인할 수 있다.

이번에는 작업자 배치 전, 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치, 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치의 모듈, 워크스테이션, 작업 그룹화, 작업자 배치, 기준 허용 시간, 작업자 수, 생산량 등의 정보를 활용하여 가상의 의류 봉제 라인을 각각 구현하였다. 그리고 구현된 의류 봉제 라인의 시뮬레이션을 통해 남성 셔츠 100벌의 총생산시간을 비교했으며(Table 8), 이때 모든 의류 봉제 라인의 작업자 수는 13명으로 동일하다.

Table 8. Total production time before and after worker assignment

	Before	After	
		Line balancing	Reducing working time
Total production time (min)	170.0	155.1	150.4

각 의류 봉제 라인의 시뮬레이션 결과, 작업자 배치 전 의류 봉제 라인의 총생산시간은 170.0분, 라인 밸런싱 방식으로 작업자를 배치한 의류 봉제 라인의 총생산시간은 155.1분, 작업 시간 단축 방식으로 작업자를 배치한 의류 봉제 라인의 총생산시간은 150.4분이다. 작업자 배치 전 각 작업의 기준 허용 시간을 바탕으로 생성된 의류 봉제 라인보다 작업자 배치 후 작업자의 작업 숙련도가 반영된 조정된 기준 허용 시간을 바탕으로 생성된 의류 봉제 라인에서 총생산시간이 단축되었으며, 라인 밸런싱 방식에서 약 9%, 작업 시간 단축 방식에서 약 12% 단축되었다. 이는 작업자 배치가 잘 수행되었음을 의미한다. 그리고 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치보다 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치에서 총생산시간이 약 3%포인트 단축되었다.

다음으로 작업자 배치 전, 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치, 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치의 워크스테이션별 유휴시간(idle time)을 계산하였다. 유휴시간은 작업자가 의류 봉제 라인의 총생산시간 중 작업을

수행하지 않고 대기하는 시간으로 작업자의 유희시간이 길수록 의류 봉제 라인 밸런싱 결과가 좋지 않음을 의미한다. 기준 허용 시간의 측정 방식마다 차이는 있으나 작업의 기준 허용 시간에는 작업 수행 시간 이외에 약간의 여유시간이 포함된다. 본 연구에서 사용된 데이터 역시 작업마다 100번을 연속으로 수행한 시간을 측정했기 때문에 작업 수행 시간 이외에 여유시간이 포함되어 있다. 따라서 유희시간은 여유시간 이외에 추가적으로 대기하여 낭비되는 시간을 의미한다. 이와 같은 유희시간 역시 라인 밸런싱의 평가지표로 활용할 수 있으며, 의류 봉제 라인의 총 생산시간에서 워크스테이션별 작업자의 조정된 기준 작업 시간을 빼 값으로 계산할 수 있다. 작업자 배치 전·후의 유희시간 계산 결과는 Table 9와 같다.

먼저, 작업자의 평균값을 의미하는 기준 허용 시간을 바탕으로 작업이 배분된 작업자 배치 전 의류 봉제 라인의 워크스테이션별 유희시간을 살펴보면 워크스테이션마다 평균적으로 약 35분의 유희시간이 발생하며, 이는 총생산시간의 약 21%에 해당하는 시간이다. 워크스테이션마다 작업의 기준 허용 시간으로 작업한다고 가정하면, 전체 생산시간에서 평균 유희시간을 빼 라인 효율은 약 79%이다. 그러나 유희시간이 가장 긴 워크스테이션 #3의 경우 유희시간이 약 50분이며, 이는 총생산시간 중 약 29%에 해당하는 시간이다.

다음으로, 라인 밸런싱 방식으로 작업자를 배치한 의류 봉제 라인의 워크스테이션별 유희시간을 살펴보면 워크스테이션마다 평균적으로 약 19분의 유희시간이 발생하며, 이는 전체 생산시간의 약 12%에 해당하는 시간이다. 즉, 라인 밸런싱 방식으로 의류 봉제 라인에 작업자를 배치하면 라인 효율이 약 88%로 배치 전보다 9%포인트가 향상되었다. 또한, 유희시간이 가장 긴 워크스테이션 #4의 경우 유희시간이 약 26분으로 총생산시간 중 83%에 해당하는 시간을 작업하는데, 이는 작업자 배치 전 의류 봉제 라인의 라인 효율인 79%보다 높다.

Table 9. Idle time before and after worker assignment

Work station	Idle time					
	Before		After			
	min	%	line balancing		reducing working time	
	min	%	min	%	min	%
1	45.2	26.6	22.4	14.5	31.6	21.0
2	45.1	26.5	22.5	14.5	42.5	28.2
3	49.6	29.2	8.8	5.7	61.3	40.8
4	41.0	24.1	26.2	16.9	63.0	41.9
5	37.7	22.2	17.6	11.3	12.9	8.6
6	37.6	22.1	11.3	7.3	34.5	22.9
7	37.6	22.1	17.9	11.5	30.6	20.4
8	40.6	23.9	21.2	13.7	33.9	22.5
9	40.4	23.7	18.2	11.7	34.6	23.0
10	36.0	21.2	20.5	13.2	38.4	25.5
11	33.0	19.4	20.3	13.1	24.8	16.5
12	8.3	4.9	23.3	15.0	18.7	12.4
13	8.6	5.1	12.1	7.8	7.4	4.9
Mean	35.4	20.8	18.6	12.0	33.4	22.2
Min.	8.3	4.9	8.8	5.7	7.4	4.9
Max.	49.6	29.2	26.2	16.9	63.0	41.9
S.D.	12.2	7.2	4.8	3.2	15.6	10.4

끝으로, 작업 시간 단축 방식으로 작업자를 배치한 의류 봉제 라인의 워크스테이션별 유희시간을 살펴보면 워크스테이션마다 평균적으로 약 33분의 유희시간이 발생하며, 이는 총생산시간의 약 22%에 해당하는 시간이다. 즉, 작업 시간 단축 방식으로 의류 봉제 라인에 작업자를 배치하면 라인 효율이 약 78%로 배치 전보다 1%포인트 하락하였다. 무엇보다도 워크스테이션 #3, #4의 경우 유희시간이 60분을 상회하는데, 이는 총생산시간 중 40%가 넘는 시간을 대기한다는 의미이다.

남자 셔츠 100벌의 총생산시간만을 비교할 때, 두 가지 작업자 배치 방식 모두에서 배치 전보다 총생산시간이 단축되었기 때문에 작업자 배치가 잘 수행되었음을 확인할 수 있다. 그리고 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치가 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치보다 총생산시간이 약 3%포인트 단축되었다. 그러나 통계량과 유희시간 분석을 고려하면 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치는 의류 봉제 라인 밸런싱 결과가 좋지 않으며, 라인 효율이 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치보다 10% 정도 떨어진다. 특히, 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치는 총생산시간의 40%에 해당하는 시간을 대기하는 워크스테이션이 일부 존재할 정도로 라인 효율이 나쁘다.

작업 시간 단축 방식의 작업자 배치는 오직 작업 시간 단축을 위해 가용 작업자 중 숙련 작업자를 최대한 배치하여 총생산시간을 더 단축시키는 효과가 발생했으나 라인 효율이 많이 떨어진다. 그리고 남은 가용 작업자로 추가 생산을 위해 별도의 의류 봉제 라인을 구성이 필요할 때 이미 숙련 작업자를 남자 셔츠를 생산하기 위한 의류 봉제 라인에 전부 배치하였기 때문에 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치보다 추가 의류 봉제 라인을 생성하기 위한 여력이 부족하다. 따라서 의류 봉제 라인을 구성하고 작업자를 배치할 때, 총생산시간을 반드시 단축해야 하는 상황이 아니라면 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치가 작업 시간 단축 방식의 작업자 배치보다 우선적으로 고려되어야 한다.

4. 단계별 라인 밸런싱의 효과

끝으로, 선행 연구와 혼합 작업 할당 방식의 라인 밸런싱 효과를 비교하였다. 남자 셔츠 100벌의 총생산시간을 선행 연구와 비교한 결과는 Table 10와 같다.

Table 10. Total production time for different line balancing methods

	Chan (1998)	Chen (2021)*		This study	
Number of workers	41	41	13	41	13
Total production time (min)	474.6	1282.4	-	67.8	155.1

* The total production time is replaced with the total adjusted SAM because its value is not available, and the best results are indicated.

본 연구에서는 단일 작업-복수 작업자 할당 방식과 다중 작업-단수 작업자 할당 방식을 동시에 고려하는 혼합 작업 할당 방식을 구현하고 단일 작업-단수 작업자 할당 방식은 고려하지 않았기 때문에 작업자를 13명으로 설정하였다. 그러나 작업자 41명 모두 셔츠 생산에 투입된 경우를 고려하기 위해 남은 작업자 28명으로 두 개의 의류 봉제 라인을 추가적으로 구현하였다(부록의 Table A3). 즉, 작업자 13명이 배치되는 기존의 봉제 라인-1과 작업자 14명이 각각 배치되는 봉제 라인-2와 봉제 라인-3으로 구성했으며, 혼합 작업 할당 방식으로 작업을 배분하고 봉제 라인-1, 2, 3의 순으로 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치를 수행하였다. 그리고 각 봉제 라인의 생산 능력을 고려하여 봉제 라인-1, 봉제 라인-2, 봉제 라인-3에 작업량을 각각 38벌, 34벌, 28벌로 설정하였다. 생산 시뮬레이션 결과, 봉제 라인-1, 봉제 라인-2, 봉제 라인-3에서 작업량을 생산하는 데 각각 63.1분, 63.5분, 67.8분이 소요되었다. 따라서 남자 셔츠

100벌의 총생산시간을 67.8분으로 표시하였다. 봉제 라인-2, 3에서 봉제 라인-1보다 작업자가 한 명 더 많고, 작업량이 더 적음에도 생산시간이 오래 걸리는 이유는 봉제 라인-1, 2, 3의 순으로 작업자 배치를 수행하여 워크스테이션별 작업에 더 적합한 작업자가 봉제 라인-1, 2, 3 순으로 먼저 배치되었기 때문이다.

Chen et al.(2021)의 경우, 작업자 41명을 배치했을 때의 총생산시간을 제시하지 않았기 때문에 제시된 총조정된 작업 허용 시간으로 대체했으며, 제일 좋은 결과를 표시하였다. 작업자 13명인 경우에는 총조정된 작업 허용 시간도 제시하지 않았는데, 이는 다중 작업-단수 작업자 할당 방식으로 작업자 배치를 시도한 것에 의의를 둔 것으로 판단된다.

연구에서 수행된 혼합 작업 할당 방식은 작업자 13명이 배치된 의류 봉제 라인에서도 작업자 41명이 배치된 선행 연구보다 총생산시간이 단축되었다. 작업자 41명인 경우에는 선행 연구보다 총생산시간이 약 85.7%만큼 단축되었다. 이처럼 총생산시간이 극적으로 향상된 이유는 선행 연구에서 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 한정하고 작업 배분은 고려하지 않았기 때문이다. 제시한 혼합 작업 할당 방식은 작업 배분과 작업자 배치를 차례로 수행하는데, 13개의 워크스테이션으로 구성된 의류 봉제 라인에서 작업자 배치 전 총생산시간이 170분으로(Table 8), 이미 작업자를 41명 배치한 선행 연구보다 총생산시간이 단축되었다. 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱 효과가 약 10% 내외의 총생산시간의 단축임을 감안하면(Table 8), 결국 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱 효과보다는 작업 배분에 따른 라인 밸런싱 효과가 훨씬 뛰어남을 확인할 수 있다.

다음으로, 의류 봉제 라인에 작업자 13명을 배치한 선행 연구와의 비교를 위해 워크스테이션별 기준 허용 시간의 통계량을 비교했으며, 그 결과는 Table 11과 같다. Chen et al.(2021)의 경우, 다중 작업-단수 작업자 할당 방식을 시도했으며 작업자 배치를 수행한 방법 중에서 가장 좋은 결과를 표시하였다. 이 연구에서 수행된 혼합 작업 할당 방식의 경

우에는 작업자 배치 전과 작업자 배치 후의 통계량을 표시했으며, 작업자 배치는 라인 밸런싱 방식으로 수행되었다. 워크스테이션별 기준 허용 시간의 통계량 비교 결과, 혼합 작업 할당 방식이 선행 연구보다 라인 밸런싱 측면에서 뛰어난 결과를 보임을 확인할 수 있다. 특히, 작업자 배치 전 혼합 작업 할당 방식에서 작업자를 배치한 선행 연구보다 결과가 훨씬 좋은데, 이는 단일 작업-복수 작업자 할당 방식과 다중 작업-단수 작업자 할당 방식을 동시에 고려한 작업 그룹화에 의한 워크스테이션별 작업 배분 효과 때문이다.

Table 11. Statistics of line balancing methods

Statistics	Chen (2021)*	This study	
		Before	After
Mean (min)	605.0	134.5	136.4
Min. (min)	91.5	120.4	128.8
Max. (min)	2769.6	161.6	146.3
S.D.	755.6	12.2	5.0

* The best results are indicated.

Chen(2021)의 경우 모듈을 설정하고 워크스테이션별 작업을 배분할 때, Lin(2008)의 모듈화 도식화(Fig. 8)에 근거하여 단순히 동일한 분기에 속하는 작업을 묶어 워크스테이션으로 지정하였다. 이와 같은 작업 배분은 작업의 기준 허용 시간을 고려하지 않기 때문에 워크스테이션별 기준 허용 시간의 편차를 더욱 크게 만들어 작업자 배치 후에도 라인 밸런싱 수행 결과가 좋지 않은 원인으로 작용하였다. Chen(2021)의 방식과 작업자 배치 전 혼합 작업 할당 방식의 최솟값, 최댓값, 표준편차를 비교해보면, 워크스테이션별 작업 배분을 고려하지 않고 작업자 배치만으로 수행된 라인 밸런싱은 효과가 거의 없음을 확인할 수 있다.

결론적으로, 두 선행 연구와의 비교에서 알 수 있듯이 작업 배분에 따

른 라인 밸런싱 효과가 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱 효과보다 훨씬 크기 때문에 설계 단계의 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 한정하는 것은 바람직하지 않으며, 반드시 워크스테이션별 작업 배분이 고려되어야 한다.

제 2 절 의류 봉제 라인 시뮬레이터

1. 의류 봉제 라인 시뮬레이터 개요

개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터는 Fig. 16과 같다. 제공받은 테크니컬 자켓의 공정 분석 데이터를 Fig. 13와 같은 입력 데이터 형태로 변경하였다. 개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터에서 입력 데이터를 불러오고 생산량을 설정하면 혼합 작업 할당 기법으로 라인 밸런싱된 가상의 의류 봉제 라인이 자동으로 생성된다. Fig. 16에서 7개의 큰 직사각형은 각 모듈을 의미하며, 각 모듈 내 작은 정사각형은 워크스테이션을 의미한다. 그리고 모듈과 워크스테이션마다 왼쪽에 있는 세로 막대는 남은 작업물의 양을 나타내며, 각 워크스테이션 위에 있는 가로 막대는 작업 진행 상황을 나타낸다. 끝으로, 화면의 좌우 패널을 통해 의류 봉제 라인을 생성하는 데 필요한 기계의 수와 종류, 각 모듈 및 워크스테이션의 세부 정보를 확인할 수 있다.

또한, 자동으로 생성된 의류 봉제 라인에서 의류 생산 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 시뮬레이션 수행은 실제 시간과 동일하게 설정이 가능할 뿐만 아니라 원하는 속도로 가속 설정이 가능하다. 시뮬레이션 동안 각 모듈과 워크스테이션의 남은 작업량과 작업 상황을 감시하여 병목지점, 생산 현황, 라인 밸런싱 등을 확인할 수 있다. 그리고 의류 생산 시뮬레이션이 완료되면 설정한 생산량을 완료하는 데 걸리는 시간인 총생산시간을 확인할 수 있다. 또한 시뮬레이션 과정을 확인하지 않고 시뮬레이션 일괄 실행으로 총생산시간을 바로 계산할 수 있으며, 이때 걸리는 시간은 i5-8250U CPU, 8.00 GB RAM, Window 11 Home 환경에서 10초 이내이다.

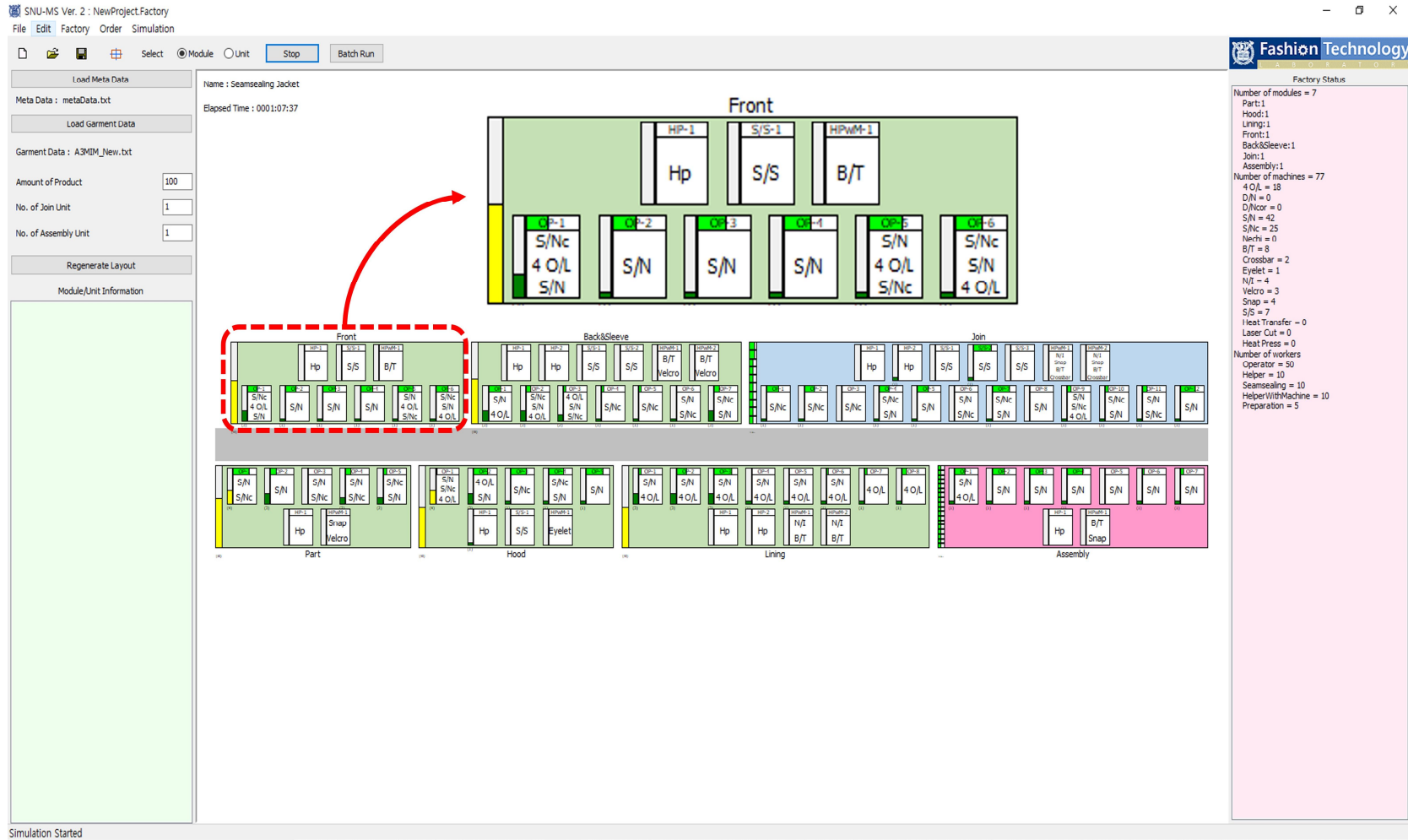


Fig. 16. Overview of the developed apparel assembly line simulator

2. 의류 봉제 라인 자동 생성

테크니컬 자켓 A의 공정 분석 데이터를 활용하여 만든 입력 데이터를 불러오고, 작업자 수를 50명, 작업량을 100별로 각각 설정하였다. 그리고 의류 봉제 라인에 설치되는 기계의 수에는 제한이 없다고 가정하였다. 또한, 상대적으로 더 중요한 봉제 작업의 라인 밸런싱을 위해 기계와 작업의 중요도를 바탕으로 216개의 작업을 봉제 작업과 보조 작업으로 구분하였다. 그리고 작업 배분에 따른 라인 밸런싱의 결과를 검토하기 위해 모든 작업을 기준 허용 시간으로 수행하는 기본 모드로 실험을 진행하였다.

Fig. 17과 같이 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법으로 라인 밸런싱이 수행된 의류 봉제 라인이 자동으로 생성되었다. 생성된 의류 봉제 라인은 주로 대량 생산하는 의류 공장에서 활용되는 두 줄 형태의 레이아웃으로 구현하였다. 중앙의 긴 회색 직사각형은 작업물을 쌓아놓는 작업대를 의미한다. 작업대를 기준으로 양쪽에 각각 한 줄 형태로 봉제 작업을 수행하는 봉제 워크스테이션을 배치하였다. 그리고 보조 작업을 수행하는 보조 워크스테이션을 봉제 워크스테이션 옆에 별도로 배치하였다. 전체적인 작업 공정은 의류 봉제 라인의 왼쪽에서 오른쪽으로 진행된다. 따라서 걸감을 만드는 Join 모듈과 옷을 완성하는 Assembly 모듈이 의류 봉제 라인의 가장 오른쪽 배치되었다. 나머지 부속을 만드는 Part, Hood, Lining, Front, Back&Sleeve 모듈은 두 줄 길이의 균형을 맞추는 알고리즘을 따라 배치되었다. 그리고 모든 모듈은 의류 봉제 라인 아래 표시된 Part 모듈의 상세도와 같이 작업 순서에 따라 워크스테이션마다 작업이 배분되었으며, 이때 봉제 작업과 보조 작업으로 나뉘어 라인 밸런싱이 수행되었다.

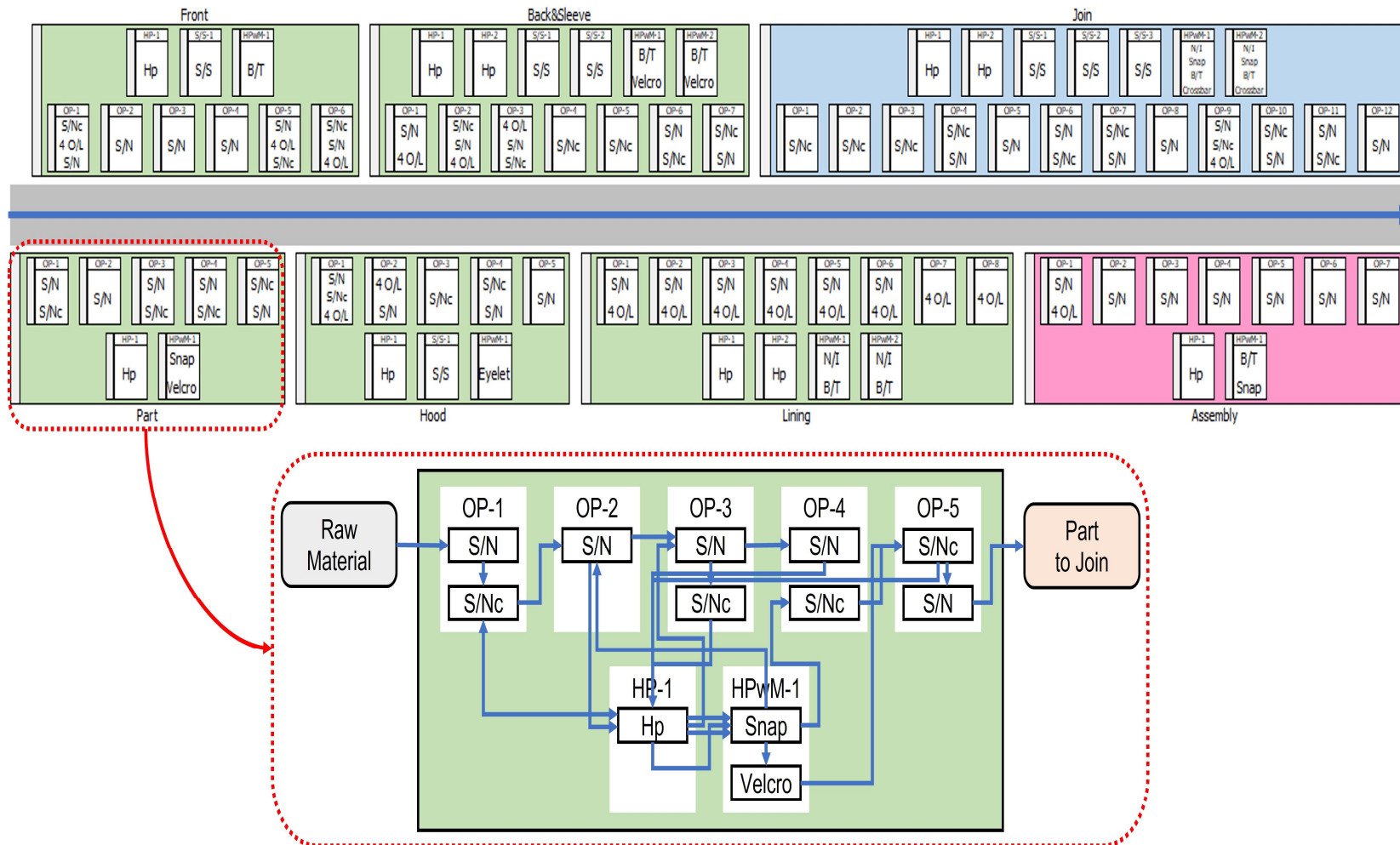


Fig. 17. Generated apparel assembly line for technical jacket A

3. 자동 생성된 의류 봉제 라인 검토

3.1. 의류 봉제 라인 밸런싱

공정이 많고 복잡하며 사용하는 기계가 다양한 의류도 라인 밸런싱이 잘 수행되는지 확인하기 위해 테크니컬 자켓 5종의 공정 분석 데이터를 활용하여 자동 생성된 의류 봉제 라인 밸런싱 결과를 검토하였다. 보조 작업 역시 모듈 기반 혼합 작업 할당 기법으로 그룹화된 작업이 워크스테이션마다 배분되었으나 의류 봉제 라인 밸런싱 결과는 봉제 작업만을 기준으로 검토하였는데, 그 이유는 실제 의류 제조 공장에서도 봉제 작업만을 기준으로 라인 밸런싱이 검토되며 보조 작업은 봉제 작업 진행에 문제가 발생하지 않도록 유연하게 작업자 수와 작업을 조정 및 배분하기 때문이다.

Fig. 18은 테크니컬 자켓 5종의 워크스테이션별 작업 배분을 확인하기 위한 그래프로, 그래프에서 모듈명 옆의 괄호 안 숫자는 모듈마다 산정된 워크스테이션 수를 의미한다. 워크스테이션마다 배분된 작업의 기준 허용 시간의 합을 모듈별 기준 작업 시간으로 나눈 값을 백분율로 나타내었으며, 작업의 정상 배분 범위인 95 ~ 105%에 속하는지 확인하기 위해 모듈별로 그래프를 작성하였다. 검토 결과, 테크니컬 자켓 5종 전체 워크스테이션 250개 중 일곱 개만이 모듈별 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 범위를 벗어난 작업이 배분되었다. 이는 전체 워크스테이션 중 97.2%는 알고리즘에 의해 작업이 정상적으로 배분되었음을 의미한다.

정상 작업 배분 범위를 벗어난 일곱 개의 워크스테이션을 검토한 결과, 일곱 개의 워크스테이션 모두 해당 워크스테이션이 속한 모듈에서 마지막 워크스테이션임을 확인하였다. 이는 작업을 묶어 순차적으로 워크스테이션에 배분하는 과정에서 선행 워크스테이션의 기준 허용 시간이 편중되는 경우, 마지막 워크스테이션까지 그 편차가 누적되기 때문이다.

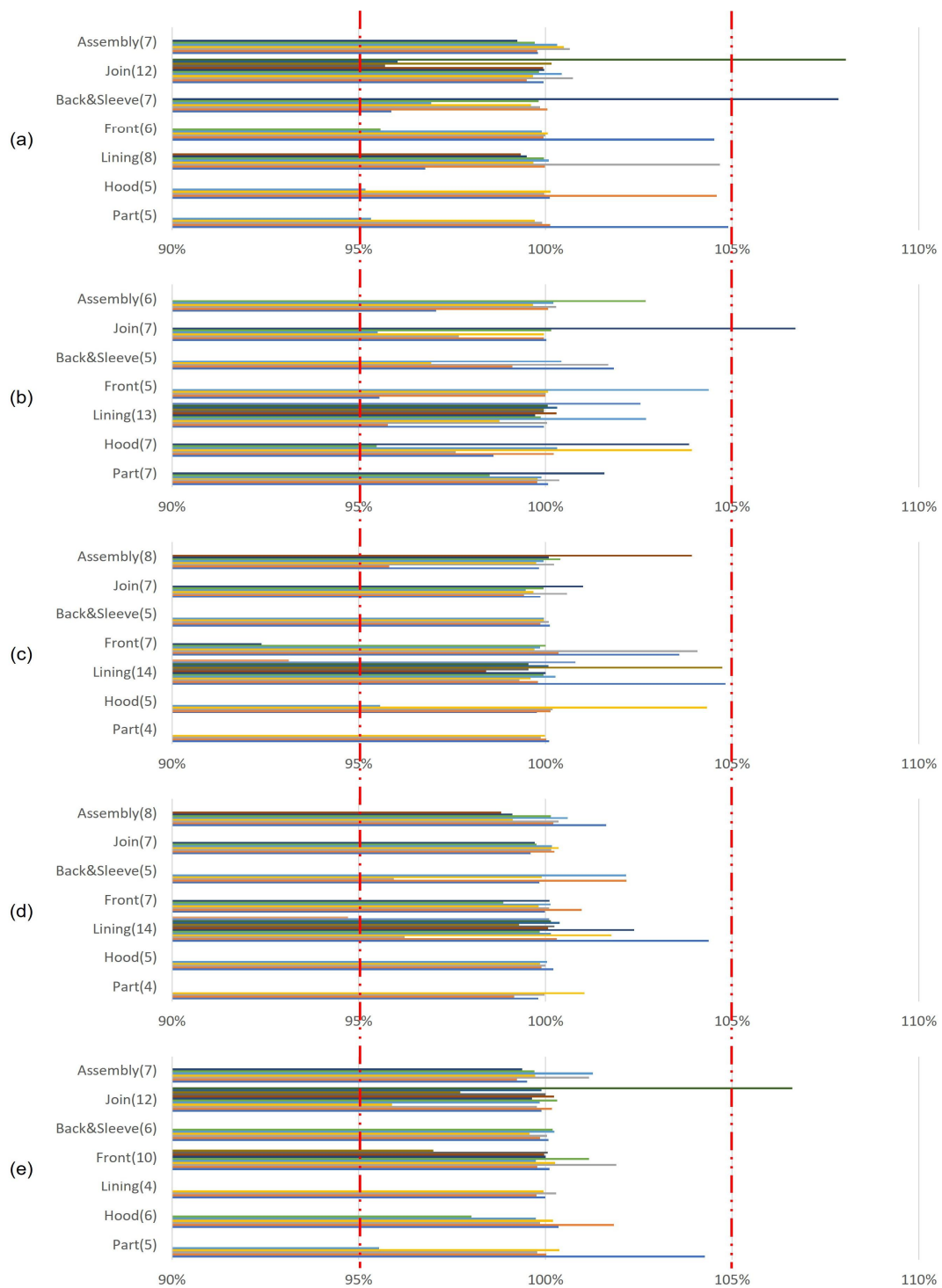


Fig. 18. Line balancing for technical jackets

(a) jacket A, (b) jacket B, (c) jacket C, (d) jacket D, (e) jacket E

Note. The number in () means the number of workstations.

예를 들어, 자켓 A의 Back&Sleeve 모듈에는 워크스테이션 입고 개가 산정되었고, 각 워크스테이션의 기준 허용 시간은 Back&Sleeve 모듈 기준 작업 시간의 95.87%, 100.05%, 99.86%, 99.61%, 96.94%, 99.82%, 107.85%이 되도록 순차적으로 작업이 배분되었다. 마지막 워크스테이션을 제외한 선행 워크스테이션 여섯 개 중 다섯 개가 Back&Sleeve 모듈 기준 작업 시간의 95 ~ 100% 범위로 작업이 편중되어 배분되었다. 따라서 선행 워크스테이션의 편중된 작업 배분에 따른 편차가 누적되어 마지막 워크스테이션의 작업 배분이 Back&Sleeve 모듈 기준 작업 시간의 105%를 초과하는 결과가 발생했다.

이미 앞에서 언급했듯이 모든 워크스테이션에서 작업 허용 시간의 합이 기준 작업 시간의 100%가 되도록 작업을 배분할 수 있으나, 이는 더 많은 공유 작업이 발생함을 의미한다. 그리고 실제 의류 공장에서는 공유 작업이 많아질수록 복잡도가 증가한다.

정상 작업 배분 범위를 벗어난 2.8%의 워크스테이션은 작업자의 작업 숙련도에 따른 작업자 배치를 통해 해결할 수 있다. 배분된 작업의 기준 허용 시간의 합이 기준 작업 시간의 95% 미만인 워크스테이션은 상대적으로 작업의 여유가 있음을 의미한다. 이와 반대로 배분된 작업의 기준 허용 시간의 합이 기준 작업 시간의 105% 이상인 워크스테이션에는 다른 워크스테이션에 비해 작업이 조금 더 많이 배분되었음을 의미한다. 따라서 기준 작업 시간의 95% 미만으로 작업이 배분된 워크스테이션에는 배분된 작업의 미숙련자를 배치하고, 기준 작업 시간의 105% 이상으로 작업이 배분된 워크스테이션에는 배분된 작업의 숙련자를 배치함으로써 라인 밸런싱을 수행할 수 있다. 이와 같은 방식의 추가적인 라인 밸런싱은 앞 절에서 제안한 혼합 작업 할당 기법 중 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치를 통해 수행할 수 있다. 그러나 이와 같은 작업자 배치를 위해서는 작업자의 작업 숙련도를 구하기 위해 모든 작업에 대하여 작업자가 실제로 수행한 데이터가 필요하다. 대량 생산 기반의 의류 제조 공장은 수백 가지 작업으로 이루어진 다양한 종류의 옷을 생산하며, 봉제

작업자의 수도 많게는 수천 명에 이른다. 따라서 작업자의 작업 숙련도 데이터를 모으는 것은 매우 어려운 일이나, 이는 실제 의류 봉제 라인과 가상의 의류 봉제 라인을 동기화하는 디지털 트윈의 미러링 파트에서 수집된 데이터의 분석을 통해 작업자의 작업 숙련도 데이터를 추출할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2. 의류 봉제 라인 수정 기능

의류 봉제 라인 밸런싱 문제는 의류 봉제 라인의 수정 및 변경 사항이 있을 때마다 지속적으로 발생하며, 의류 봉제 라인 레이아웃을 수정하는 일은 전문가에게도 매우 시간이 많이 소요되는 작업이다. 또한 의류 봉제 라인의 시뮬레이션을 위해서는 라인 레이아웃을 바탕으로 가상의 의류 봉제 라인을 수동으로 모델링해야 하는데, 의류 봉제 라인의 수정 및 변경 사항이 있을 때마다 모델링된 의류 봉제 라인을 지속적으로 수정하는 것은 매우 번거로운 일이다. 개발된 시뮬레이터는 자동으로 의류 봉제 라인을 생성할 뿐만 아니라 봉제 라인의 수정 역시 자동으로 수행된다. 따라서 자동 수정된 봉제 라인에서도 라인 밸런싱이 잘 수행되는지 확인하기 위해 작업자 수 변경에 따른 워크스테이션별 작업 배분 결과를 검토하였다.

Fig. 19는 테크니컬 자켓 A의 작업자 수 변경에 따라 자동 생성된 의류 봉제 라인의 워크스테이션별로 배분된 작업의 기준 허용 시간의 합이 모듈별 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 범위에 속하는지 확인한 그래프로 자동 수정된 의류 봉제 라인에서 작업이 정상적으로 배분되었는지 확인할 수 있다. 검토 결과, 다섯 가지 실험의 총 워크스테이션 250개 중 여섯 개만이 모듈별 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 범위를 벗어난 작업이 배분되었으며, 이는 97.6%의 워크스테이션에는 정상적으로 작업이 배분되었음을 의미한다.

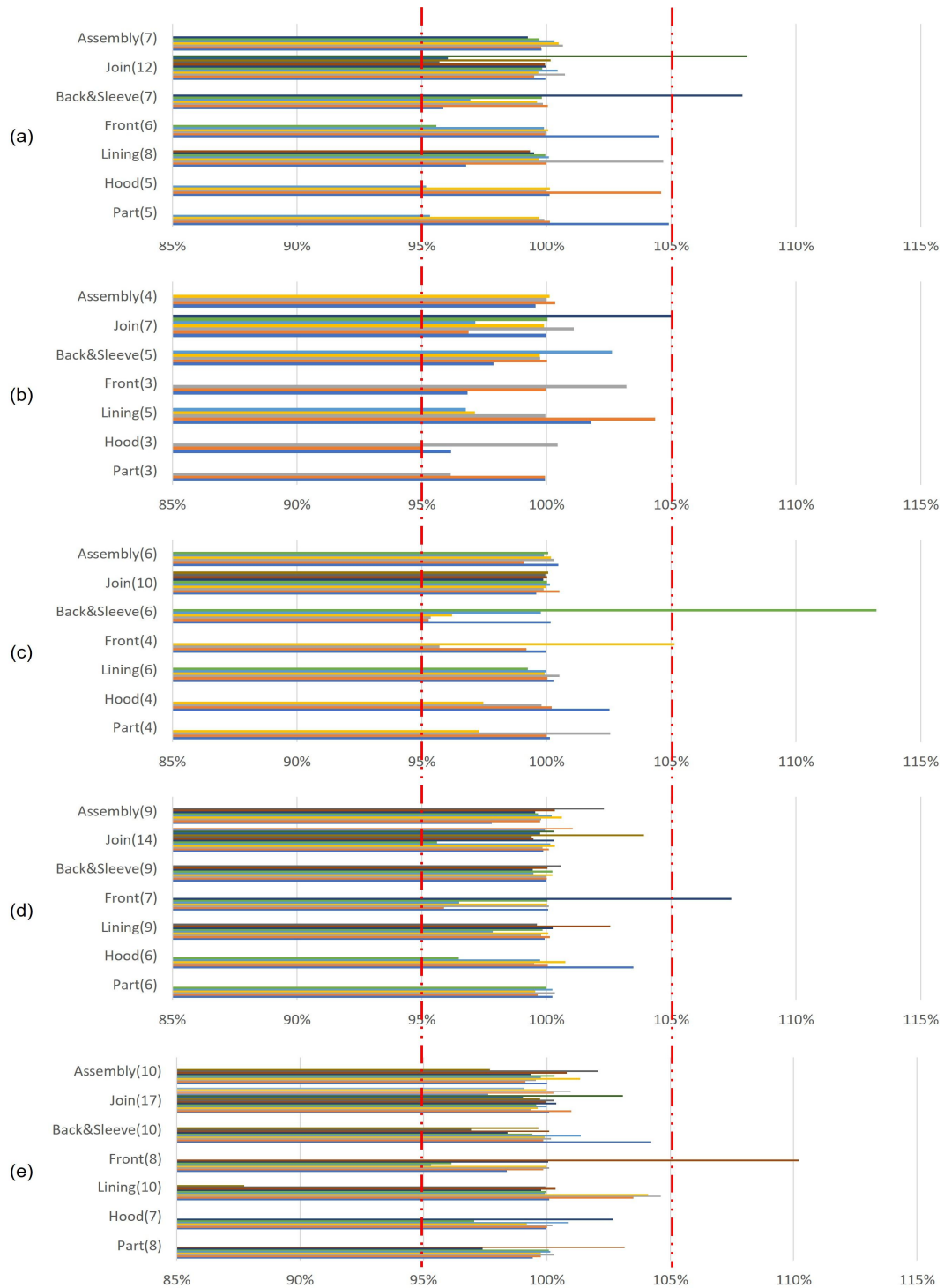


Fig. 19. Line balancing by changing the number of workers

(a) 50 workers, (b) 30 workers, (c) 40 workers, (d) 60 workers, (e) 70 workers

Note. The number in () means the number of workstations.

이전 실험과 마찬가지로 정상 작업 배분 범위를 벗어난 워크스테이션 여섯 개 모두 해당 워크스테이션이 속한 모듈의 마지막 워크스테이션이며, 이는 선행 워크스테이션에서의 편중된 작업 배분에 따른 편차 누적 때문이다. 일부 워크스테이션에서 모듈별 기준 작업 시간의 10% 이상 크게 벗어나는 워크스테이션도 존재하나 일부 선행 워크스테이션에서의 작업 배분이 많이 편중되었을 뿐 그 원인은 동일하다(Fig. 20(c)(e)). 마찬가지로 작업자의 작업 숙련도 데이터가 준비된다면 혼합 작업 할당 기법 중 라인 밸런싱 방식의 작업자 배치를 통해 이 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 시나리오를 통한 사례 연구

개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터로 해결할 수 있는 세 가지 시나리오를 바탕으로 의류 봉제 라인의 생산 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 검토함으로써 봉제 라인 시뮬레이터의 활용 가능성을 모색하였다.

4.1. 시나리오 1: 작업자 수 산정

시나리오 1은 테크니컬 자켓 A의 주문량이 2,000벌일 때, 의류 봉제 라인의 작업자 수를 몇 명으로 산정하는 것이 적정한지를 시뮬레이션을 통해 검토하는 것이다. 의류 봉제 라인의 가능 작업일수는 8일이며, 가용 봉제 작업자 수는 70명이다(Table 3 참고).

Table 12는 재봉 작업자 수에 따른 테크니컬 자켓 A의 의류 봉제 라인 시뮬레이션 결과이다. 1일 작업 시간을 8시간으로 가정했기 때문에 예상 봉제 작업 시간은 30명일 때 12.9일, 40명일 때 9.9일, 50명일 때 7.6일, 60명일 때 6.2일, 70명일 때 5.4일이다. 따라서 적정 재봉 작업일수 8일을 고려할 때 테크니컬 자켓 A를 생산하기 위한 의류 봉제 라인의 재봉 작업자를 50명으로 구성하는 것이 적절하다. 이와 같은 방식으로 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 의류 생산 계획에 활용할 수 있다.

Table 12. Estimated work time in changing the number of workers

Number of workers	Estimated work time	
	Time	Days (8 hours)
30	103h 02m 05s	12.9
40	79h 17m 15s	9.9
50	60h 50m 28s	7.6
60	49h 51m 35s	6.2
70	43h 01m 55s	5.4

4.2. 시나리오 2: 주문 선택

시나리오 2는 테크니컬 자켓 5종의 주문이 1,000벌씩 동시에 들어왔을 때, 어떤 주문을 선택하는 것이 적정한지를 시뮬레이션을 통해 검토하는 것이다. 현재 공장에서는 하나의 의류 봉제 라인만 운영할 수 있는 여력이 있으며, 가용 봉제 작업자 수는 40명이다. 그리고 생산 계획을 고려할 때 의류 봉제 라인의 적정 작업 일수는 4일 이내이며, 가용 가능한 봉제 기계에 제약이 있다(Table 3 참고).

Table 13은 테크니컬 자켓 5종의 의류 봉제 라인을 각각 생성할 때 필요한 봉제 기계 대수와 생성된 의류 봉제 라인에서의 시뮬레이션 결과에 따른 예상 작업 일수이다. 공장의 생산 능력 이외에 사항은 주문 선택에 영향을 미치지 않는다고 가정했기 때문에 의류 봉제 라인의 예상 작업 일수가 적정 작업 일수에 속하는 테크니컬 자켓 C와 D를 후보군으로 추릴 수 있다. 그리고 가용 봉제 기계를 고려할 때, 가용 가능한 바이어스삼봉 재봉틀이 두 대뿐이므로 최종적으로 테크니컬 자켓 D의 주문을 선택할 수 있다.

Table 13. Estimated work days and number of machines required

Technical jacket		A	B	C	D	E
Estimated work days		5.0	6.1	3.6	3.6	4.4
4 O/L		13	15	15	15	10
Number of machines required (unit)	D/N	0	1	2	2	0
	D/Ncor	0	2	3	2	0
	S/N	34	39	35	35	38
	S/Nc	23	17	19	19	24
	Nechi	0	0	1	1	0

Note. 4 O/L: Overlock, D/N: Double Needle, D/Ncor: Double Needle with Attachment, S/N: Single Needle, S/Nc: Single Needle cut, Nechi: Marrow Stitch

4.3. 시나리오 3: 작업자 결근

시나리오 3은 테크니컬 자켓 A를 생산하기로 예정된 의류 봉제 라인에서 한 명의 작업자가 결근했을 때 의류 봉제 라인을 어떻게 운영할지를 시뮬레이션을 통해 검토하는 것이다. 의류 봉제 라인은 40명의 봉제 작업자로 구성되어 있으며, 현재 추가적으로 투입 가능한 봉제 작업자가 없다고 가정하였다(Table 3 참고).

Table 14는 테크니컬 자켓 A를 생산하기로 예정된 의류 봉제 라인에서 봉제 작업자 한 명이 갑자기 결근했을 때 변경되는 모듈별 작업자 수이다. Join 모듈에만 봉제 작업자 한 명을 적게 배치하고, Join 모듈을 제외한 나머지 모듈은 동일한 작업 배분과 작업자 배치가 가능하다. 이는 의류 봉제 라인에 모듈화를 적용한 이점으로 모듈화를 적용하지 않은 의류 봉제 라인에서 작업자의 수가 변경되면 전체 의류 봉제 라인의 밸런싱을 위해 모든 작업자의 작업 배분에 영향을 받게 되고, 이는 모든 작업자의 작업이 변경되어야 함을 의미한다.

Table 14. Changes in the number of workers due to absenteeism

Module	Number of workers	
	Normal state	Worker absenteeism
Total	40	39
Part	4	4
Hood	4	4
Lining	6	6
Front	4	4
Back&Sleeve	6	6
Join	10	9
Assembly	6	6

그리고 작업 변경에 따른 기계 재설치 역시 전체 의류 봉제 라인을 고려해야 한다. 그러나 모듈 기반 의류 봉제 라인의 경우 작업자의 수 변경에 따라 영향을 받는 모듈이 일부로 제한된다. 따라서 영향을 받는 모듈을 제외한 나머지 모듈은 작업자 수와 작업 배분, 기계가 동일하게 유지되며 영향을 받는 모듈에서만 작업 배분, 작업자 배치 및 기계 재설치를 수행하면 되기 때문에 상대적으로 용이하다.

Table 15는 한 명의 작업자 결근에 따른 Join 모듈의 워크스테이션별 작업 배분이 변경된 결과를 나타낸다(부록의 Table A2 참고). 작업자 결근 전 워크스테이션 #1, #8, #9, #10과 작업자 결근 후 워크스테이션 #1, #7, #8, #9는 공유 작업에서 작업 비율에만 변화가 있을 뿐 배분된 작업은 동일하다. 따라서 전체 워크스테이션 40개 중에서 오직 Join 모듈의 여섯 개의 워크스테이션에서만 작업 배분이 변경되었다. 이처럼 변경된 워크스테이션과 작업 배분 정보를 바탕으로 변경된 의류 봉제 라인의 운영이 가능하다.

Table 15. Changes in task assignment at the join module

Normal state		Worker absenteeism	
Work station	Grouped tasks	Work station	Grouped tasks
1	190-191-166(5)*	1	190-191-166(15)
2	166(86)	2	166(85)-99(16)
3	166(9)-99-105(55)	3	99(84)-105-100(20)
4	105(45)-100-106(50)	4	100(80)-106-103
5	106(50)-103-104-21(85)	5	104-21-49
6	21(15)-49-50-167(10)	6	50-167(68)
7	167(84)	7	167(32)-72-73-74(47)
8	167(6)-72-73-74(74)	8	74(53)-75-89-90-68(32)
9	74(26)-75-89-90-68(63)	9	68(68)-71-91-93-80-78-79
10	68(37)-71-91-93-80-78-79		

Note. The number in () means the workload of each worker in the shared work.

Fig. 20은 작업자 결근에 따른 의류 봉제 라인의 Join 모듈을 비교한 것이다. 작업자 결근 전 OP-3과 OP-5 칼본봉 재봉틀을 제거하면 추가 기계 설치 없이 의류 봉제 라인 변경이 가능하다.

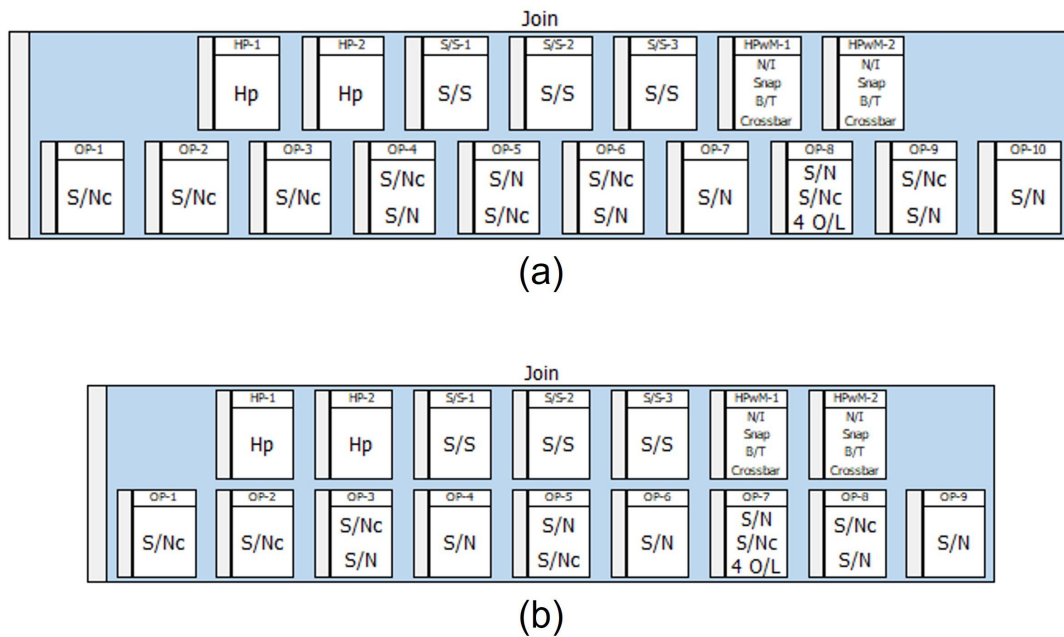


Fig. 20. Changes in the join module due to absenteeism
(a) Normal state, (b) Worker absenteeism

시나리오 3을 수행하기 위해 봉제 작업자 수를 40명으로 설정한 의류 봉제 라인과 39명으로 설정한 의류 봉제 라인을 비교하였다. 전문가가 수작업으로 작성한 라인 레이아웃이 필요한 상용 시뮬레이션 소프트웨어와 달리 개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터의 경우에는 봉제 작업자 수만 변경하면 별도의 라인 레이아웃이 필요 없이 가상의 의류 봉제 라인이 대략 10초 이내에 자동으로 생성된다. 또한 상용 시뮬레이션 소프트웨어의 경우에는 전문가의 의해 작성된 라인 레이아웃을 바탕으로 모델링된 의류 봉제 라인을 수동으로 수정하여야 한다. 그런데 이와 같은 의류 봉제 라인의 변경 및 수정은 제조 현장에서 지속적으로 발생하기 때

문에 개발된 의류 봉제 라인 전용 시뮬레이터는 상용 시뮬레이션 소프트웨어보다 빠른 대응이나 지속적인 수정이 용이하다는 점에서 이점이 있을 것으로 기대된다.

제 5 장 결 론

제 1 절 요약 및 연구의 의의

본 연구에서는 의류 생산의 핵심 영역인 의류 봉제 라인에서의 디지털 트윈을 구현하기 위해 가상의 의류 봉제 라인을 자동으로 생성하고, 생성된 의류 봉제 라인에서의 생산 시뮬레이션을 통해 실제 의류 봉제 라인의 최적 운영에 도움이 되는 정보를 제공하는 모듈 기반의 의류 봉제 라인 시뮬레이터를 개발하였다. 그리고 의류 봉제 라인의 최적 운영을 위한 방법 중 의류 봉제 라인의 설계 단계에서의 라인 밸런싱 문제를 해결하기 위해 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법은 도요타 봉제 시스템 개념을 바탕으로 단일 작업-복수 작업자 할당 방식과 다중 작업-단수 작업자 할당 방식을 동시에 고려하여 워크스테이션별로 그룹화된 작업이 배분되고, 작업자의 작업 숙련도를 고려하여 작업자가 워크스테이션별로 배치되도록 알고리즘을 구현하였다. 구현된 알고리즘으로 라인 밸런싱을 수행한 결과, 총 41명의 작업자가 남자 셔츠 100벌을 생산하는데 걸리는 총생산시간이 선행 연구보다 약 85.7%만큼 단축되었으며, 의류 봉제 라인에 선행 연구의 약 31.7%의 작업 인원을 배치한 경우에도 총생산시간이 약 67.3%만큼 단축되었다. 이처럼 총생산시간이 크게 단축된 이유는 선행 연구에서 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 한정하고 작업 배분은 거의 고려하지 않은 것과 달리 본 연구에서는 작업 배분에 따른 라인 밸런싱과 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱을 차례로 수행하였기 때문이다. 그리고 작업 배분에 따른 라인 밸런싱이 작업자 배치에 따른 라인 밸런싱보다 훨씬 큰 효과를 보였기 때문에 설

계 단계에서의 의류 봉제 라인 밸런싱 문제를 작업자 배치 문제로 한정하는 것은 바람직하지 않으며 반드시 작업 배분이 고려되어야 한다. 또한 모듈 기반의 작업 배분은 상대적으로 관련이 적은 작업이 묶이는 것을 방지하기 때문에 의류 봉제 라인에서의 작업 흐름 복잡도를 감소시킬 뿐만 아니라 생산하는 의류가 변경되더라도 작업자를 동일한 모듈에 배치하고 유사한 작업을 배정함으로써 작업자의 작업 숙련도 향상에 도움이 될 것이라 기대된다.

다음으로, 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법으로 라인 밸런싱이 수행된 의류 봉제 라인을 자동으로 생성하는 의류 봉제 라인 전용 시뮬레이터를 개발하였다. 그리고 개발된 시뮬레이터를 검증하기 위해 OEM 생산을 기반으로 하는 의류 제조 공장으로부터 제공받은 테크니컬 자켓 5종의 공정 분석 데이터를 바탕으로 사례 연구를 수행하였다. 의류 봉제 라인의 자동 생성을 검증하기 위한 테스트 결과, 작업 그룹화 및 워크스태이션 생성 알고리즘을 따라 라인 밸런싱이 수행된 가상의 의류 봉제 라인이 생성되었고, 약 97.2%의 워크스태이션에서 워크스태이션별 기준 작업 시간의 95 ~ 105% 해당하는 작업이 정상적으로 배분되었다. 또한 시뮬레이터의 의류 봉제 라인 수정 기능을 검증하기 위해 봉제 작업자 수를 변경하는 테스트를 수행하였다. 테스트 결과, 봉제 작업자 수 변경에도 약 97.6%의 워크스태이션에서 라인 밸런싱에 의해 정상적으로 작업이 배분된 의류 봉제 라인이 자동으로 생성되었다.

다음으로, 다양한 시나리오를 바탕으로 의류 봉제 라인 시뮬레이터의 시뮬레이션 기능을 검증하고 의류 봉제 라인 시뮬레이터의 활용 가능성을 검토하였다. 특정 주문의 납기 일정을 맞추기 위한 의류 봉제 라인의 작업자 수 산정, 현재 공장의 생산 능력을 고려한 주문 선택, 갑작스런 작업자 결근에 따른 의류 봉제 라인 운영의 세 가지 시나리오를 해결하기 위해 개발된 의류 봉제 라인 시뮬레이터가 활용되었다. 검토 결과, 개발된 시뮬레이터가 주문 선정, 생산 계획, 의류 봉제 라인 계획 및 운영 과정에서 의사결정에 도움을 줄 수 있음이 확인되었으며, 의류 봉제 라

인에 적용된 모듈화 개념으로 인해 의류 봉제 라인의 변경 및 수정의 편의성이 향상되었음이 확인되었다. 다만 작업자 스케줄에 관한 제약 조건이 추가된다면 의류 봉제 라인 계획 및 운영에 조금 더 도움이 될 것이라 기대된다.

끝으로, 의류 봉제 라인을 시뮬레이션할 수 있는 기존의 상용 시뮬레이션 소프트웨어와 비교할 때 개발된 시뮬레이터는 전문가가 라인 레이아웃을 작성하거나 시뮬레이션을 위한 가상의 의류 봉제 라인을 수동으로 모델링할 필요 없이 가상의 의류 봉제 라인이 자동으로 생성되기 때문에 빠른 대응이나 지속적인 수정이 용이하다는 점에서 이점이 있다. 또한 본 연구에서 개발된 시뮬레이터를 통해 자동으로 생성되는 의류 봉제 라인은 디지털 트윈의 가상 대응물로 활용될 수 있으며, 봉제 라인 시뮬레이션 기능은 디지털 트윈의 최적화 파트에 활용될 수 있다.

제 2 절 연구의 한계 및 제언

본 연구에서 제시된 모듈 기반의 혼합 작업 할당 기법은 한 명의 작업자가 작업 순서에 따라 설치된 기계를 이용하여 이동하면서 여러 작업을 수행하는 도요타 봉제 시스템 개념을 바탕으로 구현되었기 때문에 기계 종류에 대한 제약 조건을 가지고 작업을 배분하는 경우보다 작업 흐름의 복잡도를 낮추는 장점이 있으나 의류 봉제 라인에 배치되는 기계 대수가 많다는 단점이 있다. 더구나 혼합 작업 할당 기법에서 총기계 대수에 대한 제약 조건이 없기 때문에 다른 작업 배분 방식보다 더 많은 기계가 필요할 수 있다.

다음으로, 사례 연구에서 알 수 있듯이 본 연구에서 구현된 혼합 작업 할당 기법은 선형 워크스테이션에 배분된 작업이 한쪽으로 치우쳐 발생한 편차의 누적 때문에 모듈별 마지막 작업자의 작업 배분이 정상적인 작업 배분을 벗어날 가능성이 있다. 이는 작업자의 작업 숙련도를 고려한 작업자 배치를 통해 라인 밸런싱을 추가로 수행함으로써 해결이 가능할 것이라 기대되지만 본 연구에서 제시한 작업자의 작업 숙련도에 따른 작업자 배치를 구현하기 위해서는 모든 작업에 대하여 모든 작업자가 수행하는 데 걸리는 시간을 측정할 데이터가 필요하다. 이러한 데이터를 수집하는 과정은 어려울 것으로 예상되지만 가상의 의류 봉제 라인을 통한 감시를 위해 디지털 트윈의 미러링 파트를 구현하는 과정에서 수집된 데이터로부터 추출할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 작업자 배치 과정에서 작업자의 작업 숙련도로 작업자가 작업을 수행하는 데 걸리는 시간만이 고려되었으나, 이는 의류 봉제 라인의 설계 과정에서 작업 수행 시간에 따른 최적의 라인 밸런싱만을 기준으로 하는 작업자 배치이다. 실제 의류 생산에서는 라인 밸런싱 못지않게 제조된 의류의 품질이 중요하기 때문에 단순히 작업 수행 시간이 아닌 작

업자의 기술 수준, 작업 자체의 난이도, 작업물의 품질 등을 종합적으로 고려한 작업자의 작업 숙련도를 바탕으로 작업자 배치가 수행되어야 한다.

끝으로, 본 연구에서는 의류 봉제 라인의 디지털 트윈 시스템 중 가상 대응물과 시뮬레이션 기능을 통한 최적화의 활용될 수 있는 의류 봉제 라인 시뮬레이터가 개발되었다. 다만 의류 봉제 라인의 디지털 트윈 시스템을 온전히 구현하기 위해서는 실제 봉제 라인의 감시를 통해 실제 봉제 라인을 가상의 봉제 라인으로 미러링하는 연구와, 최적화 부분과 미러링 부분을 통합하는 연구가 추가적으로 필요하다. 그리고 의류 제조 공장의 디지털 트윈 시스템을 구현하기 위해서는 봉제 영역뿐만 아니라 패턴 제작, 그레이딩, 마킹, 재단, 품질관리, 불량 검출, 포장 등 의류 제조의 전 영역으로 연구가 확장되어야 한다. 앞으로도 의류 제조 공장의 디지털 트윈에 관한 추가 연구가 지속적으로 수행되어 최종 목표인 의류 제조 산업의 스마트 공장 구현이 앞당겨지기를 기대하며 이 연구를 마치고자 한다.

참 고 문 헌

- Ancarani, A., & Mauro, C. D. (2018). Reshoring and industry 4.0: How often do they go together? *IEEE Engineering Management Review*, 46(2), 87–96.
<https://doi.org/10.1109/EMR.2018.2833475>
- Bolter, K., & Jim R. (2020). *Strategic reshoring: A literature review*. Prepared for The Fund for our Economic Future (FFEF).
<https://research.upjohn.org/reports/253>
- Bongomin, O., Mwasiagi, J. I., Nganyi, E. O., & Nibikora, I. (2020a). Improvement of garment assembly line efficiency using line balancing technique. *Engineering Reports*, 2(4), Article e12157. <https://doi.org/10.1002/eng2.12157>
- Bongomin, O., Mwasiagi, J. I., Nganyi, E. O., & Nibikora, I. (2020b). A complex garment assembly line balancing using simulation based optimization. *Engineering Reports*, 2(11), Article e12258. <https://doi.org/10.1002/eng2.12258>
- Cao, H., & Ji, X. (2021). Prediction of garment production cycle time based on a neural network. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 29(1), 8–12. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5036>
- Chan, K. C. C., Hui, P. C. L., Yeung, K. W., & Ng, F. S. F. (1998). Handling the assembly line balancing problem in the clothing industry using a genetic algorithm. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 10(1), 21–37.
<https://doi.org/10.1108/09556229810205240>
- Chen, G. Y.-H., Chen, P.-S., Dang, J.-F., Kang, S.-L., & Cheng, L.-J. (2021). Applying meta-heuristics algorithm to solve assembly

- line balancing problem with labor skill level in garment industry. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 14(1), 1438–1450.
<https://doi.org/10.2991/ijcis.d.210420.002>
- Cui, H., & Yan, Y. (2015). The optimization design of uniform's hanging production line. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 27(3), 370–389.
<https://doi.org/10.1108/IJCST-11-2013-0121>
- Fatima, A., & Tufail, M. (2021). Improving efficiency of apparel manufacturing through the principles of resource management. *Clothing and Textiles Research Journal*, Article e211005432.
<https://doi.org/10.1177/0887302x211005432>
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future nasa and u.s. air force vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Hawaii*, Article e1818.
<https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Grieves, M. (2014). *Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication* [White paper]. Digital Twin Institute.
https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (pp. 85–113). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Guo, Z. X., Wong, W. K., & Guo, C. (2014). A cloud-based intelligent

decision-making system for order tracking and allocation in apparel manufacturing. *International Journal of Production Research*, 52(4), 1100–1115.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.838650>

Hui, L. P., & Ng, S. F. F. (1999). A study of the effect of time variations for assembly line balancing in the clothing industry. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 11(4), 181–188. <https://doi.org/10.1108/09556229910281894>

Jung, W.-K., Kim, H., Park, Y.-C., Lee, J.-W., & Ahn, S.-H. (2020). Smart sewing work measurement system using IoT-based power monitoring device and approximation algorithm. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6202–6216. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1671629>

Jung, W.-K., Kim, D.-R., Lee, H., Lee, T.-H., Yang, I., Youn, B. D., Zontar, D., Brockmann, M., Brecher, C., & Ahn, S.-H. (2021). Appropriate smart factory for smes: concept, application and perspective. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22(1), 201–215.

<https://doi.org/10.1007/s12541-020-00445-2>

Jung, W.-K., Park, Y.-C., Lee, J.-W., & Suh, E. S. (2021). Simulation-based hybrid optimization method for the digital twin of garment production lines. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3), Article 031007. <https://doi.org/10.1115/1.4050245>

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0*. Acatech. <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-i>

ndustrie-4-0-working-group/

- Kim, E. T., & Kim, S. (2020). Development of a modular garment assembly line simulator. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 32(5), 645–659.
<https://doi.org/10.1108/IJCST-10-2019-0151>
- Kim, E. T., & Kim, S. (2021). Development of smart insole for cycle time measurement in sewing process. *Fashion and Textiles*, 8(1), Article 3. <https://doi.org/10.1186/s40691-020-00234-5>
- Kim, M., Ahn, J., Kang, J., & Kim, S. (2020). A systematic review on smart manufacturing in the garment industry. *Fashion & Textile Research Journal*, 22(5), 660–675.
<https://doi.org/10.5805/sfti.2020.22.5.660>
- Kumar, D. V., Mohan, G. M., & Mohanasundaram, K. M. (2019). Lean tool implementation in the garment industry. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 27(2), 19–23.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.9982>
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 508–517.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Kwong, C. K., Mok, P. Y., & Wong, W. K. (2006). Determination of fault-tolerant fabric-cutting schedules in a just-in-time apparel manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 44(21), 4465–4490.
<https://doi.org/10.1080/00207540600597047>
- Lee, C. K. H., Choy, K. L., Ho, G. T. S., & Law, K. M. Y. (2013). A RFID-based resource allocation system for garment manufacturing. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 784–799. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.033>

- Lee, C. K. H., Ho, G. T. S., Choy, K. L., & Pang, G. K. H. (2014). A RFID-based recursive process mining system for quality assurance in the garment industry. *International Journal of Production Research*, 52(14), 4216–4238.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.869632>
- Lin, M. T. (2008). The single row machine layout problem in apparel manufacturing by hierarchical order based genetic algorithm. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 20(5), 258–270. <https://doi.org/10.1108/09556220810898872>
- Lopez-Acevedo, G., & Robertson, R. (Eds.). (2016). *Stitches to riches?: Apparel employment, trade, and economic development in South Asia*. World Bank Publications.
- M'Hallah, R., & Bouziri, A. (2016). Heuristics for the combined cut order planning two-dimensional layout problem in the apparel industry. *International Transactions in Operational Research*, 23(1-2), 321–353. <https://doi.org/10.1111/itor.12104>
- Maul, S. (2020, June 10). Reshoring: COVID-19's impact on the supply chain. *Supply Chain Management Review*.
https://www.scmr.com/article/reshoring_covid_19s_impact_on_the_supply_chain
- Miguel, P. A. C. (2005). Modularity in product development: A literature review towards a research agenda. *Product*, 3(2), 165–174.
- Miller, T. D., & Elgård, P. (1998). Defining modules, modularity and modularization. *Design for Integration in Manufacturing. Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Denmark*.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K.

- (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621-641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Monostori, L. (2018). Cyber-physical systems. In S. Chatti & T. Tolio (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (pp. 1-8). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16790-1
- National Institute of Standard and Technology. (2014, April). *Smart manufacturing operations planning and control program*. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standard and Technology. Retrieved February 6, 2023, from <https://www.nist.gov/programs-projects/smart-manufacturing-operations-planning-and-control-program>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Osterrieder, P., Budde, L., & Friedli, T. (2020). The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 221, Article 107476. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.011>
- Riedl, M., Zipper, H., Meier, M., & Diedrich, C. (2014). Cyber-physical systems alter automation architectures. *Annual Reviews in Control*, 38(1), 123-133.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2014.03.012>
- Sinha, D., & Roy R. (2020). Reviewing cyber-physical system as a part of smart factory in Industry 4.0, *IEEE Engineering Management Review*, 48(2), 103-117.
<https://doi.org/10.1109/EMR.2020.2992606>.

- Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., & Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607–617. <https://doi.org/10.1002/sres.2704>
- Wong, W. K., Chan, C. K., Kwong, C. K., Mok, P. Y., & Ip, W. H. (2005). Optimization of manual fabric-cutting process in apparel manufacture using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(1), 152–158. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2161-0>
- Zeng, X., Wong, W.-K., & Leung, S. Y.-S. (2012). An operator allocation optimization model for balancing control of the hybrid assembly lines using Pareto utility discrete differential evolution algorithm. *Computers & Operations Research*, 39(5), 1145–1159. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.07.020>
- Zheng, P., & Sivabalan, A. S. (2020) A generic tri-model-based approach for product-level digital twin development in a smart manufacturing environment, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 64, Article 101958. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101958>

Abstract

Process Simulation for the Digital Twin System in Apparel Assembly Line

Minsuk Kim

Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design

The Graduate School

Seoul National University

The implementation of smart factories has emerged as a key goal for the Fourth Industrial Revolution. In this study, as a first step to implementing smart factories in apparel manufacturing, an apparel assembly line simulator that can be utilized in a digital twin system was developed for generating automatically a virtual assembly line and simulating a real assembly line.

The mixed task assignment technique was applied to the modular production concept to solve the apparel assembly line balancing problem. Specifically, an algorithm was implemented to generate workstations by first classifying tasks into modules through an analysis of the manufacturing process and assigning grouped tasks in the single task - multiple workers and multiple tasks - single worker assignment methods. Then, worker assignment was sequentially performed considering the skill level of the worker. The total production time required by 41 workers to produce 100 men's shirts

was 85.7% lower than that reported previously. Even when only 31.7% of the workers were assigned to the apparel assembly line, the total production time reduced by 67.3%. The reason for this drastic reduction in the total production time was that in this study, line balancing was performed by sequentially implementing task and worker assignment, unlike previous studies that limited the apparel assembly line balancing problem to worker assignment and did not consider task assignment. Given that the effect of line balancing by task assignment is considerably greater than that based on worker assignment, the apparel assembly line balancing problem in the design stage must not be limited to worker assignment, and task assignment must be simultaneously considered.

Next, the apparel assembly line simulator was developed for generating automatically a virtual assembly line by the mixed work assignment technique and performing simulation using the generated assembly line. A case study was conducted with the process analysis data of the technical jacket obtained from the apparel manufacturing factory to evaluate the developed simulator. As a result of the automatic generation and modification test, the apparel assembly line was generated with line balancing performed at 97.4% of all workstations. The applicability of the simulator developed in various scenarios was examined, and the results also highlighted that the developed simulator could be used for order selection, production planning, and apparel assembly line planning and operation. The developed apparel assembly line simulator automatically replaced the time-consuming handwork such as layout design or assembly line modeling in existing commercial simulation software, so it is expected to have the advantage to respond quickly or to make continuous modifications.

The module-based mixed task assignment technique in this study is effective in solving the line balancing problem, and the developed apparel assembly line simulator is convenient by automatically generating a virtual apparel assembly line but also it can be used to simulate the actual apparel assembly line. In addition, the automatically generated apparel assembly line can be used as a virtual counterpart of the digital twin, and it is expected that a complete digital twin system of the apparel assembly line can be implemented through additional research for monitoring the actual apparel assembly line.

keywords : digital twin, apparel assembly line, line balancing, mixed task assignment technique, apparel assembly line simulator, line operation optimization

Student Number : 2018-38004

부 록

Table A1. Arbitrary skill levels of the workers for each task (Chan et al., 1998)

Task No.	Worker No.																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-	0.215	0.14	0.382	0.19	1.494	1.047	0.849	0.89	0.954	0.659	0.645	0.414	0.354	0.619	0.271	1.147	1.401	0.064	0.937	0.631
2	0.047	0.751	0.943	0.549	1.48	0.945	1.256	1.344	1.203	1.428	0.223	0.954	0.516	0.582	0.124	1.496	1.054	0.419	1.002	0.655	0.228
3	1.292	0.033	0.42	1.256	0.459	1.037	1.128	0.033	1.384	0.748	1.2	1.137	0.372	0.121	1.452	0.826	0.243	0.242	1.001	0.862	0.182
4	0.304	0.889	1.316	0.472	0.082	0.811	1.353	0.384	0.767	0.728	1.309	1.219	0.058	0.793	0.008	0.686	1.386	0.206	0.639	0.454	0.95
5	0.409	0.014	0.242	0.472	0.153	0.146	0.28	1.327	0.99	1.494	0.143	0.684	1.35	0.771	0.281	1.341	0.661	1.488	0.35	1.042	0.457
6	1.007	1.162	0.41	0.985	1.3	1.121	1.163	1.027	1.499	0.359	0.897	0.806	1.034	0.806	0.156	1.232	1.072	0.197	0.87	0.617	0.588
7	0.478	0.976	0.816	1.038	0.832	0.223	0.401	0.048	1.154	0.298	1.199	0.924	0.121	0.336	0.094	0.886	0.837	0.509	0.527	0.135	0.857
8	0.243	1.156	1.441	1.354	1.046	0.349	0.443	0.237	1.074	0.656	0.326	0.462	0.996	0.293	0.955	0.627	0.818	0.232	0.137	1.069	1.279
9	0.558	1.062	0.262	0.478	0.151	1.32	1.054	0.233	1.341	1.034	0.712	0.36	0.022	0.623	0.409	0.448	0.773	0.627	1.284	1.454	1.256
10	0.639	0.836	0.236	0.718	1.003	1.071	0.685	0.619	1.492	1.139	0.606	0.612	0.928	1.455	1.206	1.263	1.099	0.747	0.874	0.324	0.253
11	0.123	0.309	0.402	0.445	0.025	0.658	1.446	0.628	1.099	0.048	0.753	1.087	0.872	0.754	0.178	0.869	1.342	0.155	1.258	1.206	1.115
12	0.712	1.022	0.266	1.15	0.465	1.47	0.283	0.216	1.172	0.919	1.056	0.983	1.156	0.868	1.041	0.422	0.823	0.57	0.037	0.639	1.145
13	0.106	0.889	0.865	1.111	1.356	0.232	0.018	0.006	0.025	1.201	1.171	0.269	0.287	0.557	0.61	0.966	0.905	0.444	1.004	1.055	1.038
14	1.261	1.433	0.747	0.828	0.803	0.059	0.337	0.794	0.549	0.696	0.474	1.441	1.342	0.564	0.733	1.321	1.269	0.412	1.002	1.474	0.244
15	0.09	0.966	0.428	1.085	0.491	0.277	1.349	1.143	0.48	0.253	0.053	0.053	1.217	1.183	0.782	0.38	0.64	0.103	1.269	0.644	0.535
16	0.44	1.498	0.234	0.617	0.664	0.015	0.484	0.856	0.112	0.952	0.907	0.486	0.962	1.372	0.15	0.936	0.032	0.447	0.541	0.052	0.443
17	1.376	0.366	0.915	0.813	1.351	0.568	1.294	0.346	1.176	0.112	0.438	1.342	0.731	1.022	1.407	0.068	1.417	1.263	1.242	1.11	1.386
18	0.552	1.014	1.11	0.894	0.521	0.592	1.145	1.294	0.39	1.443	0.088	0.701	1.172	0.86	0.487	0.711	0.057	0.363	1.207	0.164	0.623
19	1.162	0.444	1.12	1.321	0.531	0.546	1.45	0.093	1.283	1.181	0.699	0.771	1.121	0.791	1.426	1.234	1.099	0.562	1.379	0.892	0.328
20	0.492	0.129	0.121	1.003	0.732	0.123	0.411	0.728	1.377	1.305	0.329	1.316	0.287	1.394	0.411	1.301	1.36	0.877	0.12	0.921	0.363
21	1.047	0.158	0.114	0.169	0.107	0.681	0.594	0.113	0.073	0.645	0.126	1.01	0.567	0.343	1.19	0.332	0.389	0.085	0.397	1.344	0.055

Table A1 continued.

Task No.	Worker No.																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	1.266	0.743	0.09	0.708	1.276	0.757	1.254	0.551	1.341	0.009	0.983	0.622	1.359	0.034	1.283	1.467	0.966	0.396	0.773	0.914	1.295
23	1.077	1.323	0.16	0.605	1.14	0.691	0.031	0.996	1.386	0.333	1.284	0.874	0.79	1.469	0.631	1.003	1.401	0.591	1.12	1.159	1.257
24	0.46	0.765	1.193	0.172	0.271	1.013	0.37	0.309	0.732	0.866	0.514	0.217	1.312	0.743	0.756	1.051	1.173	0.114	1.167	0.479	0.022
25	0.244	0.86	1.209	0.081	1.384	1.226	0.079	1.206	1.034	1.324	0.458	1.463	1.092	1.456	0.429	0.402	0.085	1.146	0.675	0.938	0.276
26	0.494	1.43	0.572	0.823	0.74	0.85	0.762	0.782	0.567	0.088	0.707	0.706	0.448	0.31	1.089	1.359	0.144	0.623	0.582	1.307	0.786
27	0.699	1.027	0.918	1.01	0.191	0.38	0.634	0.628	0.633	0.711	1.375	0.23	0.89	1.24	0.502	0.354	0.539	0.045	0.255	0.408	0.425
28	0.37	0.508	0.655	0.121	1.339	0.559	0.001	0.059	1.12	1.397	1.085	0.47	0.163	0.143	0.639	0.718	1.323	1.069	1.337	0.392	9.44
29	1.239	0.011	1.111	1.383	0.605	0.874	0.225	1.488	1.044	1.305	0.615	0.921	0.517	0.649	0.648	0.529	0.305	0.773	0.709	0.109	0.82
30	0.419	1.058	0.741	1.258	0.311	1.312	1.064	0.241	0.512	1.289	0.126	1.225	0.53	0.092	1.46	1.212	1.417	0.664	0.211	0.567	0.843
31	0.723	1.483	0.512	1.022	1.211	0.912	0.469	0.07	0.944	1.082	1.213	0.725	0.634	1.497	0.542	0.912	0.88	1.088	1.393	0.017	0.695
32	0.224	1.161	1.228	1.391	0.881	0.386	0.593	0.088	0.765	1.472	0.378	0.203	0.86	0.577	0.879	0.037	1.479	0.006	0.931	0.488	1.181
33	1.312	1.124	1.226	0.416	0.165	1.045	0.822	0.152	1.453	0.319	0.055	0.698	1.371	1.057	1.065	0.624	1.188	0.144	0.887	1.328	0.269
34	0.431	0.297	0.212	1.051	0.935	0.837	0.391	1.205	0.152	0.231	0.522	0.216	1.019	1.298	0.724	0.344	0.58	0.36	0.135	0.265	1.092
35	1.159	0.215	0.14	1.102	1.392	1.318	0.227	1.432	1.485	0.992	1.327	0.496	1.107	1.231	0.263	0.736	0.039	0.793	0.67	0.108	0.37
36	1.465	1.37	0.101	0.75	0.811	0.541	0.439	0.173	0.036	1.238	1.291	0.994	1.483	0.591	0.487	0.768	0.034	1.211	0.055	1.307	0.246
37	0.739	1.176	0.09	0.996	0.489	0.546	0.115	0.32	0.925	0.285	0.657	1.233	0.537	0.983	0.627	0.377	0.911	0.933	1.047	0.563	1.326
38	1.332	0.884	0.291	0.237	0.672	0.933	1.058	1.145	0.534	0.026	0.376	1.285	0.143	0.413	0.725	0.83	1.182	0.395	0.204	0.235	1.345
39	1.241	1.297	1.009	0.345	0.34	1.17	0.495	1.47	0.766	1.225	0.632	0.233	0.601	1.298	0.534	0.906	0.704	1.255	0.29	0.388	0.139
40	0.03	1.034	0.341	1.42	0.277	0.686	1.184	0.746	0.969	0.841	0.553	0.265	0.416	0.273	0.698	0.504	0.76	0.715	0.149	0.709	0.389
41	0.212	0.432	0.856	0.547	1.036	0.308	0.983	0.048	1.215	0.703	0.976	1.121	1.384	0.549	0.096	0.859	1.109	0.684	0.525	1.368	1.341

Table A1 continued.

Task No.	Worker No.																			
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
1	1.037	0.017	0.357	0.653	1.156	0.359	0.773	1.221	1.416	1.47	0.278	0.696	1.173	0.475	0.441	1.194	0.967	0.907	0.564	0.788
2	0.182	0.391	0.6	0.199	0.592	0.989	1.471	1.304	0.039	1.129	1.431	0.724	0.438	0.275	0.173	1.053	0.293	1.143	0.138	0.81
3	0.627	0.295	0.155	0.77	1.212	0.392	0.715	0.276	0.121	0.215	1.447	0.644	0.69	1.44	0.22	1.497	1.115	1.017	0.979	1.361
4	0.647	1.477	1.013	1.174	1.114	0.756	0.585	1.433	0.171	0.516	0.777	1.269	1	0.56	1.057	0.698	1.498	1.082	0.486	0.601
5	0.649	1.439	0.051	1.062	1.462	1.128	0.491	0.118	0.135	1.344	0.404	1.067	0.134	1.333	0.892	1.124	1.23	0.934	0.062	0.594
6	1.177	1.216	0.991	0.333	0.546	1.223	0.178	0.968	0.351	0.331	1.007	0.044	0.381	0.018	0.422	0.365	1.019	0.967	1.129	0.641
7	1.33	0.224	1.466	0.649	1.173	1.101	0.163	0.947	0.998	1.48	1.097	0.306	0.111	0.134	1.315	0.06	0.216	0.02	1.283	0.258
8	0.621	0.781	1.079	1.454	0.301	1.464	0.037	0.786	0.818	0.557	1.072	0.653	0.16	0.939	1.147	0.943	0.885	1.24	1.433	0.989
9	1.337	0.43	1.039	1.126	1.426	1.362	1.072	0.108	1.002	0.789	0.651	1.23	1.375	0.879	0.861	1.106	0.183	0.59	1.39	0.521
10	0.852	0.905	0.826	1.213	0.547	1.132	0.502	1.264	0.966	0.054	0.288	0.364	0.571	0.945	1.049	0.08	1.479	0.292	0.033	0.554
11	0.015	0.763	0.502	0.623	1.39	0.245	0.969	0.23	0.524	0.594	1.19	1.427	1.465	0.99	0.268	0.693	1.48	0.994	0.61	0.453
12	1.32	0.468	1.014	0.01	0.416	0.666	0.519	1.04	0.552	0.194	0.185	0.359	0.767	0.115	0.51	1.158	1.471	0.999	1.034	1.284
13	0.873	0.489	0.836	1.397	0.557	0.242	0.349	0.25	1.397	0.227	1.451	0.657	0.279	1.208	1.181	0.706	0.215	1.455	0.382	0.365
14	0.593	1.17	0.551	0.813	1.403	0.266	0.217	1.203	0.664	1.011	0.455	0.156	1.355	0.628	0.787	0.104	0.483	0.158	1.291	0.481
15	1.394	0.125	0.488	0.701	0.813	1.409	0.209	0.882	0.664	1.29	0.825	0.153	0.229	0.532	0.7	0.989	0.421	1.456	0.159	1.457
16	1.371	1.027	0.594	0.697	0.404	0.099	1.064	0.134	1.146	0.587	1.168	0.125	1.091	1.153	0.624	0.226	1.298	0.107	0.381	0.902
17	0.866	1.336	0.145	0.816	0.634	0.173	1.342	0.611	1.096	0.015	1.478	0.772	0.75	0.965	0.749	0.586	0.505	1.25	0.134	0.132
18	0.975	0.069	0.436	1.241	0.413	1.338	0.835	0.085	0.519	1.425	0.081	0.035	0.624	0.007	0.787	0.151	0.909	0.192	0.669	1.231
19	0.583	0.586	1.19	0.149	1.084	1.221	0.084	1.346	0.87	0.488	0.517	0.83	0.415	1.16	0.812	0.629	0.979	0.284	1.286	0.373
20	0.186	1.365	0.804	0.078	1.319	1.338	0.493	1.128	1.397	1.469	0.981	0.696	0.555	1.164	0.861	0.253	0.418	0.85	0.005	1.258
21	0.131	0.721	0.819	0.95	0.805	0.358	1.403	1.353	1.336	0.66	0.625	0.45	1.332	0.956	0.387	0.861	0.189	0.975	0.164	0.561

Table A1 continued.

Task No.	Worker No.																			
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
22	1.491	0.622	0.045	0.265	1.275	0.121	0.456	0.715	0.621	0.628	0.185	0.026	0.858	0.977	0.575	0.787	1.447	0.844	0.69	1.409
23	0.772	1.198	1.011	0.014	0.099	0.993	0.948	1.251	0.711	0.937	0.759	0.259	1.295	1.238	0.462	0.513	0.756	0.589	0.443	0.396
24	1.45	0.136	0.752	1.055	0.301	1.297	1.487	0.249	0.394	0.172	1.233	0.588	0.004	0.572	0.771	0.211	1.225	0.165	1.461	1.317
25	0.416	1.02	0.474	1.329	0.717	1.216	0.101	0.66	0.447	0.827	0.713	1.481	1.325	0.879	0.28	1.426	0.3	1.364	0.866	1.011
26	0.603	1.305	0.443	1.221	1.134	1.085	0.874	0.808	0.629	0.621	0.929	0.171	0.57	0.039	0.908	0.85	0.194	0.175	0.595	0.63
27	1.008	0.423	0.845	0.078	0.285	0.051	1.131	0.304	0.688	0.182	0.795	0.143	0.667	0.02	0.726	0.271	1.024	0.279	0.762	1.293
28	0.705	0.195	0.326	0.21	1.137	1.129	0.592	0.383	0.776	1.202	0.413	1.381	0.709	0.974	0.808	1.074	0.662	1.257	0.679	0.498
29	0.097	1.364	0.789	1.287	1.147	0.784	1.281	1.31	1.398	0.142	0.713	1.2	0.596	0.535	0.159	1.333	1.077	0.896	1.324	1.156
30	0.125	1.217	1.359	0.038	1.161	0.425	0.516	0.657	1.43	0.139	0.901	1.459	0.8	1.432	0.852	0.609	0.61	1.465	1.032	0.753
31	1.138	0.13	0.646	1.402	1.027	0.052	0.895	0.577	1.041	0.521	1.307	0.13	1.34	0.948	0.06	0.456	0.05	0.776	1.284	0.978
32	0.224	0.367	0.965	0.011	1.012	1.12	0.415	1.026	0.409	0.357	1.271	1.459	1.435	0.953	1.023	1.262	0.993	0.465	1.478	1.108
33	1.318	1.43	0.409	0.157	0.996	0.606	0.073	0.11	0.496	0.683	0.159	0.849	0.209	1.309	1.274	0.652	0.625	0.515	0.373	1.293
34	0.317	0.587	0.861	1.483	0.412	0.039	0.646	0.068	1.02	0.124	1.305	0.823	0.649	0.029	0.767	0.875	0.226	0.332	1.04	0.239
35	0.827	1.281	1.082	0.435	0.497	0.505	0.757	0.065	0.204	1.062	0.144	1.106	0.368	0.297	0.52	1.01	0.648	0.202	0.152	0.21
36	0.237	1.168	0.316	1.427	0.361	1.061	1.142	0.123	0.324	0.732	1.335	0.489	0.771	1.07	0.584	0.548	0.225	1.461	1.477	0.835
37	0.921	1.416	0.74	0.003	0.363	1.489	0.022	0.748	0.327	1.41	0.769	0.122	0.837	1.022	0.547	1.156	1.274	1.046	0.712	0.984
38	0.959	0.158	0.985	0.093	0.613	0.85	0.169	1.395	0.631	0.911	1.246	0.13	1.259	0.167	0.781	0.676	1.349	1.314	1.273	1.106
39	1.429	0.001	0.483	0.099	1.094	0.554	1.28	0.286	0.947	0.779	0.544	0.559	0.947	0.977	0.406	0.044	0.247	0.724	0.528	1.279
40	1.469	0.423	0.894	0.363	0.668	0.445	0.89	0.081	0.092	1.341	0.957	1.299	0.284	1.133	1.405	0.963	0.102	1.274	0.555	0.225
41	0.399	1.066	0.801	0.456	0.305	1.395	0.874	1.006	0.426	1.169	1.207	1.201	0.817	1.192	0.729	1.003	0.368	0.712	1.234	0.577

Table A2. Process analysis data of technical jacket A

Module	SQ	Tasks	M/C	SAM	
Part	31	Sew side facing placket inside	S/N	3.4s	
	32	Join facing to placket inside	S/Nc	59.1s	
	33	Turn placket inside	Hp	18s	
	34	Topstitch placket inside	S/N	43.0s	
	35	Stitch close placket inside	S/N	33.9s	
	36	Attach zipper center front to placket inside	S/N	60.9s	
	37	Marking facing placket outside	Hp	10.8s	
	38	Marking placket outside	Hp	14.4s	
	39	Punch hole on facing placket outside 4 ea	Hp	12s	
	40	Attach snap to facing placket outside 4 ea	Snap	60s	
	41	Topstitch variation on placket outside (>) 4 ea	S/N	32.0s	
	42	Join facing to placket outside	S/Nc	66s	
	43	Turn Placket outside	Hp	15s	
	44	Topstitch placket outside	S/N	48s	
	45	Stitch close placket outside	S/N	33.9s	
	46	Punch hole on placket outside 2 ea	Hp	6s	
	47	Attach snap to placket outside 2 ea	Snap	30s	
	48	Attach zipper extention to placket outside	S/Nc	57.4s	
	52	Marking facing cuff tabs	Hp	6s	
	53	Attach velcro to facing cuff tabs 2 ea	Velcro	12.3s	
	54	Join facing to cuff tabs	S/Nc	33.7s	
	55	Turn cuff tabs	Hp	18s	
	56	Topstitch cuff tabs	S/N	24.5s	
	57	Stitch close cuff tabs	S/N	6.6s	
	Hood	1	Marking center front facing hood side upper	Hp	7.2s
		2	Marking center front facing hood side lower	Hp	3.6s
		3	Attach cx-3 to center front facing hood upper	S/N	9.4s
9		Sewside center front facing hood side upper to center front facing hood side lower	S/Nc	6.6s	
10		Sewside center front facing hood upper to center front facing hood side	S/Nc	6.6s	
4		Punch hole on center front facing hood side upper	Hp	6s	
5		Attach eyelet to center front facing hood side upper	Eyelet	18s	
6		Punch hole on center front facing hood side lower	Hp	6s	
7		Attach eyelet to center front facing hood side lower	Eyelet	18s	
8		Attach buckle to center front facing hood side upper	S/N	4.3s	
11		Overlock hood side lining to hood center lining	4 O/L	47.1s	
12		Overlock arround hood lining	4 O/L	23.9s	
14		Overlock close inside tunnel hood	4 O/L	12.2s	
13		Stitch fold inside tunnel hood	S/N	8.2s	
15		Attach inside tunnel hood to center front facing hood	S/N	19.4s	
16		Join center front facing hood to hood lining	S/N	38.2s	

Table A2 continued.

	19	Join hood side to hood center	S/Nc	76.1s
	20	Join hood side to hood tabs	S/Nc	21.8s
	192	Hood	S/S	76.5s
	22	Assembly hood	S/N	63.9s
	23	Topstitch after assembly hood	S/N	28.9s
	24	Insert string to center front hood	Hp	18s
	25	Stitch end tacking to string	S/N	21s
	26	Stitch end tacking string to center front hood	S/N	18s
	27	Stitch end string to center front hood on center	S/N	12s
	28	Stitch end tacking on hood 2 ea	S/N	12s
	29	Turn hood	Hp	18s
	156	Marking sleeve back lining	Hp	3.6s
	157	Join dart sleeve back lining 2 ea	S/N	15s
	158	Overlock sleeve front lining to sleeve back lining	4 O/L	69.3s
	146	Marking back mesh upper lining	Hp	4.8s
	147	Marking back lower lining (side R&L)	Hp	1.8s
	148	Attach hanger loop to back mesh upper lining	S/N	3.8s
	149	Topstitch hanger loop + back mesh upper lining	S/N	3.1s
	150	Bactack hidden hanger loop + back mesh upper lining	S/N	12s
	151	Attach main label to back mesh upper lining	S/N	13.2s
	152	Overlock sewside back lower lining	4 O/L	25.4s
	153	Overlock back upper lining to back lower lining	4 O/L	22.5s
	154	Join care label	S/N	15s
	155	Attach care label to back lining	S/N	2.6s
	142	Marking front lining	Hp	14.2s
	126	Cut woven tape	Hp	6s
Lining	127	Stitch close woven tape	S/N	8.6s
	134	Overlock basic inside pocket bag top	4 O/L	24.2s
	135	Overlock basic inside pocket bag under	4 O/L	24.2s
	128	Stitch end zipper	S/N	3s
	129	Attach woven tape to zipper	S/N	8.6s
	130	Attach woven tape&zipper to front lining	S/N	12s
	131	Cut opening on front lining	Hp	15s
	132	Join woven tape&zipper to front lining	S/N	24.8s
	136	Attach inside pocket bag top to zipper	S/N	8.6s
	137	Attach inside pocket bag under to zipper	S/N	8.6s
	133	Topstitch woven tape&zipper + front lining	S/N	18s
	138	Stitch end inside pocket bag on edge	S/N	8.6s
	139	Overlock close inside pocket bag	4 O/L	18.2s
	143	Button hole on front lining 4 ea	N/I	60s
	160	Join sleeve lining to front lining	S/N	36s
	161	Overlock sleeve lining + front lining	4 O/L	22.5s
	162	Join sleeve lining to back lining	S/N	39.8s
	140	Stitch end tacking inside pocket bag to front lining	S/N	6s

Table A2 continued.

	163	Overlock sleeve lining + back lining	4 O/L	24.9s
	144	Overlock side seam lining	4 O/L	83.4s
	159	Overlock basic lower sleeve lining until gusset	4 O/L	40.8s
	145	Overlock around body lining	4 O/L	94.1s
	141	Bartack lip 2 ea	B/T	10.0s
Front	164	Marking front lower	Hp	24.8s
	107	Stitch close lips	S/Nc	30.4s
	117	Overlock facing + hand pockets bag top	4 O/L	16.5s
	119	Overlock facing + hand pockets bag under	4 O/L	16.5s
	116	Topstitch facing to hand pockets bag top	S/N	26.4s
	118	Topstitch facing to hand pockets bag under	S/N	26.4s
	108	Stitch end zipper	S/N	6s
	109	Join frame to zipper	S/N	22.1s
	120	Attach hand pockets bag top to zipper	S/N	22.1s
	110	Topstitch frame + zipper	S/N	22.1s
	111	Attach lips to frame&zipper	S/N	22.1s
	112	Attach lips&frame&zipper to front lower on edge	S/N	24s
	121	Attach hand pockets bag under to zipper	S/N	22.1s
	113	Cut opening on front lower	Hp	30s
	114	Join lips&frame&zipper to front lower	S/N	61.4s
	115	Topstitch lips&frame&zipper + front lower	S/N	44.6s
	122	Stitch end hand pockets bag on edge	S/N	17.3s
	123	Overlock close hand pockets bag	4 O/L	42.9s
	125	Bartack lip 4 ea	B/T	50.0s
	165	Join front upper to front lower	S/Nc	33.7s
	196	Front	S/S	23.5s
	199	Hand pockets	S/S	51.5s
	66	Stitch fold inside tunnel hem front	S/N	9.6s
	67	Overlock close inside tunnel hem front	4 O/L	19.1s
	69	Stitch fold inside tunnel hem back	S/N	10.6s
	70	Overlock close inside tunnel hem back	4 O/L	19.7s
Back& Sleeve	87	Marking facing vent	Hp	3.6s
	170	Marking back lower (side R&L)	Hp	16.3s
	171	Marking back flange	Hp	7.2s
	172	Join back frame upper mesh to back mesh	S/N	10.8s
	173	Overlock back frame upper mesh + back mesh	4 O/L	6.8s
	174	Topstitch back frame upper mesh + back mesh	S/N	8.8s
	175	Join back frame side mesh to back mesh	S/N	27.4s
	176	Overlock back frame side mesh + back mesh	4 O/L	17.1s
	177	Topstitch back frame side mesh + back mesh	S/N	22.2s
	178	Sewside back lower	S/Nc	39.9s
	197	Back	S/S	40.3s
	179	Stitch fold back flange	S/N	25.7s
180	Join back mesh to back lower	S/N	25.7s	
181	Overlock back mesh + back lower	4 O/L	16.1s	

Table A2 continued.

	182	Topstitch back mesh + back lower	S/N	20.9s
	183	Attach back flange to back	S/N	39.6s
	184	Stitch end back flange to back	S/N	19.5s
	185	Bartack back flange 3 ea	B/T	15.0s
	186	Marking sleeve front	Hp	42s
	187	Marking sleeve back	Hp	48s
	59	Marking cuffs	Hp	6s
	60	Attach velcro to cuffs 2 ea	Velcro	18.3s
	61	Join facing cuffs to cuffs	S/Nc	35.0s
	188	Join dart sleeve back 2 ea	S/Nc	13.9s
	189	Join sleeve front to sleeve back	S/Nc	109s
	62	Join cuffs to lower sleeve	S/Nc	39.6s
	198	Sleeve + velcro	S/S	95.2s
	82	Join facing to gusset	S/N	38.9s
	58	Attach cuff tabs to cuffs	S/Nc	11.2s
	83	Attach gusset to sleeve on edge upper	S/N	12s
	84	Cut opening on sleeve	Hp	30s
	85	Join gusset to sleeve	S/Nc	53.5s
	201	Cuffs	S/S	26.1s
	202	Gusset on sleeve	S/S	40.3s
	63	Stitch end cuffs on edge	S/N	18.2s
	64	Stitch close cuffs	S/N	28.8s
	65	Topstitch cuffs on upper	S/N	38.9s
	86	Bartack gusset 2 ea	B/T	10.0s
	190	Join sleeve front to front	S/Nc	49.5s
	191	Join sleeve back to back	S/Nc	56.1s
	194	Armhole	S/S	79.8s
	166	Join side seam	S/Nc	132s
	195	Side seam	S/S	116s
	97	Marking waist	Hp	10.8s
	98	Button hole on waist 6 ea	N/I	90s
	99	Join facing to tunnel waist	S/Nc	79.5s
	105	Stitch close waist	S/Nc	47.0s
	100	Attach tunnel waist to body	S/N	57.8s
Join	106	Sitch close waist to body	S/N	57.8s
	203	Waist	S/S	98.9s
	101	Insert string to buckle big&small	Hp	24s
	102	Insert string to waist	Hp	24s
	103	Stitch end tacking to string	S/N	21s
	104	Stitch end tacking string to waist	S/N	18s
	21	Join hood to body	S/Nc	52.8s
	193	Neckline	S/S	49.8s
	49	Join placket outside to front	S/Nc	57.4s
	50	Topstitch placket outside + front	S/N	33.9s
	200	Placket outside	S/S	36.0s

Table A2 continued.

	167	Attach zipper center front to center front	S/N	134s
	168	Punch hole on front 6 ea	Hp	18s
	169	Attach snap to front 6 ea	Snap	90s
	72	Sewside facing hem	S/Nc	7.3s
	73	Overlock basic facing hem	4 O/L	37.1s
	74	Join facing hem to lower body	S/Nc	81.5s
	75	Topstitch facing hem + lower body	S/N	48.2s
	89	Sewside facing vent	S/Nc	3.6s
	90	Join facing vent to vent	S/N	20.4s
	68	Attach inside tunnel hem to facing hem front	S/N	30.5s
	71	Attach inside tunnel hem to facing hem back	S/N	31.4s
	91	Stitch close facing vent + vent	S/N	14.4s
	93	Stitch end vent top to under	S/N	6s
	80	Stitch end hem on edge	S/N	10.6s
	76	Insert string to buckle big&small	Hp	24s
	77	Insert string to hem	Hp	24s
	78	Stitch end tacking to string	S/N	21s
	79	Stitch end tacking string to hem	S/N	18s
	51	Bartack placket outside 2 ea	B/T	10.0s
	205	Crossbar all	C/B	220s
	17	Join hood lining to body lining	S/N	33.4s
	18	Overlock hood lining + body lining	4 O/L	20.9s
	206	Stitch end tacking on neckline 3 ea	S/N	18s
	207	Stitch end tacking on armpit 2 ea	S/N	12s
	214	Assembly zipper center front	S/N	150s
	124	Stitch end tacking hand pockets bag to front 4 ea	S/N	24s
	208	Assembly cuffs	S/N	51.8s
	209	Assembly gusset on sleeve	S/N	70.0s
	210	Stitch end tacking on sleeve 2 ea	S/N	12s
	211	Stitch end tacking on side seam 2 ea	S/N	12s
Assembly	212	Assembly vent on back	S/N	32.0s
	88	Cut opening on back	Hp	15s
	215	Turn jacket	Hp	45s
	216	Topstitch zipper center front + center front	S/N	83.5s
	81	Topstitch hem	S/N	59.3s
	92	Topstitch shape vent	S/N	20.4s
	213	Topstitch after assembly vent on back	S/N	14.4s
	30	Topstitch shape on center front hood	S/N	50.5s
	217	Bartack zipper c f 2 ea	B/T	10.0s
	94	Bartack vent 1 ea	B/T	5.0s
	95	Punch hole on vent 2 ea	Hp	6s
	96	Attach snap to vent 2 ea	Snap	30s

Note. S/N: Single Needle, S/Nc: Single Needle cut, Hp: handwork, 4 O/L: Overlock, S/S: Seam Sealing, B/T: Bartack, N/I: straight-button hole, C/B: crossbar

Table A3. Two apparel assembly line with 28 workers

Module	Work station	Assembly line 2		Assembly line 3	
		Grouped tasks	Worker No.	Grouped tasks	Worker No.
Collar	1	1-2-3-4(20)*	9	1-2-3-4(17)	33
	2	4(14)-5-6-7(13)	16	4(11)-5-6-7(11)	27
	3	7(21)-8-9	36	7(17)-8-9	24
	4	10-11-12	14	10-11-12	12
Torso	5	13-14-15-16-17(21)	19	13-14-15-16-17(18)	25
	6	17(13)-18-19-20(5)	4	17(10)-18-19-20(4)	7
	7	20(29)-21-22-23	20	20(24)-21-22-23	29
Sleeve	8	25-26-27(35)	2	25-26-27(10)	8
	9	27(65)-28-29	10	27(18)-28-29	38
Cuff	10	34-35-36	5	34-35-36	37
	11	37-38-39	41	37-38-39	31
Join	12	24-30	3	24-30	15
	13	31-32-33(22)	34	31-32-33(18)	21
	14	33-(12)-40-41	39	33(10)-40-41	18

Note. The number in () means the workload of each worker in the shared work.