

# 재투입이 존재하는 혼합흐름공정의 용량계획에 관한 시물레이션 연구

이근철 · 홍정만 · 김정욱 · 최성훈\*

## A Simulation Study on Capacity Planning in Reentrant Hybrid Flowshops

Geun-Cheol Lee · Jung Man Hong · Jung-Ug Kim · Seong-Hoon Choi\*

### ABSTRACT

In this study, we consider a capacity planning problem of reentrant hybrid flowshops. High-tech electronic products such as semiconductor or TFT-LCD, are produced from manufacturing systems which can be considered as reentrant hybrid flowshops. In the considered capacity planning problem, we determine the number of machines at each stage in the manufacturing system. We introduce criteria indicating which stage needs additional machines or which stage needs reduction of machines considering the characteristics of the product types and the manufacturing system. The objective function of the problem is maximizing throughput rate of the system, of which values are obtained from the simulation model depicting the hybrid flowshops. The performance of the proposed methods were evaluated through a series of computational experiments. The simulation model was also used for conducting the comparison experiments among the proposed method and benchmarks.

**Key words** : Capacity planning, Reentrant hybrid flowshop, Simulation

### 요약

본 연구에서는 재투입이 존재하는 혼합흐름공정의 용량계획 문제를 고려한다. 반도체, TFT-LCD와 같은 하이테크 전자 제품을 생산하는 제조시스템을 재투입이 존재하는 혼합흐름공정 형태의 제조시스템으로 볼 수 있다. 본 연구에서 고려하는 용량 계획 문제에서는 제조 시스템의 각 공정마다 장비의 대수를 결정하게 된다. 본 연구에서는 어떤 공정에서 장비를 추가적으로 필요로 하는지 또는 어떤 공정에서 장비의 감소가 요구되는지를 결정하는 기준을 제시한다. 고려하는 문제의 목적함수는 생산율의 최대화이며, 주어진 시스템에서의 생산을 값을 구하기 위해 재투입이 존재하는 혼합흐름공정을 다양하게 표현할 수 있는 시물레이션 모형을 개발하여 사용하였다. 제안 방법의 성능 검증을 위하여 계산실험을 수행하였고, 벤치마킹 방법과의 비교 실험을 위해서 시물레이션 모형을 사용하였다.

**주요어** : 용량계획, 재투입, 혼합흐름공정, 시물레이션 분석

## 1. 서론

본 연구에서는 재투입이 존재하는 혼합흐름공정 형태를 갖는 제조 시스템을 고려한다. 재투입이 존재하는 혼합흐름공정(reentrant hybrid flowshop)은 전형적인 혼합

흐름공정, 즉 직렬의 공정을 통해 제품을 생산하는데 각 공정마다 복수의 병렬 장비를 갖는 제조 시스템과 물리적인 형태는 동일하다. 다만, 제품의 생산 과정 중 전체 또는 일부 공정을 두 번 이상 방문하는, 즉 재투입되는 제조 사양의 특징을 갖는다. 이러한 재투입 제조 특성은 반도체, TFT-LCD, PCB 제조와 같은 첨단 전자 제품의 제조 과정에서 흔히 볼 수 있다(Cho 등 2011, Choi 등 2011, Hekmatfar 등 2011, Choi 등 2005). 이러한 제조 산업의 경우에 제조 시스템을 구성하고 있는 장비의 구매 비용이 매우 높기 때문에, 시스템의 용량을 어떻게 구성할 것인지에 대한 의사결정이 전략적으로 가장 중요한 의사결정 중에 하나이다.

\* 이 논문은 2014년도 건국대학교 KU학술연구비 지원에 의한 논문임.

**Received:** 2 February 2016, **Revised:** 23 February 2016,  
**Accepted:** 21 March 2016

**\*Corresponding Author:** Seong-Hoon Choi  
E-mail: shchoi@smu.ac.kr  
Sangmyung Univ.

그러한 중요성에 따라 용량계획에 관한 연구가 많이 수행되어 왔고, 근래에 소개된 하이테크 산업에서 용량관리에 대한 서베이 논문을 통해서 해당 분야의 배경에 대해 확인할 수 있다(Wu 등 2005, Geng and Jiang 2009). 용량 관리 문제는 일반적으로 긴 계획기간, 불확실한 수요, 복잡하고 긴 제조 프로세스 등의 이유로 풀이가 쉽지 않다. 이러한 이유로 많은 기존 연구들이 수리모형이나 대기행렬 모형 등을 이용하여 접근하였다. 이러한 접근 방법은 빠른 시간 내에 최적해를 구할 수 있다는 장점이 있지만, 수리적인 전개를 위한 많은 사전 가정들로 인해 실제 상황과는 차이가 발생할 수밖에 없는 한계점을 갖고 있다.

본 연구에서는 상세한 제조시스템을 고려하고 동적 주문의 개별 생성과 랫(lot) 단위 가공 과정과 같은 매우 정교한 문제 상황을 고려하고자 한다. 그러기 위하여, 시물레이션을 이용하여 재투입이 존재하는 혼합흐름공정을 모형화한다. 과거에는 시물레이션을 이용하는 방법의 단점으로 긴 수행 시간이 있었으나, 최근 들어 컴퓨터 기술의 발달로 복잡한 제조시스템의 경우에도 비교적 짧은 시간에 시물레이션을 수행할 수 있게 되었다. 또한 용량계획에 관한 의사결정은 빠른 문제 해결을 요구하지 않기 때문에, 시간을 상대적으로 많이 발생하더라도 상세한 모사를 통한 의사결정을 할 수 있는 시물레이션을 이용한 접근 방법이 타당하다고 할 수 있다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다. 다음 장에서는 고려하는 문제의 상세한 설명이 소개된다. 3장에서는 고려하는 제조 시스템의 공정별 장비대수를 결정하는 방법이 제안되고, 4장에서는 시물레이션 모형에 대한 상세한 기술을 한다. 5장에는 제안 방법과 벤치마킹 방법의 계산실험을 통한 성능 비교결과가 정리되어 있다. 마지막 장에서는 본 논문의 결론과 추후 연구 방향이 제시된다.

## 2. 문제 설명

앞서 본 연구에서 용량계획 문제를 고려한다고 했는데, 고려하는 문제에서 구체적으로 결정하는 것은 장비 종류와 대수이다. 본 연구에서 고려하는 제조 시스템은 재투입이 있는 혼합흐름공정이므로, 결국 결정해야하는 것은 혼합흐름공정의 공정별 용량 크기, 즉 공정별 장비의 대수이다. 본 연구에서 고려하는 혼합흐름공정에서는 공정별로 동일한 종류의 장비를 사용한다고 가정한다. 즉, 각 공정별로 복수의 동일한 병렬 장비가 구성되어 있다.

일반적으로 고가의 장비를 사용하는 산업일수록 얼마

나 장비를 최대한 가동하여 단위 시간 내에 생산량을 최대화하는 것을 목적으로 삼는다. 따라서 본 연구에서는 문제의 목적함수로 생산율의 최대화를 고려한다. 문제에서 고려하는 제약은 설비투자 예산이다. 장비의 구매로 인한 용량 증가는 생산율의 증가를 보장할 수 있으나, 설비투자 예산 범위 내에서 최적의 장비 구매 조합을 찾아서, 시스템의 생산율을 최대화하여야 한다. 지금까지 설명된 문제를 수리 모형으로 표현하면 아래와 같다. 이 모형은 Lee and Choi(2011)에 의해서 소개되었다. 해당 연구에서는 혼합흐름공정에서의 용량계획 방법을 제안하였다면, 본 연구에서는 재투입이 존재하는 혼합흐름고정에서의 용량계획 방법을 제안한다는 차이점이 있다.

$$\text{Maximize } T \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K h_k x_k \leq B \quad (2)$$

$$x_k \geq 0 \text{ 그리고 정수, } k=1, 2, \dots, K$$

먼저 제약식에서,  $K$ 는 시스템(재투입이 있는 혼합흐름 공정)의 직렬 공정 수이고,  $x_k$ 는 공정  $k$ 의 장비 대수( $k=1, 2, \dots, K$ )로 고려하는 문제의 결정변수이다. 그리고  $h_k$ 는 공정  $k$ 의 장비의 대당 구매비용이고,  $B$ 는 미리 주어진 설비투자 예산이다. 목적함수는 생산율의 최대화이므로,  $T$ 는 공정별 장비 대수 조합으로 부터 얻어지는 시스템의 생산율으로써,  $f(x_1, x_2, \dots, x_K)$ 로 표현될 수도 있다. 함수  $f(x_1, x_2, \dots, x_K)$ 의 값은 수리적으로 얻어질 수 없고, 시물레이션을 통해 얻어지게 된다. 위 수식은 풀이를 위한 것이 아니고 문제의 이해를 돕기 위해 소개된 수리 모형이다.

고려하는 문제에서는 주문이 동적으로 도착하기 때문에 생산해야하는 제품의 종류는 주문 도착 전까지는 불확실한 상태이다. 제품의 종류, 주문 수량, 납기 등과 같은 주문 정보는 주문 도착 시 밝혀진다. 도착된 주문은 적절한 이송과 생산을 위하여 랫 형태로 나뉘어져 제조 시스템에 투입된다. 각 랫은 해당 제품 종류의 제조 공정계획(process plan)에 맞게 주어진 순서로 각 공정을 직렬로 방문하면서 가공된다. 재투입 사양의 경우도 제품별 제조 공정 계획에 명시되어 있다. 마지막 순서의 공정에서 가공이 완료되면 해당 랫의 생산이 완료된다. 본 연구에서는 고려하는 제조 시스템에서 가공할 수 있는 제품 종류의 수를  $N$ 개로 가정한다. 그리고 각 제품 종류별 제조 공정 계획은 미리 주어져 있다고 가정한다. 본 연구에서는

일부 제품 종류는 재투입이 되지 않고, 일부는 재투입이 된다고 가정한다. 시스템에서 사용되는 일정계획 규칙으로는 셋업시간을 고려하는 선입선출법이 모든 공정에서 사용된다. 이 규칙에서는 셋업시간이 발생하지 않는 랫을 최우선적으로 선택하여 가공하고, 그렇지 않은 경우에는 해당 공정에 먼저 도착한 랫을 선택하여 가공하게 된다.

### 3. 제안 방법

주어진 시스템의 공정별 장비대수를 결정하기 위해서, 본 연구에서는 휴리스틱 방법을 제안한다. 제안 휴리스틱에서는 먼저 각 공정별 장비 대수를 적절한 공식을 통해 일정한 수준으로 초기화 한 후, 장비가 부족한 또는 넘치는 공정을 선정하여, 각각 장비 대수를 증가 또는 감소시키는 방법을 적용한다. 상세한 절차를 다음 절부터 소개한다.

#### 3.1 공정별 장비 대수 초기화

공정별 초기 장비대수는 해당 공정에서 단위시간당 가공해야 하는 생산물량을 소화할 수 있도록 적절하게 설정할 수 있다. 예를 들어, 어떤 공정에서 가공하는데 10분이 걸리는 제품을 시간당 30개를 처리해야 한다면, 시간당 300분의 생산물량을 처리해야 한다는 것이고, 그러기 위해서는 해당 공정에 5대 정도의 장비가 필요하다는 것을 알 수 있다. 여기서 시간당 처리해야 하는 생산물량은 주문량의 의해서 결정되기 때문에, 주문 도착율, 즉 단위시간당 도착하는 주문의 개수와 해당 주문의 크기, 즉 생산해야 하는 제품 수량, 그리고 해당 제품 종류의 가공시간으로부터 추정할 수 있다.

본 연구에서는 Lee and Choi (2011)에서 제안한 장비 대수 초기화 공식을 기본적으로 이용하면서, 추가적으로 재투입 정보를 고려한다. 즉, 어떤 제품 종류가 어떤 공정을 두 번 방문하게 된다면, 처리해야 하는 생산물량도 방문 횟수의 배수로 고려해 준다. 따라서 공정별 초기 장비 대수( $x_k^1$ )를 설정하는 식을 표현하면 다음과 같다.

$$x_k^1 = \left\lceil \lambda \cdot \bar{Q} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (v_{ik} \cdot p_{ik})}{N} \cdot \epsilon \right\rceil, \text{ for all } k \quad (3)$$

위 식에서  $\lambda$ 는 단위시간당 주문 도착율,  $\bar{Q}$ 는 주문의 평균 크기,  $p_{ik}$ 는 제품 종류  $i$ 의 공정  $k$ 에서의 가공 시간(랫 단위), 그리고  $v_{ik}$ 는 제품 종류  $i$ 가 공정  $k$ 를 방문하

는 횟수이다.  $\epsilon$ 는 0에서 1사이의 값을 갖는 모수로, 적절한 값으로 지정되어 탐색 절차의 길이를 조절할 수 있다.

#### 3.2 장비 대수 증감 기준

본 연구에서는 장비를 증가시키거나 감소시켜야 하는 공정을 선정하기 위해 증가기준과 감소기준을 제시한다. 증가기준과 감소기준은 동전의 양면과 같다. 예를 들어, 생산물량이 가장 큰 공정의 장비 대수는 증가시키고, 생산물량이 가장 작은 공정의 장비 대수는 감소시킬 수 있다. 특정 지표의 최대값이나 최소값이냐에 따라 증가기준과 감소기준이 나누어진다. 먼저, 증가기준을 중심으로 설명한다. 장비 대수의 증가가 가장 필요한 공정을 찾는 지표들을 소개하기로 한다.

첫 번째로, 장비당 평균 가공시간이 가장 큰 공정을 장비가 우선적으로 필요한 공정으로 볼 수 있다. 첫 번째 기준에 의해서 선택되어 장비가 증가되는 공정의 인덱스를  $k_1^+$ 이라고 하면, 다음 식에 의해 장비 증가 공정이 선정된다.

$$k_1^+ = \operatorname{argmax}_k \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (v_{ik} \cdot p_{ik})}{x_k} \right\} \quad (4)$$

위의 식은 공정별로, 장비당 평균 가공시간을 계산한 후 가장 큰 값을 갖는 공정 인덱스  $k$ 를 구하게 된다. 평균 가공시간을 계산하기 위해 제품의 가공시간뿐 아니라 해당 제품이 해당 공정을 몇 번 방문하는지도 고려한다.

셋업시간을 추가로 고려하면 식 (4)에 제품 종류  $i$ 의 공정  $k$ 에서의 셋업시간( $s_{ik}$ )을 포함하는 식으로 두 번째 증가 기준을 완성할 수 있다.

$$k_2^+ = \operatorname{argmax}_k \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \{v_{ik} \cdot (s_{ik} + p_{ik})\}}{x_k} \right\} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)의 기준은 Lee 등 (2015)에서 소개된 증가 기준으로 정적 정보를 고려한다는 특징이 있는데, 본 연구에서는 추가적으로 다음과 같은 기준을 제시한다. 제품별 공정 방문 정보를 가공시간에만 적용해주는 기준이다.

$$k_3^+ = \operatorname{argmax}_k \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (s_{ik} + v_{ik} \cdot p_{ik})}{x_k} \right\} \quad (6)$$

본 연구에서는 시뮬레이션을 수행하므로 여러 가지 동적 정보를 파악할 수 있다. 따라서, 공정별 재고량, 공정별 평균 흐름시간 등의 정보를 이용하여 장비 증가/감소 공정을 선정할 수도 있다. 이와 같은 정보를 활용하여, 네 번째 증가 기준으로 공정별로 재공의 장비당 평균 체류 시간을 고려하여 체류시간이 긴 공정을 장비 증가 공정으로 선정한다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$k_4^+ = \operatorname{argmax}_k \{ \bar{f}_k / x_k \} \quad (7)$$

식 (7)에서,  $\bar{f}_k$ 는 공정  $k$ 에서의 랫당 평균 체류 시간, 즉 랫 하나가 어떤 공정에 도착해서 가공을 마치고 해당 공정을 떠날 때까지의 평균 소요 시간을 의미한다.

마지막으로 공정 중에 도착한 랫의 개수와 가공한 랫의 개수의 차이가 가장 큰 공정의 장비를 증가시킬 수 있다. 해당 공정에 도착한 랫의 수는 선행 공정에서 가공된 랫의 수와 같으므로, 연속된 두 공정에서 가공된 랫의 개수 차이로부터 해당 지표 값을 구할 수 있다.  $A_k$ 를 공정  $k$ 에서 가공한 랫의 개수라고 하면, 다섯 번째 증가 기준을 다음과 같이 표현할 수 있다. 단,  $A_0$ 는 시스템에 도착한 랫의 개수이다.

$$k_5^+ = \operatorname{argmax}_k \{ A_{k-1} - A_k \} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)은 Lee and Choi (2011)에서 소개된 증가 기준으로 재투입이 있는 혼합흐름공정을 고려하는 본 연구에서도 적용될 수 있다.

앞서 언급되었듯이, 장비 감소기준은 위에 소개된 지표에서 큰 값이 아니라, 작은 값을 갖는 공정을 찾으면 된다. 즉,  $\operatorname{argmax}_k$ 가  $\operatorname{argmin}_k$ 으로 바뀌면 된다. 예를 들어, 네 번째 장비 감소기준  $k_4^-$ 는  $\operatorname{argmin}_k \{ \bar{f}_k / x_k \}$ 이다.

### 3.3 공정별 장비 대수 결정 방법

앞서 소개된, 장비 대수 초기화 공식, 장비 증가 및 감소 기준을 이용하여 전체 시스템의 장비 대수를 결정할 수 있는 절차를 고안할 수 있다. 본 연구에서는 장비의 증가와 감소기준을 적절히 번갈아 가면서 적용하여 장비 대수 조합을 결정하는 방법을 제안하고자 한다. 먼저, 앞서 소개된 장비 대수 초기화 절차를 적용한 후, 우선적으로 임의로 선정된 증가기준에 따라 특정 공정의 장비를 증가시키는 작업을 예산이 소진될 때까지 반복한다. 다음으로 종료 조건에 따라 종료하거나, 임의로 선정된 감소기준에

따라 두 군데 공정의 장비를 감소시켜 준 후, 다시 장비를 증가시켜주는 단계로 돌아가는 절차를 반복적으로 수행할 수 있도록 한다. 자세한 절차를 단계별로 정리하면 다음과 같다.

#### 제안 방법 절차

Step 0.  $x_k = x_k^1$ , for all  $k$ ;  $B^r = B - \sum_{k=1}^K h_k x_k$ .

Step 1. Perform a simulation run.

Step 2. Select  $m$  among machine increase criteria according to the pre-specified probabilities.

Step 3. Among  $k$  such that  $B^r \geq h_k$ , find  $k_m^+$ ; If  $k_m^+$  exists, go to Step 4, o/w go to Step 5.

Step 4.  $x_{k_m^+} = x_{k_m^+} + 1$  and  $B^r = B^r - h_{k_m^+}$ ; Go to Step 1.

Step 5. If termination condition is satisfied, STOP, o/w go to Step 6.

Step 6. Select  $m$  among machine decrease criteria according to the pre-specified probabilities.

Step 7. Find  $k_m^-$ ;  $x_{k_m^-} = x_{k_m^-} - 1$  and  $B^r = B^r + h_{k_m^-}$ .

Step 8. Select  $m$  among machine decrease criteria according to the pre-specified probabilities.

Step 9. Find  $k_m^-$ ;  $x_{k_m^-} = x_{k_m^-} - 1$  and  $B^r = B^r + h_{k_m^-}$ ;

Go to Step 1.

제안 방법은 단계 2, 단계 6, 그리고 단계 8에서 각각 어떤 증감기준이 선정되느냐에 따라 성능이 달라질 수 있다. 증감기준을 임의로 선정하는 절차에서 특정 기준이 선정되는 확률을 동일하게 하여 선정하지 않는다. 본 연구에서는 각각 다섯 개의 증가기준과 감소기준을 고려하고 있는데, 기준마다 별도의 확률값에 따라 선정된다. 예를 들어, 다섯 증가기준에 대해 각각 20%, 40%, 10%, 10%, 20%의 확률을 미리 지정한 후, 지정된 확률에 따라 해당 증가기준을 선택하게 된다. 본 연구에서는 증감기준 선정 확률 값을 구하기 위하여 별도의 계산실험을 거친 후 얻어진 정보를 이용하고자 한다. 자세한 실험 절차와 증감기준 선정 확률을 결정하는 절차는 5장에 소개된다.

그리고 단계 5에서는 종료 조건을 검사하는데, 직전의 단계 5에서 측정된 생산율보다 현재 생산율이 10회 연속 개선되지 않으면 절차를 종료하게 된다.

## 4. 시뮬레이션 모형

재투입이 있는 혼합흐름공정에 동적으로 도착한 주문을 흘러보낸 후, 해당 시스템의 생산율을 측정하기 위하여, 본 연구에서는 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 시뮬레이션 모형을 포함하여 제안 휴리스틱 방법은 모두 C언어로 작성되어 구현되었다.

### 4.1 시스템 구성

재투입이 있는 혼합흐름공정을 구성하기 위해서는 공정의 개수와 공정별 장비 대수가 기본적으로 입력되어야 한다. 공정의 개수( $K$ )는 사용자에게 의해 지정되는 모수이며, 공정별 장비 대수( $x_k$ )는 장비 결정 방법에 의해 결정되는 변수이다. 다음으로 제품과 주문에 대한 입력 모수들이 지정되어 있어야 한다. 먼저, 제품 종류의 개수( $M$ )도 사용자에게 의해 지정되어야 한다. 각 제품 종류에 대한 기본 정보는 제품별 공정별 가공시간( $p_{ik}$ )과 셋업시간( $s_{ik}$ ) 정보이다. 본 연구에서 가공시간과 셋업시간 값은 다음과 같은 방법으로 생성한다. 먼저, 가공시간은 공정별로 기저 시간을 10에서 100사이의 정수값에서 균등하게 생성한다. 셋업시간도 유사하게 공정별로 기저 시간을 1에서 50사이의 정수값으로 균등하게 생성한다. 이후 제품별 가공시간과 셋업시간은 앞서 공정별로 구해진 기저시간과 해당 기저시간의 두 배 사이의 정수 값에서 균등하게 생성하게 된다.

제품별로 재투입여부는 50%의 확률로 랜덤하게 결정되며, 재투입 제품으로 결정되면 시스템의 전체 공정을 다시 한 번 거쳐야 한다. 따라서 재투입이 되는 제품은  $2 \times K$ 개의 작업이 수행되어야 한다. 재투입이 없는 제품은 공정의 수와 같은  $K$ 개의 작업만 수행된다.

주문은 동적으로 도착하며 주문의 도착간격시간은 지수분포를 따른다고 가정한다. 평균 주문 도착율은 단위시간당 0.01개로 지정한다. 주문의 크기, 즉 생산해야하는 제품의 양(랏 단위)은 주문이 도착할 때마다 개별적으로 생성되며, 1에서 50사이의 정수값에서 균등하게 생성한다. 따라서 주문의 평균 크기  $\bar{Q}$ 는 25.5 ( $= (50+1)/2$ )임을 알 수 있다.

마지막으로 공정별 장비의 가격( $h_k$ )은 1에서 10사이의 실수값에서 균등하게 생성한다. 공정별로 장비 가격은 동일하다. 장비 투자 예산( $B$ )은 먼저 장비 대수를 앞서 소개한 초기화 방법으로 결정된 후(단,  $x_k^1$ 를 구할 때 모수  $\epsilon$ 는 1로 지정한다.), 결정된 장비를 모두 구매할 수 있는

예산으로 지정한다. 즉,  $B = \sum_{k=1}^K h_k x_k^1$ 로 얻는다.

### 4.2 시뮬레이션 작동 과정

앞서 소개된 주문 생성 절차에 의해 주문이 시스템에 도착하면 먼저, 첫 공정에 투입된다. 첫 공정에 도착한 주문은 랏 단위로 분할되어 대기하게 된다. 그때 가공 작업이 가능한 장비가 있다면, 랏 하나가 해당 장비에 로드되어 가공이 시작된다. 모든 장비가 가공 중에 있다면, 가공 가능한 장비가 생길 때 까지 대기하게 된다. 가공 가능한 장비가 생기면, 일정계획 규칙(본 연구에서는 셋업시간을 고려한 선입선출법을 사용한다)에 따라 대기 중인 랏 중에 하나를 선택하여 가공을 시작한다. 해당 장비에서 방금 가공이 완료된 랏은 해당 제품의 제조 공정 계획에 따라 다음 공정으로 이동된다. 새로운 공정에 도착한 랏은 위와 동일한 절차에 따라 가공되거나 대기한다. 가공 완료된 공정에서의 작업이 해당 제품의 제조 공정 계획 상 마지막 작업이라면, 해당 랏의 생산이 완료가 된다. 주문의 완성은 주문에 속한 모든 랏의 생산이 완료되었을 때 이루어진다.

시뮬레이션은 단위시간 0부터 미리 지정된 종료시간까지 수행된다. 목적함수인 생산율을 측정하기 위해서 유효한 시간에 완료된 랏의 수를 해당 시간으로 나누어 계산한다. 이때 유효한 시간은 미리 지정된 유휴 시간 이후부터 종료시간까지 시간으로 한다. 이러한 측정 방법은 단위시간당 랏의 수를 이용한 기존 연구(Kim 등 1998)의 방법을 활용한 것이다.

## 5. 계산 실험

제안 방법의 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서 계산 실험을 수행한다. 앞서 소개된 시뮬레이션 모형을 이용하여 다양한 문제 세트에 대해 벤치마킹 방법과 비교 실험을 통해 성능을 검증하고자 한다. 주된 비교 실험을 수행하기 전에, 제안 방법에서 중요한 역할을 하는 증감 기준 선정 확률 값을 지정하기 위한 예비 실험을 먼저 수행한다. 참고로 본 연구의 계산 실험은 3.2GHz의 i5 CPU와 3GB의 RAM를 갖는 PC에서 수행되었다.

### 5.1 증감기준 선정 확률 결정

본 연구에서는 다섯 가지의 증감기준과 다섯 가지의 감소기준이 소개되었고, 각 기준은 제안 방법에서 임의로 선정될 수 있다. 각 기준마다의 선정 확률은 다르게 지정

**Table 1.** Preliminary test results for the machine increase criteria

Criteria	Number of best instances	Selection probability
1	3	$\frac{3}{42}$
2	8	$\frac{8}{42}$
3	25	$\frac{25}{42}$
4	3	$\frac{3}{42}$
5	3	$\frac{3}{42}$

될 수 있는데, 이번 절의 예비 실험을 통해 해당 값을 지정하고자 한다. 기본적으로 우수한 성능을 보이는 기준이 자주 선정되는 것이 좋다고 기대되기 때문에 높은 선정 확률 값을 갖는 것을 기대하면서, 해의 다양성을 확보하기 위해서 성능이 좋지 않은 기준 역시도 적은 확률로 선정될 수도 있는 구조를 갖도록 한다.

먼저, 증가기준 선정 확률 값을 결정하기 위하여, 각 증가기준을 예비 문제 세트에 적용한 후 최고 생산율을 나타낸 횟수에 따라 확률 값을 선정한다. 예비 문제 세트는 다음과 같이 생성하였다. 제품 종류의 개수는 10과 30, 공정의 개수는 10과 20, 그리고 각 조합마다 10번의 반복 생성을 통해 총 40개의 문제 조합을 생성하였다. 각 증가기준을 이용하여 장비 대수 조합을 결정하기 위하여 기존 연구(Lee and Choi 2011)에서 제안된 단조증가법을 이용하였다. 시뮬레이션 수행시 워업 시간은 1,000 단위시간, 종료시간은 20,000 단위시간으로 설정하고, 기계 대수 초기화에 필요한 모수( $\epsilon$ )는 0.8로 설정하였다. Table 1에는 각 증가 기준마다 40번의 문제 중 최고 생산율을 보인 횟수가 정리되어 있다(두 번째 열). 추가적으로, 본 예비 실험의 목적, 즉 증가기준마다 제안방법에서 해당 기준이 선정될 확률이 구해져 있다(세 번째 열). 증가기준 선정 확률 값은 최고 생산율 횟수 비율에 따라 계산되었다. 예를 들어 세 번째 증가기준의 경우, 해당 기준의 최고 생산율 횟수(25)를 전체 다섯 가지 증가기준의 최고 생산율 횟수의 합(42)으로 나누어  $0.595(=25/42)$ 이라는 값을 얻게 된다(최고 생산율 값을 동물이 나올 수 있기 때문에 분모가 40보다 클 수 있다).

감소기준에 대해서도 동일한 절차를 적용하는데, 다만, 이 경우에는 Lee and Choi (2011)에서 소개된 방법 중

**Table 2.** Preliminary test results for the machine decrease criteria

Criteria	Number of best instances	Selection probability
1	1	$\frac{1}{44}$
2	10	$\frac{10}{44}$
3	21	$\frac{21}{44}$
4	12	$\frac{12}{44}$
5	0	0

단조감소법이 사용되어 장비 조합을 결정한다. Table 2에 다섯 감소기준의 성능 결과와 그에 따른 선정 확률값이 정리되어 있다.

Table 1과 Table 2에서 보듯이, 가장 우수한 성능을 보이는 것은 본 연구에서 제안한 세 번째 증감기준으로 재투입 정보를 고려하되, 가공시간에만 반영해 주는 기준이다. 시뮬레이션의 결과로 얻어지는 동적인 정보를 사용하는 네 번째, 다섯 번째 기준이 정적 기준에 비해 좋은 성능을 보이지 못했다. 앞서 언급했듯이, 가장 우수한 성능을 보이는 세 번째 기준만을 제안 방법에서 사용하는 것이 아니라, 해의 다양성 측면에서 다섯 가지 기준을 모두 사용한다. 하지만, 위 실험 결과를 반영하여 우수한 성능을 보인 기준이 자주 사용될 수 있도록 하여 해의 우수성을 담보토록 한다.

## 5.2 제안 방법 성능 비교

이번 절에서는 본 연구의 제안 방법과 기존 방법과의 성능 비교 실험을 통해 제안 방법의 성능을 검증하고자 한다. 벤치마킹으로 사용될 기존방법은 Lee and Choi (2011)의 연구에서 가장 좋은 성능을 보였던, 반복증감법<sup>1</sup>과 반복증감법<sup>2</sup>이다. 벤치마킹 방법의 자세한 사항은 해당 논문을 참조하기 바란다.

비교실험을 위한 문제 세트는 다음과 같이 생성하였다. 제품 종류의 개수는 10, 20, 30으로 세 수준과 공정의 개수는 10, 15, 20으로 세 수준, 그리고 각 조합마다 10번의 반복 생성을 통해 총 90개의 문제 조합을 생성하였다. 시뮬레이션 수행시 워업 시간은 1,000 단위시간, 종료시간은 20,000 단위시간으로 설정하였다. 제안방법에서 장비 대수 초기화에 필요한 모수( $\epsilon$ )는 0.6으로 설정하였다. Table 3에 비교실험 결과가 정리되어 있다. 각 방법마다

**Table 3.** Comparison test results

Tested method	Avg. throughput rate	Number of best instances
Proposed method	0.1533	56
Benchmark 1	0.1475	12
Benchmark 2	0.1509	24

**Table 4.** Results of the paired-t test

	Benchmark 1	Benchmark 2
Proposed method	**	**

\*\* Statistically different at the significance level of 0.001

의 평균 생산율과 최고 생산율 횟수가 정리되어 있다.

Table 3에서 알 수 있듯이, 제안 휴리스틱이 평균 생산율을 측면에서 벤치마킹보다 높은 생산율을 보이고 있으며, 전체 90개의 문제 세트에서 절반이상의 경우에 가장 높은 생산율을 찾을 수 있었다. 제안방법과 벤치마킹 방법간의 통계적 유의성을 확인하기 위하여, 제안방법과 각 벤치마킹 방법 간에 쌍-t 검정을 수행하였다. 결과를 Table 4에 정리하였다.

쌍-t 검정 결과, 두 벤치마킹 방법에 대해 유의수준 0.001에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 실험결과로부터 제안방법이 통계적으로도 벤치마킹 방법들에 비해 유의하게 우수한 성능을 보인다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 재투입이 있는 혼합흐름공정에서의 용량계획 문제를 다루었다. 주어진 설비 투자 예산 제약하에서 제조 시스템의 생산율을 최대화 할 수 있는 휴리스틱 방법론을 제안하였다. 제안된 방법에서는 공정별 장비 대수를 적절히 증가 또는 감소시키는 탐색 절차가 고안되었다. 재투입이 존재하는 혼합흐름공정 및 동적으로 도착하는 주문 등의 상황을 시뮬레이션 모형으로 구현하였다. 계산 실험을 통해서 기존 방법과의 비교를 통하여 제안방법의 우수성을 입증하였다.

본 연구는 여러 측면에서 확장이 가능하다. 먼저 최적 장비 대수 조합을 탐색하기 위해 계산 시간을 조금 더 투여할 수 있는 여유가 있기 때문에, 유전 알고리즘과 같은 메타 휴리스틱 방법을 적용한다면 해의 개선을 기대할 수 있다. 이러한 방법은 기존 연구에서 재투입을 고려하지 않는 혼합흐름공정에 대해 적용된 바 있다(Hong 등, 2014).

또한 재투입 특성이나, 일정계획 측면에서 조금 더 실제적인 상황을 반영한 문제를 고려할 수도 있다. 주문의 도착이나 장비의 유지 관리 측면에서도 조금 더 확률적인 상황을 반영한 문제를 연구할 수 있겠다.

## References

1. Cho, H.M., Bae, S.J., Kim, J., Jeong, I.J., (2011) "Bi-objective scheduling for reentrant hybrid flow shop using Pareto genetic algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 61, pp. 529-541.
2. Choi, S.W., Kim, Y.D., and Lee, G.C., (2005) "Minimizing total tardiness of orders with reentrant lots in a hybrid flowshop", *International Journal of Production Research*, Vol. 43, pp. 2149-2167.
3. Choi, H.S., Kim, J.S., and Lee, D.H., (2011) "Real-time scheduling for reentrant hybrid flow shops: A decision tree based mechanism and its application to a TFT-LCD line", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 3514-3521.
4. Geng, N. and Jiang, Z. (2009), "A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry", *International Journal of Production Research*, Vol. 47, pp. 3639-3655.
5. Hekmatfar, M., FatemiGhomi, S.M.T., and Karmi, B. (2011) "Two stage reentrant hybrid flow shop with setup times and the criterion of minimizing makespan", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, pp. 4530-4539.
6. Hong, J.M., Choi, S.H., Kim, J.U., and Lee, G.C., (2014) "Genetic Algorithms for Capacity Planning of High-tech Manufacturing Systems", *Entrue Journal of Information Technology* Vol. 13, No. 2, pp. 37-48.
7. Kim, Y.D., Lee, D-H., Kim, J-U., and Roh, H-K., (1998), "A Simulation Study on Lot Release Control, Mask Scheduling, and Batch Scheduling in Semiconductor", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, pp. 107-117.
8. Lee, G.C., and Choi, S.H., (2011), "A simulation study on capacity planning in hybrid flowshops for maximizing throughput under a budget constraint", *Journal of the Korea Society for Simulation* Vol. 20, pp. 1-10.
9. Lee, G.C., Hong, J.M., Kim, J.U., and Choi, S.H., (2015), "A Study on Capacity Planning for Reentrant Hybrid Flowshop", *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2015*.
10. Wu, S.D., Erkoç, M., and Karabuk, S. (2005), "Managing capacity in the high-tech industry: a review of literature", *The Engineering Economist*, Vol. 50, pp. 125-158.



**이 근 철** (gcleee@konkuk.ac.kr)

1997 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 석사  
2003 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 공학박사  
2006~현재 건국대학교 경영대학 재직중

관심분야 : 제조 및 서비스 시스템의 운영 및 설계 방법론



**홍 정 만** (hongjungman@gmail.com)

1995 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 (공학석사)  
2000 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 (공학박사)  
2002~현재 LG CNS 재직중

관심분야 : Convergence Technology, Business Innovation



**김 정 욱** (jugkim@lgcns.com)

1994 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 석사  
2000 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 공학박사  
2000~현재 LG CNS 재직중

관심분야 : 하이테크기업의 운영 혁신, 공급망 최적화



**최 성 훈** (shchoi@smu.ac.kr)

1988 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 (공학석사)  
2002 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 (공학박사)  
2003~현재 상명대학교 경영공학과 교수 재직중

관심분야 : 생산운영관리 응용, 컴퓨터 시뮬레이션 이론 및 응용