

# Analysis of Workforce Scheduling Using Adjusted Man-machine Chart and Simulation

Hyowon Choi · Heejae Byeon · Suhan Yoon · Bosung Kim<sup>†</sup> · Soondo Hong

Department of Industrial Engineering, Pusan National University

## 보완 다중 활동 분석표와 시뮬레이션을 이용한 작업자 운영 전략 분석

최효원 · 변희재 · 윤수한 · 김보성<sup>†</sup> · 홍순도

부산대학교 산업공학과

Determining the number of operators who set up the machines in a human-machine system is crucial for maximizing the benefits of automated production machines. A man-machine chart is an effective tool for identifying bottlenecks, improving process efficiency, and determining the optimal number of machines per operator. However, traditional man-machine charts are lacking in accounting for idle times, such as interruptions caused by other material handling equipment. We present an adjusted man-machine chart that determines the number of machines per operator, incorporating idleness as a penalty term. The adjusted man-machine chart efficiently deploys and schedules operators for the hole machining process to enhance productivity, where operators have various idle times, such as break times and waiting times by forklifts or trailers. Further, we conduct a simulation validation of traditional and proposed charts under various operational environments of operators' fixed and flexible break times. The simulation results indicate that the adjusted man-machine chart is better suited for real-world work environments and significantly improves productivity.

**Keywords :** Human-Machine System, Manufacturing, Man-Machine Chart, Simulation, Scheduling

### 1. 서 론

제조 시스템 분야에서 지난 반세기 동안 이루어진 자동화 기술의 발전은 인간 작업자를 대체하여 시간과 비용을 최소화하고 생산성 극대화를 가능하도록 하였다. 하지만 여전히 자동화 시스템의 운용에서 작업자의 역할을 완전히 배제하는 것은 기술적, 경제적 이유로 불가능하며[3], 작업자의 숙련도와 역량에 따라 제품 품질과 생산시스템

효율이 결정된다는 점에서 자동화 설비만큼 작업자의 역할이 중요하다[10]. Vineyard et al.[15]에 따르면 실제 자동화 시스템 운영 시 발생하는 전체 고장 및 불량 중 40%가 설비가 아닌 인간 작업자에 기인하며 Shin et al.[12]는 연구를 통해 인간-기계 간 상호작용 시스템을 설계 할 때 인간의 개입 시점과 위치를 불분명하게 정의하는 것이 자동화 시스템에서 발생하는 문제의 원인을 밝힌다. 실제로 자동화 설비를 갖춘 가공 공정에 존재하는 설비 착탈 (Loading/unloading), 공구 교체(Set up), 기계 정비 및 수리 등의 작업은 설비에 작업자의 개입이 필요한 작업에 해당하며 설비가 필요로 하는 시점에 작업자가 빠르게 투입된다면 설비의 불필요한 유휴시간을 줄이고 생산성을 향상

Received 20 January 2024; Finally Revised 21 February 2024;  
Accepted 21 February 2024

<sup>†</sup> Corresponding Author : ksung505@gmail.com

시킬 수 있다. 이처럼 효과적인 자동화를 위해 설비와 작업자의 상호 보완적인 협력이 필수적이다.

작업자와 기계가 동시에 고려되는 상황을 분석하기 위해 널리 사용되는 기법 중 하나는 작업자 다중 활동 분석표(Man-machine chart, M-M Chart)이다. 작업자 한 명이 동일한 복수의 기계를 담당할 때 비용이 최소가 되도록 하는 적정 기계 대수를 구하는데 이용되는 방법으로 한 명의 작업자가 담당하는 기계대수가 증가하면 작업자가 바쁜 반면에 기계에 유휴시간이 발생하며, 역으로 기계대수가 감소하면 기계의 가동률은 증가하는 반면 작업자에게 유휴시간이 발생하는 원리를 이용한다[8, 12]. 하지만 해당 이론은 불필요한 유휴시간이 존재하지 않는 이상적인 근무 환경을 가정하는 이론으로 다양한 변수에 의해 작업자의 유휴시간이 발생하는 실제 작업 환경에서는 적용하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 ‘유휴 지수’로 정의된 가중치를 도입하여 작업자에게 복수의 유휴시간이 존재하는 작업환경에서 적용 가능한 보완 다중 활동 분석표를 제안하고 시뮬레이션을 이용하여 이를 검증한다.

본 연구에서는 보완 다중 활동 분석표와 시뮬레이션을 이용하여 반자동화 공정을 사용하는 중소기업 'G'사의 적정 작업자 수와 근무 스케줄을 도출하여 생산성 향상에 기여하고자 한다.

2장에서는 선행 연구를 소개하고, 3장에서는 연구 대상 시스템의 운영 환경과 문제 상황을 설명한다. 4장에서는 보완 다중 활동 분석표를 제시한다. 5장에서는 보완 다중 활동 분석표 검증 및 작업자 근무 스케줄 연구를 위한 시뮬레이션 모델링과 실험 설계 내용을 서술하고 6장에서 실험 결과를 설명한다. 마지막으로 7장에서 본 연구를 통한 결론을 도출한다.

## 2. 문헌 연구

작업자 운영 전략에 따른 공정의 생산성을 분석한 선행 연구들을 소개한다. Turgut[14]는 휴식 및 점심시간을 비롯한 여러 번의 작업자 휴게시간 범위를 가질 때 최적 스케줄링을 위해 적은 수의 변수와 컴퓨터 메모리를 사용하는 정수계획 모델을 제시한다. Asefeh et al.[2]은 혼합 모델 조립 라인(Mixed model assembly lines)에 최소한의 인원이 근무할 때 원하는 생산량을 달성할 수 있는 휴게시간을 포함한 스케줄링 방법론을 제시한다. Álvarez et al.[1]은 휴리스틱 방법과 혼합정수계획 모델을 이용하여 수요의 계절성을 가지는 서비스업에 매 월 근무하는 직원 수가 초과(Overstaffing)하거나 부족한 현상(Understaffing)을 최소화하는 스케줄링 방법론을 제시한다. Pandey et al.[11]에서는 모든 교대 작업에 대해 최적 스케줄을 찾을 수 있

는 혼합정수계획 모델을 제안하고 초과 인력 및 과소 조정 비용을 최소화하는 인력 수준을 도출하는 휴리스틱 방법론을 제시한다.

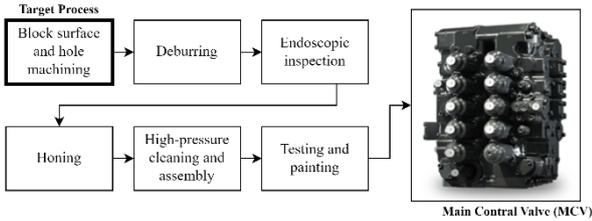
다음으로 설비의 생산성 개선을 위해 시뮬레이션 방법론을 활용한 연구들을 소개한다. Moon et al.[9]에서는 작업자 사이의 부하 균형을 고려하여 작업자-기계 작업의 최적 할당방법을 찾고 Tack Time 감소, 검사 빈도 증가를 통해 생산성을 증가시키는 방법을 제시한다. Cheon et al.[4]에서는 시뮬레이션을 이용하여 자동차 부품 생산 라인의 생산성 향상을 위해 자동화 조립 라인을 이용한 최적의 레이아웃 배치를 제시한다. Choi et al.[5]에서는 국내 제조사를 대상으로 시뮬레이션 기법을 활용하여 현장 상황을 모델링하여 문제점을 파악하고 개선 방안 및 설비 추가 도입에 따른 경제성 분석을 실시하여 생산 환경 개선 및 기업의 유연성을 높일 수 있는 방법을 제시한다. Kang et al.[6]에서는 시뮬레이션을 이용하여 다품종 소량 생산 의류기업체를 대상으로 주문생산만으로 정시에 제품을 공급할 수 있는 공정 스케줄링 모델을 제시한다. Kim et al.[7]은 다품종 조립라인의 부품 공급을 위한 자동화 물류창고의 최적 운영 대안을 시뮬레이션 실험을 통해 제시한다.

기존의 연구들은 주로 최적 작업자 수를 결정하거나, 이미 정해진 작업자 수에 맞춰 작업자 스케줄링을 위한 수학적 모델을 제시하는데 중점을 둔다. 본 연구는 작업자 수 결정에 작업자 휴게시간과 물류 설비 운영으로 인한 유휴시간 등을 고려하는 보완 다중 활동 분석표를 제시한다. 또한 작업자가 여러 휴게시간을 가질 때 작업자 수, 근무 방식, 휴게시간 스케줄을 포괄적으로 고려하는 시뮬레이션 연구를 통해 다양한 운영 전략을 분석한다. 이는 작업자 개입이 필요한 자동화 시스템에서의 작업자 운영 전략에 관한 국내 선행 연구가 부족한 상황에서 국내 제조업 연구 대상으로 하여 문제 해결에 기여한다는 점에서 의의가 있다.

## 3. 문제 정의

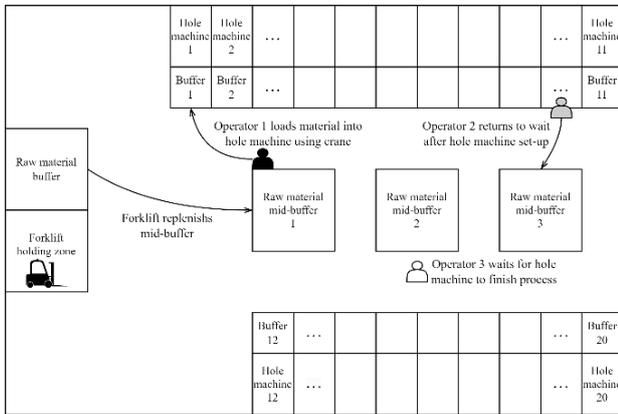
### 3.1 연구 대상 시스템 프로세스

자동차 부품 제조 기업인 G사는 건설 차량의 작동 동력인 유압을 제어하는 장치 MCV(Main Control Valve)를 생산한다. 생산 공정은 표면 가공(Milling), 홀 가공(Drilling), 이물질 제거(Deburring), 내시경 검사(Endoscopic Inspection), 호닝 가공(Honing), 고압 세척(Cleaning), 조립(Assembly), 검사 및 도장(Testing and Painting) 순서로 진행된다. 본 연구는 전체 공정 완료 소요 시간 중 가장 큰 비율을 차지하는 홀 가공 공정을 대상으로 한다.



<Figure 1> MCV Production Process

홀 가공 작업 구역에는 20대의 머시닝 센터(Machining center)와 3개의 중간 버퍼(Mid-buffer)가 <Figure 2>와 같이 배치 되어있다. 지게차가 창고(Raw material buffer)로부터 원자재를 중간 버퍼로 운반한다. 작업자는 머시닝 센터의 착탈 작업과 오버 헤드 크레인(Over head crane)을 이용하여 중간 버퍼에서 센터까지 원자재의 운반과 투입을 담당한다. 각 센터는 홀 가공이 끝난 부품을 담은 버퍼(이하 ‘후 버퍼’)를 가지며 해당 재공품은 모든 후 버퍼가 차면 트레일러(Trailer)에 의해 다음 공정으로 운반된다. 홀 가공 공정은 9시부터 18시까지 운영(이하 ‘9 To 6’)되며 원청 업체의 생산 요구량이 많을 시 작업자 3교대와 24시간 운영(이하 ‘24’)으로 전환하여 생산요구량에 대응한다. 현재 G사는 모든 작업자들이 동시에 식사 및 휴식 시간을 가지는 휴게시간 고정근무제를 적용하고 있다.



<Figure 2> Layout of Hole Machining Area and Material Flow

홀 가공 공정에서 발생하는 작업 별 소요시간은 다음과 같으며 홀 가공 공정의 운영 정보를 <Table 1>에 나타낸다.

3.1.1 원재료 운반

지게차가 원재료를 창고에서 중간 버퍼까지 운반한다. 중간 버퍼가 전부 비었을 때 안쪽 중간 버퍼부터 6개 또는 7개의 원재료를 전달한다. 모든 중간 버퍼에 원재료를 보충하는데 35분 소요된다.

3.1.2 홀 가공

머시닝 센터가 투입된 원재료의 표면을 가공하며, 가공 시간은 평균 240분, 표준편차 15분의 정규분포를 따른다.

3.1.3 작업 교체 준비

작업자가 한 번 가동을 완료한 머시닝 센터가 새로운 작업을 할 수 있도록 세팅 및 로딩하며, 세팅 및 로딩 시간은 평균 15분, 표준편차 3분의 정규분포를 따른다.

3.1.4 홀 가공 완료 부품 운반

트레일러가 홀 가공을 마치고 후 버퍼에 보관 되어있는 부품들을 다음 공정으로 운반하며, 운반에 30분이 소요된다.

3.1.5 작업자 휴게시간

작업자는 12시부터 60분의 식사 시간, 10시 40분부터 20분의 오전 휴게시간, 15시 20분부터 40분의 오후 휴게시간을 가진다.

<Table 1> Operation Information in Hole Machining Area

Operation	Value	Unit
Operating mode	9 To 6	
Break system	Fixed	
Transportation of raw material	35	min
Hole machining	N(240,15)	min
Set up	N(15,3)	min
Transportation of machining finished product	30	min
Lunch break	Start time	12:00
	Duration	60 min
Morning break	Start time	10:40
	Duration	20 min
Afternoon break	Start time	15:20
	Duration	40 min

3.2 연구 대상 시스템의 문제점

현재 G사는 작업자들에게 휴게시간 고정근무제를 적용하고 있다. 휴게시간 고정근무제란 모든 작업자들이 동시에 식사 및 휴식 시간을 가지는 근무제도이다.

머시닝 센터의 단위 부품 가공 시간은 평균 4시간으로 평균 15분에 해당하는 작업자의 작업 시간에 비해 매우 길다. <Figure 3>과 같이 기계의 작업이 끝났을 때 작업자의 보조 작업이 바로 시행되지 못하면 기계의 유휴시간이 발생하여 생산성 저하를 유발한다.

Time	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Operator 1	S-1	S-2	S-3	Lunch break	S-1	S-2	S-3	Idle	S-1	S-2	S-3
Hole machine 1	Setup	Machining	Machining	Idle	Setup	Machining	Machining	Setup	Machining	Machining	
Hole machine 2	Idle	Setup	Machining	Machining	Idle	Setup	Machining	Machining	Setup	...	
Hole machine 3	Idle	Setup	Machining	Machining	Idle	Setup	Machining	Machining	Setup	...	

<Figure 3> Occurrence of Machine Down Time: The Imbalance between Machine and Operators

공정에 배치되는 작업자 수와 작업자의 근무 스케줄 조정을 통해 문제에 대한 해결 대안을 제시하고자 한다.

### 4. 보완 다중 활동 분석표

다중 활동 분석표는 이상적인 작업환경에서 2인 이상의 복수 작업자가 수행하는 작업을 분석하여 최적의 작업 조 또는 작업자 한 명이 담당하는 기계 대수를 결정하는 방법이다[13]. 하지만 실제 현장의 작업자에게는 식사 시간, 근로 기준법에 의한 필수 휴게시간이 보장되어야 하고 다양한 변수에 의해 작업자의 휴휴 시간이 발생한다. 이 점을 고려하여 작업자에게 복수의 휴휴 시간이 존재하는 작업환경에서 적용 가능한 보완 다중 활동 분석표(Adjusted M-M Chart)를 제시한다.

#### 4.1 수리 모델

##### 4.1.1 다중 활동 분석표

기존의 다중 활동 분석표에 사용되는 변수는 다음과 같다.

- a*: Simultaneous operating time of the machine and the operator (min)
- b*: Operating time of the operator(min)
- t*: Operating time for the operator(min)

여기서 *a*는 설비에 작업자가 부품을 투입하고 가공 전 필요한 세팅 과정에 소요되는 시간을 포함한다. 작업자의 이동시간은 *t*에, 설비의 가동 시간은 *b*에 해당한다. 기존의 다중 활동 분석표에 따라 작업자 1명당 담당하는 기계 대수 *n*은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$n = \frac{a+t}{a+b} \tag{1}$$

##### 4.1.2 보완 다중 활동 분석표

본 연구에서는 현실적인 작업환경에 적용 가능하도록 ‘휴휴 지수’로 정의된 가중치를 도입하여 작업자 1명당 담당하는 기계 대수 *n'*을 다음과 같이 새롭게 계산한다.

계산과정과 변수는 다음과 같다.

- T*: Standard working hours(min)
- T<sub>m</sub>*: Lunch break time(min)
- T<sub>b</sub>*: Break time(min)
- T<sub>t</sub>*: Trailer working time(min)
- T<sub>f</sub>*: Forklift working time(min)

작업자는 정규 근무 시간동안 식사 시간, 휴게시간 등의 휴휴시간을 가지고 안전상의 이유로 작업장 내 다른 운반 수단의 작업 시간동안 이동 및 작업이 금지된다. 따라서 작업자의 실제 작업 가능 시간 *A<sub>w</sub>*은 정규 근무 시간에서 이에 해당하는 시간을 제외한 시간이 된다. G사의 경우 Hole 가공 구역 내에 트레일러, 지게차와 작업자가 혼재한다.

$$A_w = T - (T_m + T_b + T_t + T_f) \tag{2}$$

식 (2)에서 구한 작업자 실제 작업 가능 시간을 작업자 작업 시간으로 나누어 정규 근무 시간 내 작업자의 작업 횟수 *N<sub>w</sub>*를 계산한다.

$$N_w = \frac{A_w}{a+b} \tag{3}$$

기계의 실제 작업 가능 시간 *A<sub>m</sub>*을 기계 작업 시간으로 나누어 정규 근무 시간 내 기계의 작업 횟수 *N<sub>m</sub>*을 계산한다. 이 때 *A<sub>m</sub>*은 공정 운영 시간과 동일하다.

$$N_m = \frac{A_m}{a+t} \tag{4}$$

식 (3), 식 (4)의 결과를 이용하여 작업자 1명 당 담당하는 기계 대수 *n'*을 계산한다.

$$n' = \frac{N_w}{N_m} = \frac{A_w}{A_m} \times \left( \frac{a+t}{a+b} \right) = \frac{A_w}{A_m} n \tag{5}$$

이 때 *n'*은 *n*에 *A<sub>w</sub>/A<sub>m</sub>*에 해당하는 값이 가중된 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이를 ‘휴휴 지수’로 정의한다. 작업자 1명 당 담당하는 기계 대수를 *n*, 공정 배치된 총 기계 대수를 *m*이라고 할 때, 필요한 작업자 수 *O*는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$O = \lceil \frac{m}{n'} \rceil \tag{6}$$

다중 활동 분석표로 계산한 홀 가공 공정의 작업자 1명당 담당 기계 대수는 10.2대이므로  $2 (= \lceil 1.96 \rceil)$ 명의 작업자가

필요하며, 보완 다중 활동 분석표로 계산한 홀 가공 공정의 작업자 1명 당 담당 기계 대수는 6.1대로  $4(= \lceil 3.27 \rceil)$ 명의 작업자가 필요하다.

### 5. 실험 설계

본 장에서는 홀 가공 공정 시뮬레이션을 이용하여 보완 다중 활동 분석표를 검증한다. 또한 작업자 휴게시간 운영 전략에 따른 생산성 분석을 위한 시뮬레이션 실험을 설계한다.

#### 5.1 시뮬레이션 가정 사항

홀 가공 공정 시뮬레이션의 가정사항은 다음과 같다.

- (1) 지게차는 안쪽에 위치한 중간 버퍼부터 원자재를 보충한다.
- (2) 각 머시닝센터는 가장 가까이 위치한 중간 버퍼의 작업자로부터 원자재를 공급받는다. 거리가 같은 경우, 안쪽 중간 버퍼에서부터 원자재를 공급한다.
- (3) 안전상의 이유로 서로 다른 종류의 이동수단은 동시에 움직이지 않는다. 예를 들어, 사람과 크레인이 원자재를 투입하기 위해 이동하는 도중 지게차와 트레일러는 작업할 수 없으며 반대의 경우 또한 동일하다. 각 작업자는 다른 종류의 이동수단이 작업을 시작하면 현재 위치에서 대기한다.
- (4) 현장 작업자의 이동 속도는 평균 사람 이동 속도인  $0.8(m/s)$ 보다 느린  $0.5(m/s)$ 로 가정하여 적용한다 [8]. 작업자와 크레인이 설비까지 원재료를 운반하는데 소요되는 시간은 중간 버퍼와 설비까지 거리에 의해 결정된다.
- (5) 동일한 중간 버퍼에 배정된 작업자들은 서로 다른 작업자 번호를 가지며, 번호가 빠른 작업자부터 작업을 시작한다.

#### 5.2 실험 설계

##### 5.2.1 목적함수와 독립변수

본 연구의 목적함수는 평균 설비 시간 가동률이다. 평균 설비 시간 가동률  $U$ 은 설비가 가동될 수 있는 최대 시간인 부하시간에 대한 실제로 가동된 시간의 비율인 설비 시간 가동률  $U_m$ 의 평균값으로 다음과 같이 계산한다.

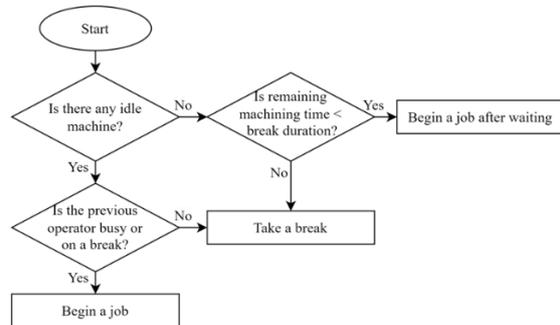
- $M, m$ : Set of machines and its index
- $TW_m$ : Machine working time,  $m \in M$
- $TL_m$ : Machine loading time,  $m \in M$
- $N$ : Number of machines

$$U_m = \frac{TW_m}{TL_m}, \forall m \in M \tag{7}$$

$$U = \frac{1}{N} \sum_{m \in M} U_m \tag{8}$$

본 연구에서는 작업자 수와 근무 방식 별로 작업자의 점심 식사 시간, 오전 휴게시간, 오후 휴게시간을 독립변수로 고려한다. 시간 가동률은 클수록 생산성 향상에 유리한 망대 특성이다. 하지만 설비 가동률은 여러 변수들에 종속되어 일정 수준으로 수렴하는 것이 일반적이다. 따라서 독립변수의 변화에 따라 달성할 수 있는 최대 설비 가동률을 알아보고, 변수들과 설비 가동률 간 상관관계를 분석하고자 한다. 작업자 수는 기존 다중 활동분석표를 통해 도출된 최소 필요 작업자 수인 2명을 시작으로 증가시키며 실험한다.

작업자 근무 방식은 휴게시간 고정근무제(Fixed break system)와 유연근무제(Flexible break system)가 있다. 고정근무제에서 모든 작업자는 정해진 휴휴시간 스케줄을 따라야한다. 유연근무제는 작업자가 가질 수 있는 식사시간과 휴게시간의 총 길이(Duration)와 시간대(Time window)는 고정적이나, 각 작업자마다 서로 다른 휴게 시작 시점을 가질 수 있는 근무 방식으로 정의한다. 이 때 점심, 휴게시간을 취할 수 있는 시간대가 되면 각 작업자는 휴휴 상태(Idle)의 설비가 존재하는지 확인한다. 휴휴 설비가 존재하지 않을 때 설비의 가공 완료까지 남은 시간이 휴게시간의 총 길이보다 짧다면 기다린 후 보조 작업을 수행한다. 하지만 설비의 남은 시간이 휴게시간의 총 길이보다 길다면 작업자는 휴게 시간을 가진다. 휴휴 상태의 설비가 존재한다면 작업자와 동일한 버퍼에 배정된 작업자 중 번호가 빠른 작업자(Previous operator)의 상태를 확인한다. 번호가 빠른 작업자가 휴휴 상태라면 의사 결정 작업자는 휴게 시간을 가진다. 하지만 번호가 빠른 작업자가 작업 중 또는 휴게시간을 가지고 있다면 의사 결정 작업자가 보조 작업을 수행한다. 휴게시간 유연근무제에서 작업자의 의사결정 과정을 <Figure 4>에 나타낸다.



<Figure 4> Decision Making Process within the Flexible Break System of Operators

시뮬레이션 실험의 독립변수와 이들의 범위를 <Table 2>에 자세히 나타낸다. 독립변수로는 9 To 6 및 24시간 운영과 작업자 근무 방식(고정근무제 및 유연근무제), 작업자 수, 작업자의 점심, 휴게 시작 시간의 범위를 포함한다. 해당 시작 시간은 10분 단위로 설정하여 실험을 진행한다. 이외의 시뮬레이션 매개변수는 <Table 1>에 나타낸다.

<Table 2> Decision Variables and Their Values (Range)

Decision variable		Value
Operating mode		9 To 6, 24
Operator work system		Fixed break system, Flexible break system
Workforce size		[2, +1]
Breaks time schedule	Lunch break start time	[11:30, 12:30]
	Morning break start time	[10:10, 10:50]
	Afternoon break start time	[15:00, 15:40]

## 6. 실험 및 결과

시뮬레이션은 Tecnomatics Plant Simulation 16.1로 구현되었다. 안정상태(Steady state)의 시뮬레이션 결과를 도출하기 위한 시뮬레이션 관측시간은 30일이며 각 실험 시나리오 당 5회 반복 실험하였다. 시뮬레이션 실행환경은 Intel(R) Core(TM) i3-7100U CPU @ 2.40GHz 2.40 GHz, 4.00GB Ram이 활용되었다.

### 6.1 보완 다중 활동 분석표 시뮬레이션 검증

본 장에서는 시뮬레이션을 이용하여 보완 다중 활동 분석표 검증을 수행한다. <Table 3>에 기존 다중 활동 분석표와 보완 다중 활동 분석표의 시뮬레이션 실험 결과를 나타낸다. 기존 다중 활동 분석표를 통해 도출한 최소 작업자 수는 2명이다. 이때에 수리 모델에 따른 설비 가동률은 47.2%이나, 작업자 2명을 투입한 시뮬레이션 실험에서의 설비 가동률은 39.7%로 7.5%p의 차이가 발생한다. 반면, 본 연구에서 제안한 보완 다중 활동 분석표에 따르면 최소 작업자 수는 4명으로, 수리 모델과 시뮬레이션의 설비 가동률 차이는 0.6%p로 실제 현장에 더욱 적합한 모델임을 보인다.

<Table 3> Comparison of Traditional and Adjusted M-M Chart with Utilization Rate by Simulation ( $u$  and  $u_{sim}$ )

M-M Chart	$n$	workforce	$u$ (%)	$u_{sim}$ (%)
Traditional	10.2	2	47.2	39.7
Adjusted	6.1	4	55.4	54.8

## 6.2 작업자 운영 전략

### 6.2.1 9 To 6 운영

9 To 6 운영 휴게시간 고정 근무 시 각 변수에 대한 t검정 결과 점심 식사 시작 시간과 오후 휴게 시작 시간이 설비 가동률에 유의미한 것으로 나타났다. 각 작업자 수 별로 설비의 최대 가동률을 가능하게 하는 작업자의 유휴시간 스케줄과 최대 가동률을 <Table 4>에 나타낸다.

<Table 4> Utilization Rates by Optimal Breaks Schedule with the Fixed Break System in the 9 to 6 Operating Mode

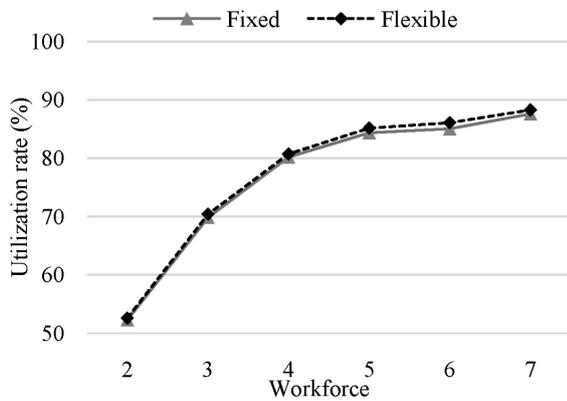
Workforce	Lunch break start time	Afternoon break start time	Machine utilization rate (%)
2	12:30:00	15:40:00	52.29
3	12:30:00	15:40:00	69.84
4	12:00:00	15:40:00	80.21
5	11:30:00	15:40:00	84.38
6	11:30:00	15:40:00	85.06
7	11:30:00	15:20:00	87.61

9 To 6 운영 시 작업자의 수가 증가함에 따라 가동률이 최대가 되는 점심, 오후 휴게 시작 시간이 빨라지는 것을 알 수 있다. 또한 작업자 2명 운영 시 휴게시간 스케줄링만으로 작업자의 추가 할당 없이 설비 가동률이 39.7%에서 52.29%로 증가함을 확인할 수 있다. 보완 다중 활동 분석표의 결과를 이용하여 4명의 작업자를 투입한다면 평균 80.21%의 설비 가동률을 얻을 수 있음을 확인하였다. 9 To 6 운영 휴게시간 고정 근무 시 두 가지 변수가 유의한 이유를 파악하기 위한 실험을 진행하였다. 먼저 점심 식사 시작 시간 외 다른 변수들을 통제 변수로 두었을 때 점심 식사 시간을 앞당길수록 설비 가동률이 평균 2.5%p 감소하는 것을 확인하였다. 오후 휴게 시작 시간에 대해 실험한 결과 오후 휴게를 빠르게 취할수록 설비가동률이 평균 1.92%p 감소함을 보였다. 이러한 결과를 통해 각 작업자들이 할당 받은 설비를 모두 가동시킨 후 휴게시간을 가지고, 설비가 모두 가동 중이라면 작업자가 최대한 빨리 휴식을 취할 때 설비 가동률이 향상됨을 알 수 있다.

<Table 5> Utilization Rates by Workforce Strategies in the 9 to 6 Operating Mode (%)

Break system	Workforce					
	2	3	4	5	6	7
Fixed	52.29	69.84	80.21	84.38	85.06	87.61
Flexible	52.60	70.41	80.75	85.18	86.11	88.30

<Table 5>는 근무 방식에 따른 설비 가동률을 나타낸다. 작업자 근무 방식을 고정근무제에서 유연근무제로 전환할 시 설비 가동률은 평균 0.73% 증가한다. 이러한 증가는 유연근무제 하에서 작업자들이 설비를 지속적으로 가동시킨 후에 휴게시간을 갖는 것으로 해석될 수 있다. 또한 작업자 수가 3명 이하일 경우 추가 작업자 투입 시 가동률이 10%p 이상 향상되는 반면, 작업자 수가 4명 이상일 경우 추가 작업자 투입에 따른 가동률 증가는 5%p 이하로 나타나, 개선 효과가 상대적으로 미미함을 관찰할 수 있다. 따라서 추가 작업자 투입에 따른 비용을 고려할 때, 작업자 4명이 최적의 작업자 수임을 알 수 있다. 9 To 6 운영 시 작업자 수 별 최대 가동률을 <Figure 5>에 나타낸다.



<Figure 5> Comparison of Utilization Rates by Workforce Strategies with Fixed and Flexible Break System in the 9 to 6 Operating Mode

6.2.2 24시간 운영

3교대가 이루어지는 24시간 운영 시 각 변수에 대한 t 검정 결과 근무자의 휴게시간 스케줄이 설비 가동률에 유의미하지 않는 것으로 나타났다. 이는 9 To 6 운영 시 아침 조 작업자가 출근했을 때 모든 설비가 유휴 상태인 것과 달리 24시간 운영 시 아침 조 작업자가 출근하였을 때 이미 일부 설비가 가동 중이기 때문인 것으로 확인되었다. 각 근무 방식 별 설비 최대 가동률을 <Table 6>에 나타낸다.

<Table 6> Utilization Rates by Workforce Strategies in the 24 Operating Mode (%)

Break system	Workforce					
	2	3	4	5	6	7
Fixed	62.35	78.78	85.43	88.58	89.09	90.88
Flexible	62.55	79.04	86.04	89.90	89.97	92.04

24시간 운영 시 휴게시간 고정근무제와 유연근무제 시 최대 가동률을 비교하였으며 작업자 수가 같을 때 9 To 6 운영과 마찬가지로 유연근무제에서 설비 가동률이 증가함을 보인다.

7. 결론

국내 제조업의 자동화 시스템 도입을 위한 노력은 계속해서 증가하고 있다. 자동화 공정의 이점을 극대화하기 위해서 기계와 작업자 간 적절한 협력이 필수적이기 때문에 기업의 작업자 운영 설계의 중요성이 강조되고 있다. 국내 자동차 부품 제조 기업 G사를 대상으로 생산성 개선을 위한 작업자 운영 설계의 효과성을 입증하고자 하였다.

본 연구에서는 보완 다중 활동 분석표를 제시하여 공정에 필요한 작업자 수를 도출하였다. 개선된 보완 다중 활동 분석표는 기존의 다중 활동 분석표보다 실제 작업 현장과 적합한 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. 이 후 시뮬레이션 실험을 통해 생산성을 최대화하는 작업자 운영 전략들을 비교해보았다. 실험을 통해 휴게시간 고정근무보다 휴게시간 유연근무가 설비 가동률 개선에 유리하였다. 또한 24시간 운영, 휴게시간 고정근무 시 작업자 휴게시간 스케줄링만으로는 설비 가동률 개선이 어려웠지만 9 To 6 운영, 휴게시간 고정근무 시 작업자의 휴게시간 스케줄링이 설비 가동률 개선에 효과적임을 보였다. 특히 휴게시간 스케줄링만으로 현재 작업자가 2명일 때 40% 미만인 가동률을 최대 52.29%까지 증가시킬 수 있으며 보완 다중 활동 분석표의 결과인 4명을 배치하고 휴게시간 유연근무제를 적용한다면 80.75%까지도 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 공정의 생산성을 최대화할 수 있는 작업자 수와 작업자 운영 전략을 도출한다. 하지만 일반적으로 기업의 목표 생산량은 유동적으로 변화한다. 이에 대한 작업자의 투입 및 감소, 운영 방식의 변화 등 작업자 운영 전략에 대한 장기적인 관점에서 고려가 부족하다는 한계점을 가진다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF2020R1A2C2004320), and in part by “Regional Innovation Strategy (RIS)” through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE)(2023RIS-007).

## References

- [1] Álvarez, E., Ferrer, J.C., Muñoz, J.C., and Henao, C.A., Efficient shift scheduling with multiple breaks for full-time employees: A retail industry case, *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 150.
- [2] Asefeh, H.G. and Rabbani, M., A novel mathematical model for manpower scheduling in break (relief) times in mixed model assembly lines, *Social and Behavioral Sciences*, 2012, Vol. 62.
- [3] Brann, D.B., Thurman, D.A., and Mitchell, C.M., Human interaction with lights-out automation: A field study, *Proceedings Third Annual Symposium on Human Interaction with Complex Systems*, HICS'96, IEEE, pp. 276-283.
- [4] Cheon, S.K., Prabhu, R., Adres, N., Jang, B.C., Eom, Y.G., and Eom, Y.G., *Simulation Modeling of Automotive Component Manufacturing Plant Using ARENA*, 2004.
- [5] Choi, K.S., Park, K.A., and Yun, Y.S., A Methodology for Productivity Improvement using Simulation Technique in Small and Medium Enterprise, *Journal of Industrial Economics and Business*, 2020, Vol. 24, No. 4, pp. 1969-1987.
- [6] Kang, S.H., Simulation-based scheduling for small-batch, multi-product production processes [dissertation], [Seoul, Korea]: Korea University, 2021.
- [7] Kim, B.S., Park, J.T., and Hong, S.D., A S simulation evaluation of aisle design and operation policies for an automated storage and retrieval system with narrow-/wide-width racks, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2023, Vol. 46, No. 1, pp. 68-75.
- [8] Kim, Y.B., A study of ubiquitous-RTLS system for worker safety, *The Journal of Korea Information and Communications Society*, 2012, Vol. 37, No. 1, pp. 1-7.
- [9] Moon, D.H., Song, C., Choi, M.J., and Jung, J.Y., A Case Study about a Man/Multiple Machine Working Analysis Using Simulation, *Journal of the Korean Simulation*, 2003, Vol. 12, No. 1, pp. 21-34.
- [10] Oh, Y.G., Ju, I.K., Lee, W.Y., and Kim, N.H., Modeling and Implementation of the Affordance-based Human-Machine Collaborative System, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineering*, 2015, Vol. 41, No. 1, pp.34-42.
- [11] Pandey, P., Gajjar, H., and Shah, B.J., Determining optimal workforce size and schedule at the retail store considering overstaffing and understaffing costs, *Computers & Industrial Engineering*, 2021, Vol. 161, p. 107656.
- [12] Shin, D., Wysk, R.A., and Rothrock, L., Formal model of human material-handling tasks for control of manufacturing systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2006, Vol. 36, No. 4, pp. 685-696.
- [13] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., and Tanchoco, J.M.A., *Facilities Planning*, WILEY, 2010, pp. 47-63.
- [14] Turgut Aykin, Optimal shift scheduling with multiple break windows, *Management Science*, 1996, Vol. 42, No. 4, pp. 591-602.
- [15] Vineyard, M., Amoako-Gyampah, K., Meredith, J.R., Failure rate distributions for flexible manufacturing systems: An empirical study, *European Journal of Operational Research*, 1999, Vol. 116, No. 1, pp. 139-155.

## ORCID

- Hyowon Choi | <http://orcid.org/0009-0008-8070-234X>
- Heejae Byeon | <http://orcid.org/0009-0008-1926-2621>
- Suhan Yoon | <http://orcid.org/0009-0003-7012-7402>
- Bosung Kim | <http://orcid.org/0000-0002-7649-5383>
- Soondo Hong | <http://orcid.org/0000-0001-7817-6776>