

비용요소를 고려한 자동차 차체조립라인의 설계 최적화

이영훈 · 김동옥 · 백경민 · 신양우 · 문덕희[†]

Optimizing Design Problem in an Automotive Body Assembly Line Considering Cost Factors

Young Hoon Lee · Dong Ok Kim · Gyeong Min Baek · Yang Woo Shin · Dug Hee Moon[†]

ABSTRACT

In this paper, an optimal manufacturing system design problem in an automotive body assembly lines is introduced when various costs such as equipment investment costs are considered. Meta-model methodology based on simulation results has been used for estimating the performances of the system such as production rate and work-in-process levels. The objective function is minimizing total cost which satisfies the target production rate. The investment costs such as robots, buffers, transportation equipment, and the inventory holding cost of work-in-process have been included in the objective function. Harmony search method has been used for optimization.

Key words : Manufacturing System Design, Assembly Line, Meta-model, Harmony Search, Cost Minimization

요약

이 논문에서는 자동차 차체 조립라인과 같은 제조시스템을 설계할 때, 설비투자비용과 같은 다양한 비용요소를 고려하여 최적 배치안을 결정하는 문제를 다룬다. 시스템의 성능 평가에 필요한 생산율 재공품 재고 수준을 추정하기 위해서는 시물레이션 실험 결과를 기반으로 하는 메타모델 방법론을 사용하였다. 최적화 문제의 목적함수는 목표생산율을 만족시키는 최소비용으로 정하였는데, 비용요소로는 로봇, 버퍼, 운송장비에 대한 투자비용을 고려하였고, 운영비용으로는 재공품 재고비용을 포함시켰다. 최적화 문제를 풀기 위해서는 하모니 탐색방법론을 사용하였다.

주요어 : 제조시스템설계, 조립라인, 메타모델, 하모니 탐색, 비용 최소화

1. 서론

제조시스템(Manufacturing System)을 설계하는 문제는 제품생산에 필요한 공정과 공정 시간, 공정설비 등을 파악하여 가장 효율적인 배치안(Layout)을 구성하고, 향후 해당 시스템이 실현되었을 경우 생산 가능한 제품 수량(Throughput), 제품생산에 필요한 평균시간(Manufacturing

Lead Time), 재공품(Work in Process)의 규모, 각 자원의 가동률(Utilization) 등을 예측하여 최선의 시스템을 설계하는 과정이다 (Lee et al., 2020). 이 과정에서는 배치안에 대한 의사결정, 세부공정에 대한 기술적 특성 및 제약은 물론 설비의 신뢰성, 설비 투자비용, 운영비용 등의 비용요소도 고려되어야 한다.

이와 같은 최적화 문제를 해결하기 위해서는 시스템의 성능(Performance)을 예측하는 모델의 개발과정과 예측 모델을 이용하여 최적화를 수행하는 두 단계가 필요하다. 성능예측모델은 대기행렬망이론(Queueing Network Theory), 확률과정모형(Stochastic Process Model)과 같은 수학적 모형(Mathematical Model)이나 시물레이션(Simulation) 모형 등이 널리 사용되고 있다(Gershwin, 1994). 수학적 모형은 비교적 간단한 시스템에 대해 정확

* 이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

Received: 24 October 2020, Revised: 18 December 2020, Accepted: 21 December 2020

[†] Corresponding Author: Dug Hee Moon

E-mail: dhmoon@changwon.ac.kr

Changwon National University

School of Industrial Engineering and Naval Architecture

한 평가가 가능하며, 계산 속도가 빠르다는 이점이 있는데(Papadopoulos et al., 2019), 차체공장과 같은 복잡한 조립시스템에 대해서는 수학적 모형으로 해결하는 것이 어렵다. 반면에 시뮬레이션은 다양한 제약이 존재하는 복잡한 시스템에 대해 모델을 개발하고 분석을 하는 것이 가능하지만 수학적 모형보다 성능 추정에 필요한 시간이 많이 소요된다(Lee et al., 2020).

이러한 두 가지 방법론의 단점을 극복하기 위해 제안된 방법이 메타모델(Meta-model)이다. 메타모델은 일반적으로 회귀모형(Regression Model)이나 인공지능 모델(Artificial Intelligence Model)과 같은 방법론을 활용하고 있는데, 특히 이산사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation)을 이용하는 메타모델 방법론은 최적화 문제가 요구하는 정확성과 소요시간을 동시에 만족하는 좋은 대안이 될 수 있다고 하였다(Can and Heavy, 2011). 이 방법은 시뮬레이션의 실험 결과를 이용하여 수학적 메타모델을 개발하고, 이를 최적화에 사용함으로써 최적화 과정에서 필요한 시뮬레이션 모델의 수정, 새로운 실험에 필요한 시간을 단축할 수 있고, 난수의 영향으로 인해 최적해 근방에서 시뮬레이션 결과가 수렴하지 않는 시뮬레이션의 변동성을 보완할 수 있다(Lee et al. 2020).

제조시스템 설계 문제를 회귀모형 기반의 메타모델을 이용해 접근한 선행연구들은 다음과 같다. Standridge and Kleijnen (1988)은 단순한 FMS 라인에 대해 회귀모형을 이용한 메타모델을 개발하여 생산량을 예측하였으며, Durieux and Pierreval (2004)는 병렬기계와 물류장비가 포함된 자동화라인에서 회귀모형을 이용한 메타모델을 소개하였고, 이를 이용하여 설계요인들이 시스템 효율에 미치는 영향을 분석하였다. Motlagh et al. (2019)은 8개의 작업장과 7개의 버퍼로 구성된 자동차 차체 후방 하부부품 생산라인에 대해 메타모델을 이용한 최적 설계 문제를 다룬 연구결과를 발표하였다. 하지만 이들 연구는 본 논문에서 다루고자 하는 문제보다 시스템이 단순하다.

본 연구의 대상인 자동차 차체를 조립하는 공법은 Modular Build 방식과 Layered Build 방식으로 구분할 수 있는데, 어떤 방식을 선택하는지에 따라 차체공장의 배치개념이 달라진다(Kim et al. 2015). 다만 조립공법을 결정하는 것은 차량 설계단계에서 결정되는 것이 일반적이기 때문에 차체공장을 설계할 때는 배치개념이 결정된 것으로 간주해도 무방하다. 본 논문에서는 주 차체(Main Body)에 측면차체(Side Body)를 조립할 때 내부 패널(Inner Panel)을 먼저 부착하고, 다음에 외부 패널(Outer Panel)을 순차적으로 조립하는 방식인 Layered Build 방

식을 전제로 하는 조립라인을 대상으로 한다.

또한, 두 차종을 혼류생산 하는 자동차 차체공장(Body Shop)의 일부 라인을 대상으로 주어진 목표생산량을 만족시키면서 최소의 비용으로 라인을 구성하는 문제를 다룬다. 설계변수로는 서브라인 사이에 존재하는 버퍼의 적정 수량, 신뢰성에 따라 구입비용에 차이가 나는 장비(로봇) 유형, 공정간 이송장비의 유형 등을 고려하며, 비용요소로는 기계(로봇) 구입비용, 이송장비 투자비용, 버퍼 설치비용, 재공품 재고비용 등을 고려한다.

이 문제를 해결하기 위해 먼저 시뮬레이션 모델을 개발한 후 실험을 통하여 메타모델을 개발하게 되는데, 생산율(Production Rate)과 버퍼별 평균 재공품 수량을 추정할 수 있는 메타모델을 각각 개발한다. 개발된 메타모델을 이용하여 목적함수를 구성한 후 최적화를 하는데, 비용 최소화 문제의 해를 구하는 과정에서는 하모니 탐색(Harmony Search) 방법을 이용하도록 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 관련 분야에 대한 선행연구내용을 소개하고, 3장에서는 연구대상인 차체공장 시스템에 대한 정의 및 가정들을 소개한다. 4장에서는 일정 횟수의 시뮬레이션 실험 결과를 기반으로 생산율과 버퍼의 평균 재공품 수량을 추정할 수 있는 메타모델링 절차를 소개하며, 5장에서는 개발된 메타모델을 이용하여 비용 최소화를 하는 최적화하는 과정을 소개하고, 마지막으로 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

자동차 차체공장은 고도로 자동화된 여러 개의 서브라인(Sub-line)으로 구성된 특수한 형태의 조립공장이다. 이와 같은 자동차 차체공장의 설계 최적화 문제를 다룬 선행연구들은 많지 않으며, 대부분 시뮬레이션을 이용하여 차체공장의 설계안에 대해 성능을 추정하고 개선안을 제시하는 내용이다. Ulgen et al. (1994)이 자동차 차체공장에 대한 시뮬레이션 연구를 발표한 이래로 차체공장에 대한 초기 연구들은 Spieckermann et al. (2000), Moon et al. (2006), Kim et al. (2015) 등에 조사되어 있다. Moon et al. (2006)에서는 자동차 차체공장 설계에 대한 프로세스와 3D 시뮬레이션을 어떻게 활용하는지에 대한 방법론을 제시하고, 이를 자동차 업체의 차체 라인에 적용한 사례연구를 발표하였다. Remiel et al. (2014)은 자동차 차체공장의 초기설계단계에서 개념 설계를 하는 절차를 제시하였는데 시뮬레이션과 디지털 제조 기술을 어떻게 활용할 수 있는지 설명하였다.

Kim et al. (2015)에서는 자동차 차체조립공법 두 가지에 대한 배치안 구조에 대해 시뮬레이션을 이용하여 분석하였는데, 생산을 측면에서는 Modular Build 방식이 우수하다고 하였다. 하지만 차체의 강성 측면에서는 Layered Build 방식이 우수하다고 하였다. Moon et al. (2017)에서는 버퍼가 허용되지 않는 차체공장 서브라인의 이송정책을 동기화(Synchronous) 방식과 비동기화(Asynchronous) 방식으로 구분하였는데, 시뮬레이션을 통해 비동기화 방식이 생산을 측면에서 다소 우수함을 입증하였다. 다만 서브라인 간 버퍼가 증가하면 두 이송방식의 차이가 줄어들었다고 하였다. Moon et al. (2018)에서는 차체공장에서 혼류생산이 생산성에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션을 이용하여 분석하였는데, 조립공법 두 종류와 이송정책 두 종류에 대해 분석을 하였다. 차체공장의 경우 자동차 조립공장과는 달리 로봇이 고정되어 있기 때문에 혼류생산에 의한 공정 시간의 차이를 흡수하기 어려워 생산량이 감소한다는 사실을 입증하였는데, 이때 혼류 비율의 영향은 크지 않다는 것을 보여주었다.

버퍼할당문제(BAP: Buffer Allocation Problem)는 버퍼할당문제는 생산라인이 특정한 목표를 달성하기 위해 버퍼의 용량을 최적으로 할당하는 문제를 다루는 것으로 대표적인 NP-hard 문제로 알려져 있다(Demir et al., 2014). 이 문제는 지난 수십 년간 많은 연구가 이루어졌는데 Demir et al. (2014), Weiss et al. (2019), Motlagh et al. (2019) 등의 개괄논문에서 잘 조사되어 있다. 자동차 차체공장의 생산율을 높이기 위해 서브라인 사이의 버퍼 할당을 하는 최적화 문제는 Moon et al. (2016)에서 다루었는데, 최적화 과정에서 탐색방법을 사용하였다. 따라서 탐색과정에서 매번 시뮬레이션을 다시 해야 하는 어려움이 있었다. 최근에 Lee et al. (2020)은 Modular Build 공법과 비동기화 이송정책을 사용하는 경우 다양한 모수들을 반영할 수 있는 메타모델을 시뮬레이션 기반으로 개발하였고, 이를 이용하여 생산율을 최대화시키기 위해 버퍼할당 최적화를 수행하는 논문을 발표하였다. 이 방법을 통하여 다양한 모수들의 값이 변하더라도 추가로 시뮬레이션을 하지 않고 쉽게 최적화를 할 수 있었다.

한편, 근래 들어서 장비의 예방정비(PM : Preventive Maintenance) 정책을 고려한 BAP 문제에 대한 연구들이 수행된 바가 있다. Nahas (2017)는 흐름라인에서 예방정비를 실행함으로써 라인의 생산율을 증가시킬 수 있기 때문에 버퍼비용과 예방정비 비용과의 최적화 문제로 정의할 수 있다고 하였다. Zandieh et al. (2017)은 동일하지 않은 장비로 구성된 조립라인에서 예방정비와 버퍼할

당을 동시에 고려하여 최적화를 하는 문제를 시뮬레이션을 이용하여 접근하였다. 또한, 최적화 방법으로는 유전자이론과 입자군집최적화(Particle Swarm Optimization) 방법을 이용하는데, 예방정비 비용요소는 고려하지 않았다. 하지만 이들 연구에서는 가용성이 높은 장비를 선택하면 장비비용이 증가된다는 점은 고려하지 않았다.

본 연구는 Lee et al. (2020)을 확장한 것으로, 최적화 문제를 생산을 최대화가 아닌 투자 및 운영비용 최소화 문제로 정의한다. 비용요소로는 로봇 장비 구입비용, 버퍼 설치비용, 이송 장비 설치비용, 재공품유지비용으로 한다.

3. 시스템 정의

3.1 기본 가정

본 연구의 대상 시스템은 Figure 1에 제시한 Layered Build 조립방식의 축약모델(Abstract Model)을 사용한다. 이 시스템에서 사용되는 기본 가정은 선행연구들과 유사하다.

- ① 실제로 한 작업장(Station)에는 여러 대의 로봇이 협업을 하지만 본 연구에서는 이를 묶어서 1대의 로봇이 작업을 수행하는 것으로 가정한다.
- ② 서브 라인 내부의 연속된 작업장 사이에는 공간의 제약으로 인해 버퍼를 허용하지 않는다.
- ③ 서브 라인과 다른 서브 라인 사이에는 유한한 버퍼를 두는데, 버퍼 위치에 따라 용량이 다를 수 있다.
- ④ 모든 작업장의 기계(용접 로봇)는 한 가지 유형의 고장이 발생하는데, 고장 시간 간격과의 수리시간의 분포는 지수 분포로 가정하고, 모든 작업장에 동일하게 적용한다. 이때, 고장은 기계의 가동과 관계없이 고장이 발생하는 시간 종속 고장(Time Dependent Failure)을 가정한다.
- ⑤ 선행 공정이 없는 각 서브 라인의 첫 번째 작업장에는 부품의 결품 때문에 발생하는 기근(Starving) 현상이 없다고 가정하며, 후속 공정이 없는 맨 마지막 작업장에서는 막힘(Blocking) 현상이 발생하지 않는다고 가정한다.
- ⑥ 차체공장에서는 두 종류의 차종을 생산한다. 한 차종(대표 차종)에 대해 작업장 별로 공정 수행에 소요되는 시간(PT : Processing Time)은 동일한 상수 값을 갖는 것으로 가정한다. 그 이유는 차체 생산라인의 경우 로봇을 이용하는 고도로 자동화된 라인이기 때문에 공정 시간에 분산은 존재하지 않기 때문이다. 다만 다른 차종의 PT는 대표 차종에 비해 큰 값을 가지는 것으로 한다.

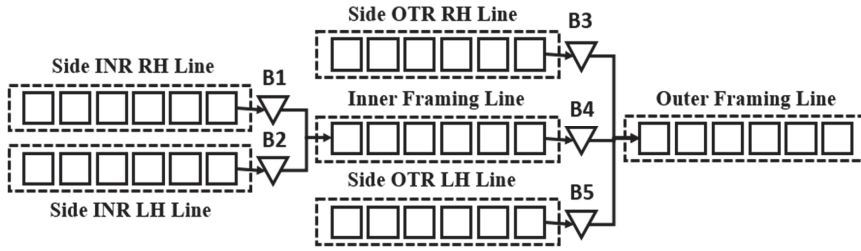


Fig. 1. Abstract model of layered build method (Kim et al., 2015; Moon et al., 2017; Moon et al., 2018)

3.2 설계변수

3.2.1 운반시스템 유형

운반시스템은 Moon et al. (2017)에서 제시한 동기화 이송방식(Synchronized Transfer)과 비동기화 이송방식(Asynchronized Transfer)을 선택할 수 있다. Moon et al. (2017)의 연구결과에 의하면 비동기화 이송방식이 동기화 이송방식에 비해 시스템의 생산율이 3% 정도 높은 것으로 분석되었다. 반면에 비동기화 이송방식은 개별 작업장을 통제해야 하므로 투자비용이 많이 발생한다.

3.2.2 로봇시스템 유형

앞서 조립라인 형태의 자동차 차체 공장을 구성하는 각 작업장은 하나의 로봇으로 구성된 것으로 가정하였다. 일반적으로 단일 기계의 가용률(Availability)는 다음 식과 같이 정의하는데 일명 개별 효율(Isolated Efficiency)라고 부르기도 한다. 이때, MTTF(Mean Time to Failure)는 평균 고장 시간 간격이며 MTTR(Mean Time to Repair)는 평균 수리시간을 의미한다.

$$\rho = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{1}$$

본 연구 대상 시스템에서 하나의 서브라인은 버퍼가 없는 6개 작업장이 직렬로 연결되어 있다. 따라서 한 작업장의 공정시간이 상수라는 가정하에서 가용률이 0.96이면 서브라인의 생산율은 0.96^6 인 0.7828 이하다 된다. 따라서 개별 장비의 가용률은 전체 시스템의 생산능력을 결정하는데 매우 중요한 요소가 된다. 실제로 정밀하고, 가용률이 높은 장비들은 고가이다. 또한, 근래 들어 다양한 IT 기술의 발전으로 인해 예지보전(Predictive Maintenance) 기술들이 도입되면서 가용률을 높일 수 있는 장비들이 도입되고 있다. 따라서 장비의 가용률이 높

아질수록 장비의 투자비는 급격하게 증가하는데, 본 연구에서는 비용관점에서 최적 가용률을 결정할 수 있다고 가정하며, 투자비와 가용률의 관계는 Eq. (2)와 같이 정하였다. 이때 ρ 는 가용률을 의미하며, γ , τ 는 ρ 가 0.94일 때 함수의 값을 1로 맞추기 위한 보정(Offset) 모수이고, λ 는 형상의 기울기를 결정하기 위한 모수다. 본 연구에서는 3가지 함수의 형태를 Table 1과 같이 정의하였다.

$$E(\rho) = \lambda e^{-\lambda - \rho + \gamma} - \tau \tag{2}$$

Table 1. Parameter setting for machine cost and availability

Sensitivity	λ	γ	τ	Availability (ρ)		
				0.94	0.96	0.98
Low (L)	130	1.02	0.9960	1	1.05	1.71
Medium (M)	110	1.02	0.9834	1	1.13	2.33
High (H)	90	1.02	0.9328	1	1.34	3.39

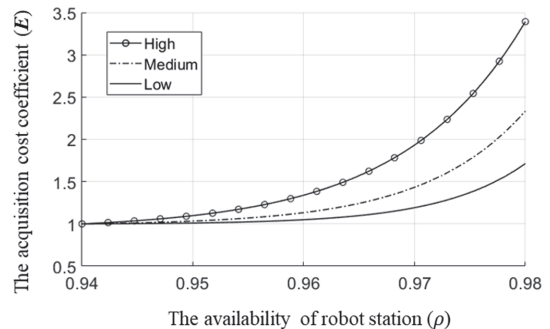


Fig. 2. Shapes of acquisition cost for robot system

Figure 2는 Table 1에 제시된 바와 같이 모수들을 결정했을 때 투자비용의 상대적 비율을 보여준다. 중간(Medium)의 경우를 예로 들면 가용률이 0.94인 경우 설

비투자비를 1로 할 때 가용률이 0.98이 되면 투자비가 2.33배 정도 증가한다는 의미다.

3.2.3 버퍼용량

이 논문에서 고려하는 시스템에서 서브라인에는 버퍼가 없고, 서브라인 사이에만 버퍼를 허용한다. 따라서 시스템의 생산율을 높이기 위해서는 버퍼용량을 크게 해야 하지만 공간적인 측면도 고려해야 하고, 버퍼 투자비도 매우 높은 편이다. 따라서 버퍼용량을 제한할 수밖에 없다. 또한, 버퍼가 증가하면 재공품 재고의 수량도 증가하기 때문에 재고유지비도 증가한다. 따라서 버퍼의 경우 투자비와 평균 재공품 수량에 따른 운영비용을 고려하도록 한다.

4. 성능 추정을 위한 메타모델

4.1 변수 정의

메타모델의 형태는 주로 기본 함수(Basic Function)와 매개변수 집단(Parameter Family)의 조합으로 표현한다. 매개변수에 따라 다항식(Polynomials), 사인 함수(Sine Function) 및 구간 다항식(Piecewise Polynomials) 등이 있다. 이들은 최소 제곱 오차(Least Squares), 최대 우도(Maximum Likelihood), 교차 검증(Cross Validation)을 통해 얻은 매개변수 그룹에서 과소 및 과대 적합을 방지하기 위해 최상의 매개변수를 선택하는 과정을 거친다 (Barton and Meckesheimer, 2006). 본 연구는 Can and Heavey (2011)이 제안한 시물레이션 모델을 활용한 메타모델링 절차를 따라 수행하였다.

메타모델은 이송정책 두 종류에 대해 각각 시스템의 생산율과 5개 버퍼의 평균 재공품을 추정하기 위해 총 12개의 모델을 개발하였다. 메타모델 개발을 위해 Lee et al. (2020)을 참조하여 다음과 같이 변수를 정의하였다. 각 변수가 가질 수 있는 값들은 Table 2에 제시된 것과 같이 정하였다.

- x_i : 버퍼 i 의 용량, $i = 1, \dots, 5$
- x_6 : 각 작업장 장비의 가용률 (독립효율)
- x_7 : 각 작업장 장비의 MTTF
- x_8 : 대표 차종 1의 생산량 비율(PM)
- x_9 : 차종 2의 공정 시간을 1로 했을 때, 차종 1의 공정 시간
- x_{10} : 이송 장비 선택변수(동기화 이송 장비 선택 시

0, 비동기화 이송 장비 선택 시 1)

\hat{x}_i : 변수 x_i 에 대한 정규화 변수, $i = 1, \dots, 10$

x_i^o : 최적화 과정에서 사용할 통제변수의 고정값,
 $i = 1, \dots, 10$

$\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_9)$: x_i 의 벡터

$\hat{\mathbf{X}} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_9)$: \hat{x}_i 의 벡터

$\mathbf{X}^o = (x_1^o, x_2^o, x_3^o)$

LB_i : x_i 의 최솟값

UB_i : x_i 의 최댓값

TB_{max} : 총 버퍼용량의 상한값

$\Pi_{Sym}(\hat{\mathbf{X}})$: 동기화 이송방식에 대한 생산율

$\Pi_{Asym}(\hat{\mathbf{X}})$: 비동기화 이송방식에 대한 생산율

$\Pi(\hat{\mathbf{X}}) = x_{10}\Pi_{Asym}(\hat{\mathbf{X}}) + (1 - x_{10})\Pi_{Sym}(\hat{\mathbf{X}})$

$W_{i,Sym}(\hat{\mathbf{X}})$: 동기화 이송방식에서 버퍼 i 의 평균사용률

$W_{i,Asym}(\hat{\mathbf{X}})$: 비동기화 이송방식에서 버퍼 i 의 평균
사용률

$W_i(\hat{\mathbf{X}}) = x_{10}W_{i,Asym}(\hat{\mathbf{X}}) + (1 - x_{10})W_{i,Sym}(\hat{\mathbf{X}})$

10개의 변수 중에서 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_{10}$ 은 최적화 문제에서 의사결정변수로 사용할 것이며, x_7, x_8, x_9 는 통제변수(Control Variable)로 메타모델 개발에는 활용되지만 최적화 과정에서는 특정한 값으로 고정시키는 변수다.

메타모델 개발을 위해 입력변수 x_i 의 값을 그대로 이용할 수도 있지만 각 변수가 가지는 값의 크기(Scale)가 많이 차이가 나기 때문에 시스템의 성능 추정과정에서 오차가 커질 수 있다. 따라서 아래 Eq. (3)에 의하여 변수들의 값을 정규화(Normalize)하였고, x_i 에 대응하는 변수를 \hat{x}_i 로 정의하였다. 따라서 \hat{x}_i 값은 Table 2의 마지막 행에 제시된 바와 같이 모든 변수에 대해 동일하게 -2에서 +2 사이의 값을 가진다 (Lee et al. 2020). 그리고 가용률 x_6 와 MTTF x_7 이 결정되면 Eq. (1)에 의해 MTTR은 자동으로 결정된다. 또한 $W_{i,Sym}(\hat{\mathbf{X}})$ 와 $W_{i,Asym}(\hat{\mathbf{X}})$ 는 각 동기화 및 비동기화 이송정책에서 버퍼 i 의 평균 활용률인데, 시물레이션 실험에서 얻은 재공품 수량을 버퍼용량 x_i 로 나눈 값으로 정의한다.

$$\hat{x}_i = -\alpha + \{\alpha - (-\alpha)\} \frac{x_i - LB_i}{UB_i - LB_i} \quad (3)$$

Table 2. Definitions of input variables and the ranges of levels (Modified in Lee et al., 2020)

Input variables		Ranges of levels ($\alpha = 2$)				
Notation	Definition	Min (LB_i)	Low	Medium	High	Max (UB_i)
x_1	Capacity of buffer 1	0	5	10	15	20
x_2	Capacity of buffer 2	0	5	10	15	20
x_3	Capacity of buffer 3	0	5	10	15	20
x_4	Capacity of buffer 4	0	5	10	15	20
x_5	Capacity of buffer 5	0	5	10	15	20
x_6	Availability of each station (ρ)	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98
x_7	Mean time to failure (MTTF) of each station	160	200	240	280	320
x_8	Product mix (PM) of the representative car (type 1)	0	0.25	0.5	0.75	1
x_9	Process time of the car type 1 (PT1) at each station	0.9	0.925	0.95	0.975	1
x_{10}	Transfer policy selection variable	0 (Synchronous) or 1 (Asynchronous)				
Values of normalized variables ($\hat{x}_i, i = 1, \dots, 9$)		$-\alpha$	-1	0	1	α

Table 3. Set of input variables and simulation results for 156 experimental points

No.	Set of normalized input variables									Performances of asynchronous simulation model					
	$\hat{\mathbf{X}} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_9)$									$\Pi_{Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	$W_{1,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	$W_{2,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	$W_{3,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	$W_{4,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	$W_{5,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.3647	0.7596	0.7586	0.7615	0.5263	0.7624
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0.3905	0.8233	0.7378	0.7460	0.5748	0.7467
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0.3952	0.7396	0.8239	0.7446	0.5715	0.7452
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0.4154	0.8054	0.8065	0.7291	0.6254	0.7296
:															
70	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	0.3687	0.8040	0.7343	0.8054	0.5230	0.7395
71	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	0.3731	0.7354	0.8040	0.8041	0.5196	0.7385
:															
130	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5137	0.7874	0.7200	0.7215	0.5490	0.7233
131	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0.4798	0.7654	0.6758	0.7604	0.4455	0.7601
132	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0.5146	0.7190	0.7882	0.7235	0.5495	0.7232
:															
156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5052	0.7338	0.7336	0.7347	0.5160	0.7345

4.2 메타모델 형태(Shape) 결정

메타모델의 형태는 제조시스템 설계에 관련한 선행연구(Dengiz and Akbay, 2000; Durieux and Pierrel, 2003; Amiri and Mohtashami, 2012; Motlagh et al., 2019)들의 결과를 참조하여 Eq. (4)와 같은 다항 회귀(Polynomial Regression) 모델(Response Surface Model)로 불리기도 함)을 적용하였다. 이 형태의 모델은 포함된 변수들이 성능에 미치는 영향을 1차 효과(First Order), 2인자 교호작용(Two-way Interaction) 및 2차 효과(Pure Quadratic)의 형태로 분석하게 된다. Eq. (4)에서 x_i 는

4.1에서 정의된 바와 같이 설계안에 영향을 주는 변수들이며, $\beta_0, \beta_i, \beta_{i,j}$ 는 각각 상수효과, 1차효과, 2인자 교호작용 및 2차효과에 관련된 계수이다.

$$f(\cdot) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{i,j} x_i x_j + \epsilon \quad (4)$$

4.3 실험설계 및 시뮬레이션을 이용한 메타모델 결정

이 과정은 선택한 메타모델의 모수를 결정하기 위해 시뮬레이션 모델로부터 훈련 데이터를 획득하는 것이다.

여기서 다양한 실험설계(DOE : Design of Experiment) 방법은 모델의 정확도를 개선하고 효율적인 데이터 샘플링을 위해 사용될 수 있다 (Simpson et al., 2001). 본 연구에서 선택한 다항 회귀 모델을 적합할 수 있는 실험설계에는 3-level Factorial Design, Central Composite Design(CCD) 및 Box-behnken Design이 일반적으로 활용된다 (Bezerra et al., 2008). 본 연구에서는 실험횟수를 줄이기 위해 CCD 방식을 사용하였는데 CCD 방식의 장점은 Lee et al. (2020)에 잘 설명되어 있다.

본 연구에 사용한 시뮬레이션 실험횟수는 동기화, 비동기화 모델 각각에 대해 156회씩 총 312회로 하였다. 실험횟수는 $2^{(10-p)} + 2 \times 10 + C_p$ 에 의해 결정되는데, p 는 2수준 요인배치법의 부분실험을 하기 위한 결정 상수이며, C_p 는 중심점에 대한 실험횟수로 본 연구에서는 $p = 3$, $C_p = 10$ 으로 하였다.

시뮬레이션 결과는 매 실험에 대해 20회 반복수행 후 평균값이며, 시뮬레이션의 Warm-up 기간을 30,000분, 실험통계 수집 기간은 300,000분으로 하였다. 실험설계는 MINITAB® Ver. 19.2020.1에서 제시한 방식에 따라 설계하였다.

Table 3은 비동기화 이송방식 ($x_{10}=1$) 하에서 156개의 실험점에 대해 생산율과 버퍼활용률을 추정한 시뮬레이션 실험 결과의 일부다. 같은 방법으로 동기화 이송방식에 대해서도 156개의 실험 결과를 얻었다. 각 생산율에 대한 95% 신뢰구간은 0.001~0.002 수준이며, 버퍼 사용률의 경우는 0.001~0.003 수준이다.

Eqs. (5),(6),(7) and (8)은 생산율 및 버퍼의 사용률에 대해 추정된 12개의 메타모델 중에서 두 종류 이송정책에 대한 생산율과 비동기 이송정책을 선택한 경우의 버퍼 1, 4의 사용률에 대한 메타모델이다.

$$\begin{aligned} \Pi_{Asym}(\hat{\mathbf{X}}) = & 0.5052 + 0.0096\hat{x}_1 + 0.0097\hat{x}_2 \\ & + 0.0101\hat{x}_3 + 0.0154\hat{x}_4 + 0.0102\hat{x}_5 + 0.0982\hat{x}_6 \\ & - 0.0205\hat{x}_7 + 0.0041\hat{x}_8 + 0.0072\hat{x}_9 - 0.0027\hat{x}_1^2 \\ & - 0.0025\hat{x}_2^2 - 0.0027\hat{x}_3^2 - 0.0031\hat{x}_4^2 - 0.0026\hat{x}_5^2 \\ & + 0.0084\hat{x}_6^2 + 0.0016\hat{x}_7^2 + 0.0042\hat{x}_8^2 + 0.0005\hat{x}_1\hat{x}_3 \\ & + 0.0005\hat{x}_1\hat{x}_5 + 0.0006\hat{x}_2\hat{x}_3 + 0.0005\hat{x}_2\hat{x}_5 \\ & - 0.0005\hat{x}_4\hat{x}_5 - 0.0005\hat{x}_4\hat{x}_6 + 0.0015\hat{x}_6\hat{x}_7 \\ & + 0.0010\hat{x}_6\hat{x}_8 + 0.0021\hat{x}_6\hat{x}_9 - 0.0017\hat{x}_8\hat{x}_9 \end{aligned}$$

(5)

$$\begin{aligned} \Pi_{Sym}(\hat{\mathbf{X}}) = & 0.4820 + 0.0117\hat{x}_1 + 0.0117\hat{x}_2 \\ & + 0.0117\hat{x}_3 + 0.0187\hat{x}_4 + 0.0118\hat{x}_5 + 0.1035\hat{x}_6 \\ & - 0.0198\hat{x}_7 + 0.0030\hat{x}_8 + 0.0072\hat{x}_9 - 0.0033\hat{x}_1^2 \\ & - 0.0032\hat{x}_2^2 - 0.0030\hat{x}_3^2 - 0.0036\hat{x}_4^2 - 0.0033\hat{x}_5^2 \\ & + 0.0091\hat{x}_6^2 + 0.0019\hat{x}_7^2 + 0.0041\hat{x}_8^2 + 0.0006\hat{x}_1\hat{x}_3 \\ & - 0.0006\hat{x}_1\hat{x}_4 + 0.0005\hat{x}_1\hat{x}_5 + 0.0006\hat{x}_2\hat{x}_3 \\ & - 0.0006\hat{x}_2\hat{x}_4 + 0.0005\hat{x}_2\hat{x}_5 - 0.0005\hat{x}_2\hat{x}_6 \\ & - 0.0007\hat{x}_3\hat{x}_4 - 0.0005\hat{x}_3\hat{x}_6 - 0.0006\hat{x}_4\hat{x}_5 \\ & - 0.0009\hat{x}_4\hat{x}_6 - 0.0005\hat{x}_5\hat{x}_6 + 0.0009\hat{x}_6\hat{x}_7 \\ & + 0.0009\hat{x}_6\hat{x}_8 + 0.0021\hat{x}_6\hat{x}_9 - 0.0012\hat{x}_8\hat{x}_9 \end{aligned}$$

(6)

$$\begin{aligned} W_{1,Asym}(\hat{\mathbf{X}}) = & 0.7338 + 0.0297\hat{x}_1 - 0.0127\hat{x}_2 \\ & - 0.0106\hat{x}_3 - 0.0186\hat{x}_4 - 0.0105\hat{x}_5 - 0.0090\hat{x}_6 \\ & + 0.0059\hat{x}_7 + 0.0007\hat{x}_8 - 0.0015\hat{x}_1^2 + 0.0027\hat{x}_2^2 \\ & + 0.0019\hat{x}_3^2 + 0.0023\hat{x}_4^2 + 0.0020\hat{x}_5^2 - 0.0020\hat{x}_6^2 \\ & + 0.0005\hat{x}_1\hat{x}_2 - 0.0008\hat{x}_1\hat{x}_3 + 0.0003\hat{x}_1\hat{x}_4 \\ & - 0.0007\hat{x}_1\hat{x}_5 + 0.0026\hat{x}_1\hat{x}_6 - 0.0033\hat{x}_1\hat{x}_7 \\ & - 0.0011\hat{x}_2\hat{x}_3 - 0.0009\hat{x}_2\hat{x}_4 - 0.0010\hat{x}_2\hat{x}_5 \\ & - 0.0011\hat{x}_2\hat{x}_6 + 0.0008\hat{x}_2\hat{x}_7 - 0.0006\hat{x}_3\hat{x}_6 \\ & + 0.0009\hat{x}_3\hat{x}_7 - 0.0015\hat{x}_4\hat{x}_6 + 0.0011\hat{x}_4\hat{x}_7 \\ & - 0.0005\hat{x}_5\hat{x}_6 + 0.0007\hat{x}_5\hat{x}_7 \end{aligned}$$

(7)

$$\begin{aligned} W_{4,Asym}(\hat{\mathbf{X}}) = & 0.5160 + 0.0284\hat{x}_1 + 0.0285\hat{x}_2 \\ & - 0.0313\hat{x}_3 - 0.0027\hat{x}_4 - 0.0311\hat{x}_5 - 0.0018\hat{x}_6 \\ & + 0.0011\hat{x}_8 - 0.0011\hat{x}_9 - 0.0060\hat{x}_1^2 - 0.0059\hat{x}_2^2 \\ & + 0.0062\hat{x}_3^2 + 0.0061\hat{x}_5^2 + 0.0013\hat{x}_1\hat{x}_2 \\ & + 0.0026\hat{x}_1\hat{x}_4 + 0.0014\hat{x}_1\hat{x}_6 + 0.0025\hat{x}_2\hat{x}_4 \\ & + 0.0011\hat{x}_2\hat{x}_6 - 0.0021\hat{x}_3\hat{x}_4 - 0.0019\hat{x}_3\hat{x}_5 \\ & - 0.0013\hat{x}_3\hat{x}_6 - 0.0013\hat{x}_5\hat{x}_6 \end{aligned}$$

(8)

Table 4는 최종적으로 확정된 메타모델에 대하여 분산 분석을 수행한 결과 일부인데, R-square는 모두 99% 이상으로 개발된 메타모델이 시뮬레이션 실험 결과를 잘 묘사하고 있다고 판단할 수 있다.

Table 5는 CCD 방법을 이용한 시뮬레이션 실험 점 156개와 Table 2에 있는 변수값의 구간에서 임의로 선택한 100개 실험 점에서 시뮬레이션 결과와 메타모델 결과

Table 4. Results of analysis of variance (Meta-model for asynchronous part transfer)

Performance of meta-model	Source of variation		Degrees of freedom	Sum of squares	F	p
$\Pi_{Asym}(\hat{X})$	Model	Linear	9	1.46416	28935.02	< 0.001
		Quadratic	8	0.00385	85.67	< 0.001
		2 way interaction	10	0.00155	27.56	< 0.001
		Total model	27	1.46894	9676.47	< 0.001
	Residual	Lack of fit	119	0.00072	16.14	< 0.001
		Pure error	9	0	R-square = 99.94	
		Total error	128	0.00072		
$\Pi_{Sym}(\hat{X})$	Model	Linear	9	1.63825	29016.5	< 0.001
		Quadratic	8	0.00478	95.22	< 0.001
		2 way interaction	16	0.00153	15.2	< 0.001
		Total model	33	1.64370	7939.92	< 0.001
	Residual	Lack of fit	113	0.00076	22.07	0
		Pure error	9	0	R-square = 99.94	
		Total error	122	0.00077		
$W_{1,Asym}(\hat{X})$	Model	Linear	8	0.233373	9235.02	< 0.001
		Quadratic	6	0.001036	54.67	< 0.001
		2 way interaction	17	0.113723	69.33	< 0.001
		Total model	31	0.237750	2427.92	< 0.001
	Residual	Lack of fit	115	0.000377	1.98	0.131
		Pure error	9	0.000015	R-square = 99.79	
		Total error	124	0.000392		
$W_{4,Asym}(\hat{X})$	Model	Linear	8	0.483952	2496.1	< 0.001
		Quadratic	4	0.003866	39.88	< 0.001
		2 way interaction	10	0.004376	18.06	< 0.001
		Total model	22	0.489703	918.46	< 0.001
	Residual	Lack of fit	124	0.003216	30.42	0
		Pure error	9	0.000008	R-square = 99.24	
		Total error	133	0.003223		

의 오차를 요약한 표다. 시뮬레이션 결과를 기준으로 하는 절대 비율 오차(APE)는 Eq. (9)에 의하여 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Absolute Percentage Error (APE)} \\
 & = \frac{|Result_{sm} - Result_{meta}|}{Result_{sm}} \times 100 \quad (9)
 \end{aligned}$$

분석결과 CCD 실험 점에서의 평균 APE는 버퍼 4의 사용률을 제외하고는 0.16%~0.31%였으며, 4번째 버퍼의 경우에도 0.89%보다 작았다. 최대 APE는 버퍼 4를 제외하고는 2.42%보다 작았다. 임의 실험 점 100개에 대

해서는 APE가 다소 증가하였으나 평균적으로는 2% 이 내인 것으로 분석되었다. 다만 최대 APE는 특정한 변수 조합에서 크게 나왔는데, 이 조합은 변수들이 양극단 값 ($\alpha = -2$ 또는 2)을 가지는 경우에 발생하는 것이었다. 이와 같은 현상은 통계적으로 각 변수의 초기설정 범위 (Low - High) 내에서 메타모델의 정확성이 높다는 사실과 부합하는 결과이며, 수리모형에 의한 근사모델로 생산율을 추정했을 때에도 버퍼의 크기가 0인 경우에는 근사모델이 잘 맞지 않는다는 많은 선행연구의 결과와 일관성이 있다고 할 수 있다 (Lee et al. 2020). 또한, 수리모형의 근사해법으로 재공품 재고를 추정할 경우에도 생산율과는 달리 오차가 매우 크다는 결과도 알려져 있다.

Table 5. Validation results for 12 designed meta-models

Performance	Data set for validation			
	CCD points		Random points	
Meta-model	APE	max APE	APE	max APE
$\Pi_{Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.29	2.16	1.53	7.73
$W_{1,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.16	0.76	0.40	1.84
$W_{2,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.20	0.71	0.41	1.74
$W_{3,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.16	0.74	0.39	1.64
$W_{4,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.67	3.11	1.26	8.57
$W_{5,Asyn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.16	0.80	0.36	1.99
$\Pi_{Syn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.31	2.42	2.02	11.14
$W_{1,Syn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.17	0.62	0.39	1.98
$W_{2,Syn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.17	0.58	0.43	1.75
$W_{3,Syn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.16	0.79	0.40	2.26
$W_{4,Syn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.85	6.94	1.61	9.51
$W_{5,Syn}(\hat{\mathbf{X}})$	0.17	0.87	0.37	1.44

5. 비용최소화 문제

5.1 최적화 문제 정의

Lee et al. (2020)에서는 총 버퍼수량이 결정되었을 때 생산율을 최대로 하는 버퍼할당문제를 다룬 바가 있다. 본 연구에서는 시스템이 목표생산율(Π^o)을 만족시키면서 버퍼 투자비용, 가용률을 고려한 장비 도입비용, 재공품 재고 유지비용, 그리고 부품이송설비 투자비용의 합(Z)을 최소화시키는 비용 최소화 문제를 다루고자 한다.

결정 변수와 통제 변수로 구성된 벡터에서 의사결정을 위해 활용될 변수가 의미하는 것은 각 버퍼의 용량(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)과 장비의 가용률 수준(x_6), 그리고 부품 이송 정책(x_{10})이 있다. 나머지 변수는 통제 변수로써 기계의 MTTF(x_7)와 대표 차종의 생산 비율(x_8) 그리고 대표 차종의 한 작업장에서의 공정 시간(x_9)이 있으며, 이들은 최적화 문제를 풀기 위해 특정한 값으로 고정된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & C_b \sum_{i=1}^5 x_i + 36 C_m E(x_6) \\ & + \sum_{i=1}^5 C_{w,i} x_i W_i(\hat{\mathbf{X}}) + x_{10} C_t \end{aligned} \quad (10)$$

Subject to

$$\Pi(\hat{\mathbf{X}}) \geq \Pi^o \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^5 x_i \leq TB_{\max} \quad (12)$$

$$LB_i \leq x_i \leq UB_i, i = 1, \dots, 9 \quad (13)$$

$$x_i = x_i^o, i = 7, \dots, 9 \quad (14)$$

$$x_{10} = \begin{cases} 0, & \text{if 동기화 이송방식 선택} \\ 1, & \text{if 비동기화 이송방식 선택} \end{cases} \quad (15)$$

$$\hat{x}_i = -\alpha + \{\alpha - (-\alpha)\} \frac{x_i - LB_i}{UB_i - LB_i} \quad (16)$$

이때, 비용 관련 모수는 다음과 같이 정의한다.

C_b : 버퍼 1개당 투자비의 연간 감가상각비

C_m : 작업장당 가용률이 0.94인 장비 투자비의 연간 감가상각비

$C_{w,i}$: 버퍼 i 의 재공품 1단위에 대한 연간 재고유지 비용

C_w : $C_{w,i}$ 의 벡터

C_t : 비동기화 정책 선택 시 추가 비용에 대한 연간 감가상각비

$E(x_6)$: 가용률이 x_6 인 경우, 가용률이 0.94인 장비에 비해 장비 구입비 증가율

5.2 최적해 탐색방법

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 전형적인 비선형 혼합정수계획모형(Nonlinear Mixed Integer Problem)이다. 이러한 문제를 풀기 위해서는 일반적으로 Genetic Algorithm(GA), Simulated Annealing(SA), Tabu Search(TS) 같은 다양한 메타 휴리스틱 방법론을 사용하고 있는데, 본 연구에서는 하모니 탐색(HS : Harmony Search) 방법을 사용하고자 한다.

하모니 탐색방법은 음악가가 음악 연주과정에서 더 나은 조화 상태를 찾는다는 데에서 영감을 얻어 Geem et al. (2001)에서 제안되었다. 하모니 탐색 알고리즘은 인구 기반 확률적 최적화 프로그램으로 알려져 있는데, 각 해를 하모니라 하고 이는 n 차원 벡터로 정의한다. 하모니 벡터의 초기 모집단은 무작위로 생성되어 하모니 메모리(HM : Harmony Memory)에 저장된다. 그 다음으로 즉흥연주(Improvisation) 계획에 의해 새로운 후보 하모니가 생성된다. 마지막으로 HM은 새로운 후보 하모니를 현재 HM의 최악의 하모니와 비교하여 갱신하고, 종료 기준을 만족할 때까지 위의 과정을 반복한다. Figure 3은 본 연구에서 사용한 HS 방법의 절차이며, MATLAB® Ver. R2018a를 이용하여 프로그램을 작성하였다.

- (1) initialize all parameters: $HM, HMS, HM_{new}, HMCR, PAR, FW, FW_damp, iteration$
- (2) initialize the harmony memory (HM) randomly
- (3) evaluate the values of fitness function ($f(\hat{X})$) for harmonies of HM
- (4) sort harmony by the descending order of $f(\hat{X})$
- (5) $bestsol=HM(1)$;
- (6) for $i=1 : iteration$: harmony search main loop
- (7) for $k=1: HM_{new}$: create new harmony HM_{new}
- (8) for ; $j=1: k$;
- (9) if $rand < HMCR$; : use harmony memory
- (10) $i=randi(1, HMS)$; : integer
- (11) $HM_{new}(k,j) = HM(i,j)$;
- (12) end
- (13) if $rand < PAR$: pitch adjustment
- (14) $\delta = FW \times randn$; : gaussian
- (15) $HM_{new}(k,j) = HM_{new}(k,j) + \delta$;
- (16) end
- (17) end
- (18) check the value of max. and min. for each variables
- (19) end
- (20) $HM(HMS-nNew:HMS)=HMS_{new}$; : merge harmony memory and new harmonies
- (21) sort harmony by the descending order of $f(\hat{X})$
- (22) $bestsol=HM(1)$;
- (23) $FW=FW \times FW_damp$; : damp fret width
- (24) end
- (25) terminate algorithm

Fig. 3. Processes of HS

HS 방법의 매개 변수는 하모니 메모리 크기(HMS : Harmony Memory Size), 새로운 하모니 크기(HM_{new}), 하모니 메모리 고려율(HMCR : Harmony Memory Consideration Rate), 피치 조정률(PAR : Pitch Adjustment Rate), 프렛 폭(FW : Fret Width), 프렛 폭 감쇠율 및 종료 기준이며, 이들은 문제의 해결과 탐색단계에서의 탐색(Exploration) 또는 개척(Exploitation)과 밀접한 관련이 있다. 좋은 매개 변수 세트는 알고리즘이 높은 수렴률로 전체 최적 또는 최적에 가까운 영역을 탐색하는 기능을 향상시킬 수 있다. Table 6은 본 연구에서 사용한 모수들의 값이다.

물론 HS방법이 GA 등 다른 메타휴리스틱 방법보다 항상 우수한 방법이라고 단정할 수는 없다. Yang (2009)는 HS가 다른 메타휴리스틱 방법론과의 차이를 비교분석하였는데 HS가 매개변수 값에 둔감하기 때문에 최적의 매개변수를 찾기 위한 노력을 줄일 수 있다고 하였다. Manjarres et al. (2013)은 다양한 공학연구 분야에서 HS

를 활용한 경우에 대한 조사는문을 발표하였는데 여러 종류의 문제에서 HS가 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다. 또한 Pan et al. (2011)은 흐름라인의 스케줄링 문제에서 HS가 수렴속도가 빠르고 최적해를 찾을 가능성이 높음을 보여주었으며, Kaveh (2012)는 공장배치 최적화 문제에서 HS가 효율적임을 보여주었다.

Table 6. Parameters used for harmony search

HS parameters	Setting value
# of iteration	1000
HMS	500
HM _{new}	450
HMCR	0.5
PAR	0.2
FW	0.5
FW_damp	0.998

5.3 수치 예제

실례로 자동차 차체공장의 한 작업장에 4대의 로봇이 설치된다고 하면 로봇의 종류에 따라 대략 2억~4억 원 정도의 도입비용이 발생한다고 한다. 따라서 가용률이 0.94인 로봇의 가격을 3억 원으로 하고, 가용률 증가에 따른 로봇 비용 증가 시나리오는 Table 1의 Medium 수준으로 가정하였다. 버퍼는 EMS(Electrical Monorail System)의 경우 1개 공간 당 3,000만 원 정도의 투자비가 발생한다. 서브라인 내에서의 부품 이송을 위한 이송 설비 투자비용은 비동기화 방식을 선택하는 경우 동기화 방식 대비 제어 장비 비용 등 추가 비용이 4억 원 정도 발생한다고 가정한다. 또한, 차량 1대의 차체 가격을 600만 원이라고 하고 연간 재공품 재고비용을 15% 수준으로 가정하면 1개 재공품 재고당 연간 90만 원의 재고유지비용이 발생한다. 이때, 재고유지비용은 재공품의 위치에 따라 달라지는데 (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)에 해당하는 재고비용을 각각 (30만원, 30만원, 30만원, 90만원, 30만원)으로 본 것이다.

모든 하드웨어의 감가상각 기간은 동일하게 10년 정액법으로 가정하고, 잔존가치(Salvage Value)는 없다고 가정한다. 따라서 초기 투자비용의 10%를 연간투자비용으로 사용한다. Table 7에서는 이러한 비용 산정 기준을 제시하였는데, 최적화에 사용된 통제변수 x_7, x_8, x_9 들은 변수 값 범위의 중간 ($\alpha = 0$)인 240, 0.5, 0.95로 각각 고정하였다.

Table 7. Values of cost factors for numerical example (1 million KW)

Cost coef.	Investment cost	Depreciation period	Annual invest. cost
C_b	30/EA	10	3
C_m	300/Station	10	30
C_i	400/System	10	40
C_w	Annual inventory holding cost		
	(0.3, 0.3, 0.3, 0.9, 0.3)		

Table 8은 차체공장의 목표생산율이 증가함에 따라 이를 만족하는 설계 대안 중 총비용을 최소화하는 최적해를 보여준다. 대상 시스템에 대한 목표생산율을 0.25부터 점차 증가시킴에 따라 진행되는 의사결정 결과를 확인할 때, 우선적으로 전체 버퍼의 용량을 늘리는 선택을 한다.

실험 결과에 따르면 전체 버퍼의 용량에 대해서는 최소 4개부터 최대 100개까지의 버퍼를 사용하고 있다. 이러한 결과는 버퍼의 용량을 먼저 늘리는 것이 효율적이라는 것을 의미한다. 그런 다음에 이송 장비를 비동기화 장비에서 동기화 장비로 교체하는 것과 가용률이 높은 설비를 교체하는 정책 사이의 절충을 하게 된다. 물론 개별 비용요소의 크기에 따라 이러한 경향은 변경될 수 있다. 본 예제에서 목표생산량의 최댓값은 0.7950으로 그 이상의 값에 대해서는 설계변수의 범위 내에서는 해가 존재하지 않음을 알 수 있었다.

한편, 버퍼용량이 할당되어 나가는 경향을 보면 대부분 $x_4 > x_3, x_5 > x_1, x_2$ 의 우선순위를 따르고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 Figure 1에서 소개한 바와 같이 Layered Build 공법을 채택한 차체공장의 배치 구조를 고려한다면 논리적으로 타당하다고 생각할 수 있

Table 8. Optimization results of numerical example

Cost parameters $\{C_b, C_m(E), C_w, C_i\}$	Constraint		Best solution (\hat{X})				Performance	
	Π^0	TB_{max}	$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$	$\sum_{i=1}^5 x_i$	x_6	x_{10}	$\Pi(\hat{X})$	Total cost (1 million KW)
{3, 30(M), (0.3, 0.3, 0.3, 0.9, 0.3), 40}	0.2500	100	(0,0,1,7,3)	11	0.95	0	0.2501	1,152.71
	0.2750	100	(0,0,1,3,0)	4	0.95	1	0.2763	1,169.52
	0.3000	100	(0,2,0,6,2)	10	0.95	1	0.3008	1,189.67
	0.3250	100	(3,4,6,11,5)	29	0.95	0	0.3253	1,211.53
	0.3500	100	(4,6,6,13,7)	36	0.95	0	0.3501	1,234.53
	0.3750	100	(8,6,10,12,9)	45	0.95	0	0.3757	1,263.21
	0.4000	100	(9,9,11,14,11)	54	0.95	0	0.4000	1,292.61
	0.4250	100	(5,4,5,11,5)	30	0.96	0	0.4251	1,322.75
	0.4500	100	(5,7,7,11,8)	38	0.96	0	0.4503	1,348.36
	0.4750	100	(7,8,10,12,10)	47	0.96	0	0.4757	1,377.37
	0.5000	100	(9,10,12,14,12)	57	0.96	0	0.5001	1,409.90
	0.5250	100	(13,14,14,15,15)	71	0.96	0	0.5254	1,455.32
	0.5500	100	(14,18,16,16,15)	79	0.96	1	0.5523	1,521.53
	0.5750	100	(7,7,9,11,8)	42	0.97	0	0.5751	1,685.01
	0.6000	100	(10,10,11,11,10)	52	0.97	0	0.6000	1,717.28
	0.6250	100	(13,11,13,14,13)	64	0.97	0	0.6252	1,756.32
	0.6500	100	(15,12,15,15,16)	73	0.97	1	0.6509	1,825.43
	0.6750	100	(5,3,8,10,6)	32	0.98	0	0.6750	2,625.41
	0.7000	100	(6,6,8,11,9)	40	0.98	0	0.7002	2,651.34
	0.7250	100	(9,8,10,14,8)	49	0.98	0	0.7251	2,681.08
0.7500	100	(12,11,12,15,11)	61	0.98	0	0.7501	2,719.81	
0.7750	100	(16,16,17,16,16)	81	0.98	0	0.7750	2,784.06	
0.7950	100	(20,20,20,20,20)	100	0.98	1	0.7950	2,885.82	

다. 또한, Eqs. (5) and (6)에 기술된 생산을 추정 메타모델의 해당 변수에 대한 매개변수의 값이 같다는 점을 고려해 충분히 예측할 수 있다. 한편, 이러한 패턴은 설비의 가용률이 다른 상황에서도 유지되는 것을 확인하였다.

추가로 몇 가지 민감도 분석을 수행하였는데 지면 관계상 상세한 결과자료는 생략하였음을 양해 바란다. 먼저 이송설비 투자비용이 4억 원에서 6억 원으로 증가한다면 Π^0 가 0.55와 0.7950 두 경우에서만 비동기화 이송 장비를 도입하는 것으로 분석되었다. Figure 4는 비동기화 이송 장비의 투자비용이 6억 원인 경우 각각의 로봇 가용률이 고정되었을 때, 나머지 변수들의 최적 설계안을 보여 준다. 그림에서 원의 면적은 총 버퍼용량을 의미한다. 또한, 가용률에 따른 로봇 비용이 Medium에서 High로 변경된다면 버퍼용량을 더 늘리고, 이송 장비를 비동기화 방식으로 변경하는 정책으로 바뀔 수 있었다.

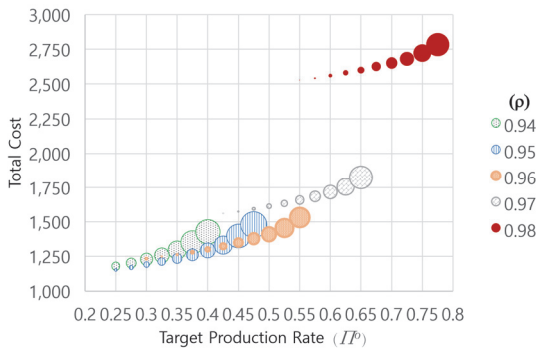


Fig. 4. Optimal costs with respect to availability and target production rate ($C_i = 60$)

Table 9는 Table 8에 제시한 23개의 실험에 대해 동일한 연구자가 동일한 컴퓨터 환경에서 프로그램을 하여 HS와 GA를 각각 적용하여 해를 구한 결과다. 비교 결과 23개의 실험 중에서 HS가 우수한 경우가 14개이며, GA가 우수한 경우가 3개였다. 그리고 동일한 해를 찾은 경우는 6개였다. 또한 HS가 GA에 비해 연산시간도 짧음을 알 수 있었다.

Table 9. Comparison between HS and GA

	HS	GA
Number of Generations	1000	1000
Number of Populations	500	500
Average Computing Time	92.2 sec.	1206.4 sec
Better Solutions	14(6)	3(6)

6. 결론

생산시스템의 배치안을 어떻게 설계하는 것이 좋은가 하는 문제는 단순하지 않다. 본 연구의 대상인 자동차 차체공장과 같은 조립라인에서는 용접공법, 부품 이송 장비, 버퍼의 수량, 용접 로봇의 유형 등 고려해야 할 요소가 많다. 따라서 일반적으로 시뮬레이션을 이용하여 시스템을 분석하고, 경험적 탐색기법을 이용하여 매번 시뮬레이션을 다시 하면서 최적화를 한다.

본 논문에서는 Layered Build 공법을 사용하는 차체 조립라인에서 두 차종을 혼류생산하고, 단위 작업장의 가용률이 증가함에 따라 용접 로봇시스템의 투자비용이 증가하는 상황에서 목표생산율을 달성하면서 비용을 최소화시키는 문제를 다루었다.

이를 위해 시스템의 성능을 추정할 수 있는 메타모델을 개발하였으며, 개발된 메타모델을 이용하여 최적화 문제를 정의하고 하모니 탐색방법을 이용하여 최적해를 찾았다. 물론 경험적 방법에 의한 최적화이기 때문에 탐색 결과가 전체 최적해라는 보장은 없다. 하지만 개발된 메타모델을 이용하면 정의된 범위 내에서 모수들의 값을 임의로 변경하여도 새롭게 시뮬레이션을 하지 않고 최적화를 수행할 수 있다. 따라서 시뮬레이션 모델을 직접 이용하여 최적화를 수행하는 방법에 비해 최적화에 소요되는 시간과 노력을 줄일 수 있었다.

이 문제에서는 설비 투자비에 대한 감가상각 기간을 얼마로 하느냐에 따라 최적 설계안이 변경될 수 있다. 또한, 생산을 증가에 따른 차량 한 대당 판매 이익을 목적 함수에 포함시킴으로써 이익 최대화(Profit Maximization) 문제로 변경할 수도 있다. 이 부분은 향후 연구과제로 남겨둔다.

References

- Amiri, M. and Mohtashami, A., "Buffer Allocation in Unreliable Production Lines based on Design of Experiments, Simulation, and Genetic Algorithm", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 62, No. 1-4, pp. 371-383, 2012.
- Barton, R.R. and Meckesheimer, M., "Metamodel-based Simulation Optimization", Handbooks in Operations Research and Management Science, vol. 13. pp. 535-574, 2006.
- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar,

- L.S., Escalera L.A., "Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry", *Talanta*, Vol. 76, No. 5, pp. 965-977, 2008.
4. Can, B, and Heavey, C., "Comparison of Experimental Designs for Simulation-based Symbolic Regression of Manufacturing Systems", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 61, No. 3, pp. 447-462, 2011.
 5. Demir, L., Tunali, S., and Eliyi, D.T., "The State of the Art on Buffer Allocation Problem: a Comprehensive Survey", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 25, No. 3, pp. 371-392, 2014.
 6. Dengiz, B. and Akbay, K.S., "Computer Simulation of a PCB Production Line: Meta-modeling Approach", *International Journal of Production Economics*, Vol. 63, No. 2, pp. 195-205, 2000.
 7. Durieux, S. and Pierreval, H., "Regression Metamodeling for the Design of Automated Manufacturing System Composed of Parallel Machines Sharing a Material Handling Resource", *International Journal of Production Economics*, Vol. 89, No. 1, pp. 21 - 30, 2004.
 8. Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G.V., "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search", *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68, 2001.
 9. Gershwin, S.B., *Manufacturing System Engineering*, Prentice-Hall International, London, U.K., 1994.
 10. Kaveh, A., Shakouri Mahmud Abadi, A. and Zolfaghari Moghaddam, S., "An Adapted Harmony Search Based Algorithm for Facility Layout Optimization," *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-42, 2012.
 11. Kim, H.S., Wang, G., Shin, Y.W. and Moon, D.H., "Comparison of the Two Layout Structures in Automotive Body Shops Considering Failure Distributions", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 41, No. 5, pp. 470-480, 2015.
 12. Lee, Y.H., Shin, Y.W. and Moon, D.H., "Buffer Allocation Problem Using Meta-Model in an Automotive Body Shops with Mixed-model Production", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 46, No. 3, pp. 296-308, 2020.
(이영훈, 신양우, 문덕희 "혼류생산을 하는 자동차 차체공장에서 메타모델을 이용한 버퍼할당", *대한산업공학회지*, Vol. 46, No. 3, pp. 296-308, 2020.)
 13. Manjarres, D., Landa-Torres, I., Gil-Lopez, S., Del Ser, J., Bilbao, M. N., Salcedo-Sanz, S. and Geem, Z. W., "A Survey on Applications of the Harmony Search Algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 26, No. 8, pp. 1818-1831, 2013.
 14. Moon, D.H., Cho, H.I., Kim, H.S., Sunwoo, H. and Jung, J.Y., "A Case Study of the Body Shop Design in an Automotive Factory using 3D Simulation", *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 18-19, pp. 4121-4135, 2006.
 15. Moon, D.H., Nam, Y.S. and Shin, Y.W., "Effects of Additional Sub-lines and Buffer Allocation on the System Performance in an Automotive Body Shop", *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol. 16, No. 2, pp. 135-145, 2016.
(문덕희, 남예슬, 신양우, "자동차 차체공장에서 서브라인의 추가와 버퍼의 할당이 시스템 효율에 미치는 영향", *한국SCM학회 논문지*, Vol. 16, No. 2, pp. 135-145, 2016.)
 16. Moon, D.H., Nam, Y.S., Kim, H.S. and Shin, Y.W., "Effect of Part Transfer Policies in Two Types of Layouts in Automotive Body Shops", *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, Vol. 24, No. 2, pp. 194-206, 2017.
 17. Moon, D.H., Lee, Y.H. and Shin, Y.W., "The Effect of Mixed-Model Production in Automotive Body Shops Considering Assembly Methods and Part Transfer Policies", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 44, No. 5, pp. 391-403, 2018.
(문덕희, 이영훈, 신양우, "조립공법과 이송정책을 고려한 자동차 차체공장에서 혼류생산이 미치는 영향", *대한산업공학회지*, Vol. 44, No. 5, pp. 391-403, 2018.)
 18. Motlagh, M.M., Azimi, P., Amiri, M. and Madraki,

- G., “An Efficient Simulation Optimization Methodology to Solve a Multi-objective Problem in Unreliable Unbalanced Production Lines”, *Expert Systems With Applications*, Vol. 138, 112836, 2019.
19. Nahas, N., “Buffer Allocation and Preventive Maintenance Optimization in Unreliable Production Lines”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 28, No. 1, pp. 85-93, 2017.
 20. Pan, Q.K., Wang, L. and Gao, L., “A Chaotic Harmony Search Algorithm for the Flow Shop Scheduling Problem with Limited Buffers,” *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 8, pp. 5270-5280, 2011.
 21. Papadopoulos, C.T., Li, J. and O’Kelly, M.E.J., “A Classification and Review of Timed Markov Models of Manufacturing Systems”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 128, pp. 219-244, 2019.
 22. Remiel, F.M., Cauvin, A. and Ferrarini, A., “Conceptual Design and Simulation of an Automotive Body Shop Assembly Line”, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 47, No. 3, pp. 760-765, 2014.
 23. Simpson, T.W., Peplinski, J.D., Koch, P.N., Allen, J.K., “Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations”, *Engineering with Computers*, Vol. 17, No. 2, pp. 129-150, 2001.
 24. Spieckermann, S., Gutschwager, K., Heinzl, H. and Voß, S., “Simulation-based Optimization in the Automotive Industry - A Case Study on Body Shop Design”, *Simulation*, Vol. 75, No. 5, pp. 276-286, 2000.
 25. Standridge, C. and Kleijnen, J. P. C. (1988), *Experimental Design and Regression Analysis*, *European Journal of Operational Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 257-261, 1988.
 25. Ulgen, O., Gunal, A., Grajo, E. and Shore, J., “The Role of Simulation in Design and Operation of Body and Paint Shops in Vehicle Assembly Plants”, *Proceedings of the European Simulation Symposium, Society of Computer Simulation International, Istanbul, Turkey*, pp. 124-128, 1994.
 27. Weiss, S., Schwarz, J.A. and Stolletz, R., “The Buffer Allocation Problem in Production Lines: Formulations, Solution Methods, and Instances”, *IIE Transactions*, Vol. 51, No. 5, pp. 456-485, 2019.
 28. Yang X. S., “Harmony Search as a Metaheuristic Algorithm”, In: Geem Z.W. (eds) *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*. *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 191, pp.1-18, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
 29. Zandieh, M., Joreir-Ahmadi, M.N. and Fadaei-Rafsanjani, A., “Buffer Allocation Problem and Preventive Maintenance Planning in Non-homogenous Unreliable Production Lines”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, No. 5-8, pp. 2581-2593, 2017.
 30. MATLAB® Ver.R2018a
 31. MINITAB® Ver.19.2020.1



이 영 훈 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-9274-3239> / lyh12160@naver.com)

2011~2017 창원대학교 산업시스템공학과 공학사
2017~2020 창원대학교 친환경해양플랜트FEED과정 공학석사

관심분야 : 생산시스템 분석, 시뮬레이션 응용



김 동 옥 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7239-2002> / postive_ok@naver.com)

2013~2019 창원대학교 산업시스템공학과 공학사
2019~현재 창원대학교 친환경해양플랜트FEED과정 석사과정

관심분야 : 생산시스템 분석, 시뮬레이션 응용, Scheduling



백 경 민 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-8421-3430> / bkm0215@daum.net)

2013~2019 창원대학교 통계학과 이학사, 산업시스템공학과 공학사
2019~현재 창원대학교 친환경해양플랜트FEED과정 석사과정

관심분야 : 확률과정론, 생산시스템 분석, 시뮬레이션 응용



신 양 우 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-3107-4569> / ywshin@changwon.ac.kr)

1984 경북대학교 수학과 이학사
1986 한국과학기술원 응용수학과 이학석사
1991 한국과학기술원 수학과 이학박사
1991~ 현재 창원대학교 통계학과 교수

관심분야 : 확률과정론, 대기행렬망이론, Manufacturing System Design



문 덕 희 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7660-4976> / dhmoon@changwon.ac.kr)

1984 한양대학교 산업공학과 공학사
1986 한국과학기술원 산업공학과 공학석사
1991 한국과학기술원 산업공학과 공학박사
1990~ 현재 창원대학교 산업조선해양공학부 교수

관심분야 : Facilities Planning, 시뮬레이션 응용, Scheduling