

# 혼합흐름공정에서 예산제약하에 생산율을 최대화하는 용량계획에 관한 시뮬레이션 연구

이근철<sup>1</sup> · 최성훈<sup>2\*</sup>

## A Simulation Study on Capacity Planning in Hybrid Flowshops for Maximizing Throughput Under a Budget Constraint

Geun-Cheol Lee · Seong-Hoon Choi

### ABSTRACT

In this study, we consider a capacity planning problem where the number of machines at each workstation is determined in manufacturing systems of top-edge electronic products such as semiconductor or display. The considered manufacturing system is the typical hybrid flowshop which has identical parallel machines at each workstation and the setup operation occurs when the types of consecutively processed products are different. The objective of the problem is finding good combinations of the numbers of machines at all workstations, under the given capital amount for purchasing machines. Various heuristic methods for determining the numbers of machines at workstations are proposed and the performances were tested through a series of computational experiments. In the study, a simulation model has been developed in order to simulate the considered manufacturing system with dynamic orders and complex process. The simulation model is also used for conducting the computational comparison test among various proposed methods.

**Key words** : Capacity planning, Hybrid flowshop, Scheduling, Simulation

### 요약

본 연구에서는 반도체, 디스플레이 등과 같은 첨단 전자제품 제조 시스템에서의 공정별 기계 대수를 결정하는 용량계획 문제를 고려한다. 제조 시스템은 공정별로 동일한 병렬기계가 존재하는 혼합흐름공정의 형태를 갖고 있으며, 각 기계 마다 서로 다른 제품 종류를 연속적으로 가공할 때는 셋업 작업이 발생한다. 설비를 구매할 수 있는 예산에 제약이 있는 상황에서 제조 시스템의 생산율을 최대화 할 수 있는 공정별 기계 대수 조합을 결정해 주고자 한다. 혼합흐름공정 형태의 복잡한 제조시스템을 대상으로 주문이 동적으로 도착하고 여러 가지 일정계획방법을 적용하는 것을 모델링 하기 위하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 본 연구에서는 시뮬레이션 실행을 포함한 다양한 조합의 기계 대수 증감 휴리스틱 방법을 제안하여 해를 도출하였다. 제안된 방법들은 일련의 계산실험을 통하여 그 성능을 비교 평가하였다.

**주요어** : 용량계획, 혼합흐름공정, 일정계획, 시뮬레이션

## 1. 서론

고가의 장비를 이용하여 제품을 만들어내는 첨단 제조 산업에서는 장비를 얼마나, 어떻게 도입할 것인지에 대한 답을 찾는 것이 운영전략 관점에서 가장 중요한 의사 결정 중에 하나로 인식된다. 이러한 산업에 속하는 가장 대표적인 반도체 제조의 경우에, 장비 하나의 가격은 낮은 백만 불에서 높게는 천만 불을 넘어서기도 하며(Barahona

\*이 논문은 2009년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

접수일(2011년 1월 20일), 심사일(1차 : 2011년 9월 5일), 게재 확정일(2011년 9월 5일)

<sup>1)</sup> 건국대학교 경영대학 경영학 전공

<sup>2)</sup> 상명대학교 경영공학과

주 저 자 : 이근철

교신저자 : 최성훈

E-mail: shchoi@smu.ac.kr

등, 2005) 공장 하나를 건설하는 데는 수십억 불이라는 큰 금액이 투자되기 때문에(Huh 등, 2005), 투자 대비 효과를 극대화하기 위한 신중한 의사 결정이 필수 불가결하다.

장비를 도입하는 의사 결정, 즉 용량관리/계획에 관한 연구는 그 중요도만큼이나 많은 연구가 수행되어 왔다. 최근에 발표된 Geng and Jiang(2009)의 서베이 연구에서는 기존 연구들을 수리 모형 기반의 확정적 접근법, 대기행렬 또는 시뮬레이션 기반의 확률적 접근법 등에 따라 분류하여 정리하였고, 또 하나의 서베이 연구인 Wu 등(2005)에서는 용량관리의 의사결정 수준을 전략적, 전술적, 운영적 차원으로 분류하여 기존연구를 정리하였다.

용량관리/계획의 결과에 따른 기업의 재무적 지출은 장기간에 걸쳐 해당 기업에 큰 영향을 주기 때문에, 여러 가지 상황 및 요인을 고려하여 신중하게 계획을 수립하여야 한다. 여러 요인을 고려할수록 실제 상황에 근접한 문제를 정의할 수 있지만, 그럴수록 문제의 난이도는 높아진다. 기존 연구에서는 용량관리/계획 문제를 어렵게 하는 요인으로 빠른 기술 발전, 수요의 불확실성, 복잡한 제조 프로세스, 긴 제조 리드타임 등을 들고 있다(Geng and Jiang, 2009; Wu 등, 2005).

첨단 제조 산업의 용량관리/계획 문제에 대한 해법으로 많은 기존 연구들이 수리모형이나 대기행렬모형을 이용하여 최적해를 빠른 시간 안에 얻기도 하였지만, 모형 수립을 위한 많은 가정으로 실제 현상과는 동떨어진 결과를 제시할 수밖에 없는 한계를 갖고 있기 때문에, 최근의 연구 방향도 그러한 차이를 좁히기 위한 노력에 집중되고 있다(Shanthikumar 등 2007). 이에 반해, 시뮬레이션을 이용한 방법은 긴 수행시간과 많은 데이터를 필요로 한다는 단점이 있지만, 첨단 산업의 복잡한 제조 프로세스와 동적인 수요 패턴을 상세히 묘사할 수 있다는 측면에서 큰 이점이 있다. 특히, 수행시간 측면에서는 용량관리/계획 문제가 빠르게 답을 구해야하는 성격을 갖고 있지 않다는 점, 컴퓨팅 시간에 많은 향상이 있었다는 점에서 시뮬레이션 접근 방법의 수행시간에 대한 단점은 상당히 상쇄되었다고 여겨진다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 용량관리/계획 문제를 접근하고자 하며, 시뮬레이션 접근 방식의 장점을 활용하여 수리적인 모형은 고려할 수 없는 첨단 제조 시스템의 여러 가지 실질적인 특징을 고려하고자 한다. 첫째, 수요의 불확실성을 반영하기 위하여 다양한 주문이 동적으로 도착하는 상황을 고려한다. 둘째, 복잡한 생산라인을 표현하기 위하여 혼합흐름공정, 즉 병렬기계가 작업장마다 존재하는 흐름 라인을 모형화한다. 마지막으로,

전체 생산라인에 적용되는 일정계획 방법과 그에 따른 셋업을 고려한다. 일정계획은 가장 상세한 의사결정이기 때문에 상위 수준의 용량관리/계획 의사결정과는 관계가 멀다고 생각될 수 있지만, 일정계획 방법과 셋업은 용량 손실을 가장 많이 초래하는 가장 큰 다섯 가지 요인에 포함될 만큼(Robinson 등, 2003) 정확한 용량관리/계획을 위해 고려되어야 하는 중요한 요인이다. 다음 장에서는 본 연구에서 고려하는 문제에 대하여 자세히 설명하고, 3장에서는 제안 방법을 소개한다. 계산 실험 및 결과는 4장에 정리하고, 마지막 장에 결론과 시사점에 대해 언급한다.

## 2. 문제 설명

본 연구에서는 혼합흐름공정 형태의 제조시스템을 고려하고 있다. 혼합흐름공정은 공정마다 한 개 이상의 병렬기계가 존재하는 확장된 흐름공정으로, 제조 프로세스가 복잡한 반도체, TFT-LCD, PCB와 같은 첨단전자제품의 생산 시스템이 이러한 형태를 갖는다.

본 연구에서는 생산율을 최대화하는 공정별 병렬기계 대수를 결정하고자 한다. 생산율은 미리 지정한 단위시간 동안 가공 완료된 생산량으로 부터 구할 수 있다. 충분한 생산 용량을 보유한다면 투입율에 가까운 생산율을 얻을 수도 있겠지만, 생산용량을 보유하기 위한, 즉 공정별 병렬기계를 구매하기 위한 예산에 제약이 있고, 고려하는 생산시스템의 특성상 이상적인 생산율을 실제로 얻기는 어렵다. 특히 본 연구에서는 종류가 다른 제품을 연속해서 가공할 때 셋업시간이 발생하는 것을 고려하기 때문에 생산율의 지속적인 개선이 쉽지않은 않다. 정리하면 본 연구에서는 장비 구매 예산에 제약이 있는 상황에서 고려하는 생산시스템의 생산율을 주어진 기간동안 최대화할 수 있는 공정별 기계 대수 조합을 결정하고자 한다.

본 연구에서 고려하는 문제를 수리적인 모형으로 표현하면 다음과 같다.

<기호>

$x_k$ : 공정  $k$ 의 기계 대수 ( $k=1, 2, \dots, K$ )

$c_k$ : 공정  $k$ 의 기계 대당 가격

$K$ : 시스템을 구성하는 직렬 공정의 수

$B$ : 설비투자 예산

$T$ : 기계 조합으로 부터 얻어지는 시스템의 생산율  
 $= f(x_1, x_2, \dots, x_K)$

<모형>

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

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

$x_k$ 는 비음 정수,  $k=1, 2, \dots, K$

고려하는 생산 시스템에서 생산물량은 미리 지정되어 있지 않고, 동적으로 도착하는 주문에 의해 확정된다. 주문은 고객이 요청하는 특정 제품의 종류, 수량, 납기 등의 정보를 갖고 있으며, 이와 같은 주문 정보는 주문이 도착한 직후에 알 수 있다. 단, 제품의 종류 및 제조 정보는 미리 알려져 있다고 가정한다. 도착한 주문은 자동적으로 첫번째 공정에 투입된다고 가정한다. 주문은 랫(lot) 단위로 나누어져 생산라인에서 가공되고 이동된다. 각 랫은 첫번째 공정부터 마지막 공정까지 해당 제품 종류의 제조 정보에 따라 순서대로 가공된다. 주문에 속한 모든 랫이 모든 공정을 마쳤을 때 해당 주문도 생산 완료된다.

각 랫은 공정에 도착했을 때 가공 가능한 기계가 있는 경우에는 해당 기계에서 바로 가공이 시작되지만, 해당 공정의 모든 기계에 작업중인 경우에는 재공으로 가공 순서를 기다려야 한다. 한 기계에서 랫의 가공이 끝난 경우에 다음 가공할 랫을 재공 랫 중에서 선택을 하는데, 이때 미리 지정된 디스패칭 규칙이 적용된다. 본 연구에서는 고려하는 디스패칭 규칙은 FIFO(First In First Out), SPT(Shortest Processing Time), SFIFO(Setup considered FIFO), SSPT(Setup considered SPT), 이렇게 네 가지이며, 이 중 하나의 규칙이 적용되면, 생산 시스템의 모든 공정에서 해당 규칙 하나만 사용한다. 기존 용량계획에 관한 연구가 FIFO 한 가지만을 고려하는 것에 비하여 좀 더 확장된 고려 사항이라 할 수 있다.

그밖에 시스템에 대한 가정은 다음과 같다. 모든 랫은 모든 공정을 거쳐 완성된다. 한 기계에서 가공이 시작된 랫은 중단없이 가공이 완료된다. 공정마다 재공 공간이 존재하며 그 크기에 제한은 없다; 공정간 이동 거리는 무시할 만큼 작고, 기계 고장은 발생하지 않는다.

### 3. 제안 방법

공정별 기계 대수를 결정하기 위해서 본 연구에서는 휴리스틱 방법을 제안한다. 제안되는 방법을 구성하는 주요 모듈로는 기계 대수 초기화 기준, 기계 대수 증가 기준, 기계 대수 감소 방법 등이 있다. 각 모듈별로 상세히 설명한 후 각 모듈을 통합하는 절차를 소개한다.

#### 3.1 기계 대수 초기화

고려하는 시스템에서 완제품을 생산하기 위해서는 최소한 한 대 이상의 기계가 공정마다 존재하여야 한다. 공정별로 한 대씩을 초기 기계 대수로 설정할 수도 있지만, 생산율을 확인하기 위한 시뮬레이션 횟수를 많이 증가시킬 수 있기 때문에 적정수준의 초기 기계 대수 값을 찾는 필요가 있다.

이상적으로 각 공정별로 투입물량(랫 단위) 만큼 생산할 수 있게 기계 대수를 지정하면, 부족하지도 넘치지도 않는 공정 용량을 지정할 수 있다. 단위시간당 공정별로 투입되는 물량은 주문의 평균 크기( $\bar{Q}$ )에 주문 도착율(단위시간당 도착하는 주문 개수,  $\lambda$ )로부터 구할 수 있다. 이 단위시간당 투입물량을 공정별 생산시간으로 나누어 주면 필요한 공정별 기계 대수가 추정할 수 있다.

하지만, 위에서 구한 단위시간당 투입물량은 예측치에 불과하고 그것도 첫 번째 공정에 초점에 맞추어져 있다. 공정별 단위시간당 투입물량은 후반으로 갈수록 점점 떨어질 것이라고 예상할 수 있고, 초기화 절차에서 기계 대수를 확정할 필요가 없기 때문에 추정된 공정별 기계 대수에 1보다 작은 모수( $\epsilon$ )를 곱하여 제어를 해줄 필요가 있다. 본 연구에서는 아래 식을 이용하여 공정별 초기 기계 대수를 정하고, 식에 포함된 모수 값은 실험을 통하여 적절한 값을 찾는다.

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

위 식에서  $p_{ik}$ 는 제품 종류  $i$ 의 공정  $k$ 에서의 가공 시간을 의미하며(랫 단위), 모수  $\epsilon$ 는 0에서 1사이의 값을 갖는다.  $\epsilon$ 값이 클수록 최종 기계 대수에 가까운 값으로 초기화가 되어 시뮬레이션 시간이 상대적으로 적게 소요될 것으로 예상되고,  $\epsilon$ 값이 작을수록 1에 가까운 값으로 기계 대수가 초기화 되어 상대적으로 많은 시뮬레이션 횟수가 필요할 것으로 예상된다.

#### 3.2 기계 대수 증가 기준

예산에 여유가 있는 경우에 생산 시스템의 기계 대수를 증가시켜 생산율을 향상시킬 수 있다. 기계 대수를 증가시키는 방법은 하나의 공정 또는 복수의 공정에서 하나의 기계 또는 복수의 기계를 증가시키느냐에 따라 여러 가지 방법 조합이 나올 수 있다. 어떤 조합이든 하나의 공정에서 기계 한 대 증가시키는 것을 여러 번 수행하는 것

이기 때문에, 기계를 증가시킬 공정을 선택하는 기준을 우선 개발한다.

먼저, 문제의 목적함수와 제약식을 고려한다면, 단가 대비 가장 많은 생산을 향상이 예상되는 공정의 기계를 선택할 수 있다. 증가 기준  $m$ 에 의해서 선택되어 기계가 증가되는 공정의 인덱스를  $k_m^+$ 이라고 하자.

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

위의 기준에서 단가를 고려하지 않고 공정을 선택할 수도 있다.

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

본 연구에서는 공정별 셋업시간을 고려하기 때문에 위에서 소개된 식에 제품 종류  $i$ 의 공정  $k$ 에서의 셋업시간  $s_{ik}$ 을 추가하여 공정을 선택할 수 있다.

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

$$k_4^+ = \operatorname{argmax}_k \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (s_{ik} + p_{ik})}{x_k} \right\} \quad (7)$$

위에서 소개된 공정 선택 기준은 정적(static) 정보를 이용하고 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 동적(dynamic) 정보 또한 구할 수 있기 때문에 시뮬레이션으로부터 몇 가지 정보를 이용하여 용량을 증가시킬 공정을 선택할 수 있다. 첫 번째로는 가장 재공이 많은 공정을 선택한다.  $I_k$ 를 공정  $k$ 에 최종 재공량이라고 하면, 다음 식으로부터 공정을 선택할 수 있다(각 공정의 최종 재공량 값은 가장 최근 수행된 시뮬레이션 결과로부터 얻을 수 있다). 위와 마찬가지로 기계의 단가를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 두 가지가 있을 수 있다.

$$k_5^+ = \operatorname{argmax}_k \{I_k / c_k\} \quad (8)$$

$$k_6^+ = \operatorname{argmax}_k \{I_k\} \quad (9)$$

두 번째로는 공정마다의 재공품의 체류 시간을 고려한다.  $\bar{f}_k$ 를 공정  $k$ 에서의 랫당 평균 체류 시간, 즉 해당 랫이 해당 공정에 도착해서 가공을 마칠 때까지 소요되는 시간이라고 하면, 다음 식들로 부터 기계 증가 공정을 선택할 수 있다.

$$k_7^+ = \operatorname{argmax}_k \{ \bar{f}_k / (c_k \times x_k) \} \quad (10)$$

$$k_8^+ = \operatorname{argmax}_k \{ \bar{f}_k / x_k \} \quad (11)$$

마지막으로 공정별로 가공한 랫의 개수를 고려할 수 있다. 연속된 두 공정에서 가공된 랫의 개수 차이가 많이 발생하는 경우, 두 공정 중 후속 공정의 기계 대수를 증가시켜 그 차이를 줄일 수 있다.  $\Delta_k$ 를 공정  $k$ 에서 가공한 랫의 개수라고 하면, 다음 식으로부터 공정을 선택할 수 있다. 여기서,  $\Delta_0$ 는 시스템에 도착한 랫의 개수라고 지정한다( $\Delta_k$ 와  $\Delta_0$ 값은 시뮬레이션 수행 기간동안 가공한 또는 도착한 랫의 개수로, 가장 최근 수행된 시뮬레이션 결과로부터 얻을 수 있다).

$$k_9^+ = \operatorname{argmax}_k \{ (\Delta_{k-1} - \Delta_k) / c_k \} \quad (12)$$

$$k_{10}^+ = \operatorname{argmax}_k \{ \Delta_{k-1} - \Delta_k \} \quad (13)$$

본 연구에서는 위에서 제시된 10가지 기준을 이용하여 기계 대수를 증가시킬 공정을 선택한다.

### 3.3 기계 대수 감소 기준

기계 대수를 감소시키는 공정의 선택은 앞 절에서 소개된 기준을 역으로 적용할 수 있다. 예를 들어 3.2절에서 소개된 여섯번째 기준은 최종 재공량이 가장 많은 공정을 선택하는 것인데, 반대로 최종 재공량이 가장 적은 공정을 선택하여, 해당 공정의 기계 대수를 하나 감소시킬 수 있다. 단 현재 보유하고 있는 기계 대수가 두 대 이상인 공정만 선택될 수 있다. 감소 기준  $m$ 에 의해 선택되어 기계가 감소되는 공정의 인덱스를  $k_m^-$ 이라고 하면, 모든  $m$ 에 대해서  $k_m^-$ 은  $k_m^+$ 을 구하는 식은 동일한데, 단지  $\operatorname{argmax}_k$ 가  $\operatorname{argmin}_k$ 으로 바뀌었을 뿐이다. 예를 들어  $k_6^- = \operatorname{argmin}_k \{I_k\}$ 이다. 정리하면, 증가 기준과 마찬가지로 총 10가지의 기계 대수 감소 기준이 가능하다.

### 3.4 공정별 기계 조합 결정 방법

앞서 소개된, 기계 대수 초기화, 증가 및 감소 기준을

이용하면 매우 다양한 조합의 통합 절차를 고안할 수 있다. 본 연구에서는 크게 두 가지 종류로 나누어, 단조 증감 방법과 반복 증감 방법을 소개한다. 단조 증감 방법은 기계 대수를 증가 또는 감소 절차만을 진행하여 기계 조합을 결정하는 방법이고, 반복 증감 방법은 증가와 감소를 여러 번 반복하여 기계 조합을 결정하는 방법이다. 먼저 단조 증감 방법에 대해 자세히 설명한다.

### 3.4.1. 단조 증감 방법

단조 증감 방법은 다시 단조 증가법과 단조 감소법 두 가지 종류로 나뉜다. 먼저 단조 증가법은 기계 조합을 초기화 한 후, 기계 대수 증가 방법을 이용하여 예산을 초과하기 전까지 기계 대수를 증가시키는 방법이다. 아래 절차에서  $g$ 는 기계 대수 증감 단위의 크기이고  $B^r$ 은 남아 있는 예산을 말한다.

#### 단조 증가법 절차( $\epsilon, m, g$ )

- Step 0.  $x_k = x_k^1$ , for all  $k$ ;  $B^r = B - \sum_{k=1}^K c_k x_k$ .
- Step 1. Perform a pre-specified simulation run.
- Step 2. Among  $k$  such that  $B^r > g \times c_k$ , find  $k_m^+$ ; If  $k_m^+$  exists, goto Step 3, o/w STOP.
- Step 3.  $x_{k_m^+} = x_{k_m^+} + g$  and  $B^r = B^r - g \times c_{k_m^+}$ ; Goto Step 1.

마찬가지로 단조 감소법은 기계 대수 감소 방법을 이용하여 예산 범위 내에 들 때까지 기계 대수를 감소시키는 방법이다. 단, 기계 대수 초기화 시 예산 제약을 넘어설 정도로 많은 수로 초기화한다.

#### 단조 감소법 절차( $\epsilon, m, g$ )

- Step 0.  $x_k = 1.2 \frac{x_k^1}{\epsilon}$ , for all  $k$ ;  $B^r = B - \sum_{k=1}^K c_k x_k$ .
- Step 1. Perform a pre-specified simulation run.
- Step 2. If  $B^r < 0$ , find  $k_m^-$  and goto Step 3, o/w STOP.
- Step 3.  $x_{k_m^-} = x_{k_m^-} - g$  and  $B^r = B^r + g \times c_{k_m^-}$ ; Goto Step 1.

위에서 소개된 두 단조 증감 방법은 직관적이고 간단한 절차를 갖고 있기 때문에 우수한 해를 도출하리라 기대하기 어렵다. 위 방법들은 기계 대수 증감 기준을 선별

하는 예비실험용으로 사용될 수 있다.

### 3.4.2. 반복 증감 방법

반복 증감 방법은 단조 증감 방법과 달리 증가 또는 감소만 진행되는 것이 아니라, 증가와 감소를 반복해서 진행할 수 있다. 우선적으로 단조 증가법 형태로 기계 대수 조합을 구성한 후 더 이상 예산에 여유가 없는 경우에는 조건에 따라 기계 대수를 감소시켜 예산을 확보한 후 다시 기계 대수를 증가시킬 수 있는 가능성을 만든다. 절차 중에 기계 대수 증감 기준을 변경시킬 수 있게 하여 다양한 조합의 해를 생성할 수 있게 한다. 아래 절차에서,  $M_1$ 과  $M_2$ 는 각각 증가/감소 기준 인덱스를 담고 있는 집합이다. 예를 들어,  $M_1 = \{1, 3, 5\}$ 라면, 앞서 소개된 기계 대수 증가 기준 중 첫 번째, 세 번째, 다섯 번째 기준을 집합  $M_1$ 이 포함하고 있는 것이다.

#### 반복 증감법 절차( $\epsilon, M_1, M_2, g_1, g_2$ )

- Step 0.  $x_k = x_k^1$ , for all  $k$ ;  $B^r = B - \sum_{k=1}^K c_k x_k$ .
- Step 1. Perform a pre-specified simulation run.
- Step 2. Arbitrarily select  $m_1$  among criteria included in  $M_1$ .
- Step 3. Among  $k$  such that  $B^r > g_1 \times c_k$ , find  $k_{m_1}^+$ ; If  $k_{m_1}^+$  exists, goto Step 4, o/w goto Step 5.
- Step 4.  $x_{k_{m_1}^+} = x_{k_{m_1}^+} + g_1$  and  $B^r = B^r - g_1 \times c_{k_{m_1}^+}$ ; Goto Step 1.
- Step 5. If termination condition is satisfied, STOP, o/w goto Step 6.
- Step 6. Arbitrarily select  $m_2$  among criteria included in  $M_2$ .
- Step 7. Find  $k_{m_2}^-$ ;  $x_{k_{m_2}^-} = x_{k_{m_2}^-} - g_2$  and  $B^r = B^r + g_2 \times c_{k_{m_2}^-}$ ; Goto Step 1.

위에서 소개된 절차는 종료 조건과 초기 기계 증감 기준 및 증감 기준 변경 방법에 따라 다양한 형태로 나타날 수 있다. 단계 5에서 고려하는 종료 조건은 다음과 같이 실행된다. 이전 종료 조건 검사 단계에서 보다 생산율이 향상되지도 않았고 첫 공정과 마지막 공정에서의 생산율의 차이가 줄어들지도 않는 경우가  $h$ 회 연속 반복되면 절차를 종료한다.

## 4. 시뮬레이션 실험

제안된 방법을 평가하기 위해서는 많은 계산 실험을 필요로 한다. 논문에서 소개된 기계 대수 증감 기준의 경우 모든 조합에 대해 실험하는 것이 실질적으로 불가능하므로, 증감 기준을 몇 가지만 선별하는 예비실험 단계가 필요하다. 선별된 기준만을 이용하더라도 고려하는 생산 시스템의 사양, 일정계획 방법, 초기화 모수, 종료조건 및 증감 기준 집합 구성에 따라 많은 조합이 나올 수 있다. 먼저 생산 시스템의 생산율을 측정하는 도구 및 제안 방법을 평가하기 위한 도구로 사용되는 시뮬레이션 모형에 대해 소개한다.

### 4.1 시뮬레이션 모형

본 연구에서는 주어진 생산 시스템의 사양과 여러 가지 사용자 지정에 대해 생산율을 측정할 수 있는 시뮬레이션 모형을 C언어로 작성하여 개발하였다.

시뮬레이션 모형은 먼저 생산 시스템의 사양을 입력받는다. 공정의 개수( $K$ ) 및 제품종류의 개수( $M$ )를 사용자가 미리 지정한다. 공정별 기계 대수는 결정 변수로 시뮬레이션 실행 전에는 반드시 지정되어야 한다.

각 제품종류에 대하여 공정별 가공시간과 셋업시간은 다음과 같이 무작위로 지정된다. 먼저 제품 종류별 공정별 가공시간은  $DU(B_k^p, \alpha \times B_k^p)$ 의 이산균등분포를 따른다. 이때  $DU(L, U)$ 는 범위가  $[L, U]$ 인 이산균등분포를 의미하며,  $B_k^p$ 는 공정  $k$ 에서 기본 가공시간으로  $DU(10, 100)$ 의 이산균등분포를 따른다. 그리고  $\alpha$ 는 각 공정에서 제품 종류별로 가공시간의 변동폭을 지정하는 모수로 1 이상의 값을 갖는다(예를 들어, 어떤 공정에서  $\alpha$ 값이 1로 지정되면 해당 공정에서는 제품종류에 상관없이 모두 같은 가공 시간을 갖게 되며, 만약  $\alpha$ 값이 2로 지정된다면 해당 공정에서 제품종류에 따라 가공시간의 최대 차이가 2배가 될 수도 있다). 제품 종류별 셋업시간도 유사하게 지정된다. 제품 종류별 공정별 셋업시간은  $DU(B_k^s, \beta \times B_k^s)$ 의 이산균등분포를 따른다. 이때  $B_k^s$ 는 공정  $k$ 에서 기본 셋업 시간으로  $DU(10, 50)$ 의 이산균등분포를 따른다. 그리고  $\beta$ 는 각 공정에서 제품 종류별로 셋업시간의 변동폭을 지정하는 모수로 1 이상의 값을 갖는다. 이렇게 정해지는 가공시간 및 셋업시간은 시뮬레이션 수행전에 결정되기 때문에 시뮬레이션 수행 중에는 상수값으로 인식된다.

주문은 단위시간당 0.01개의 비율로 도착한다고 가정하고, 최대 주문 크기는  $Q$ 로 지정한다. 실제 주문 크기

는 주문 도착시 결정되며  $DU(1, Q)$ 의 이산균등분포로부터 생성된다. 따라서 주문의 평균 크기( $\bar{Q}$ )는  $Q/2$ 로 추정된다. 공정별로 기계 성능이 동일하기 때문에 기계 구매 비용도 공정별로 같다고 가정한다. 공정별 기계 비용은  $U(1, 10)$ 의 균등분포를 따른다(단, 소수점 첫째자리까지만 생성한다). 주어진 기계 구매 예산( $B$ )은 공정별 기계 비용과 3.1절에서 소개된 초기 기계대수 식을 이용하여 지정한다. 즉,  $B = \tau \sum_{k=1}^K c_k x_k^1$ 이다. 여기서 모수  $\tau$ 는 예산의 정도를 나타내는 모수로 1 내외 값을 갖고  $x_k^1$ 를 구하는 식에서 모수  $\epsilon$ 는 1값을 갖는다.

시뮬레이션 수행의 주된 목적인 생산율의 측정은 완료된 랫의 수로부터 구할 수 있다. 생산율은 시뮬레이션 윌업 시간 이후부터 시뮬레이션 종료 시간까지 완료된 랫의 개수를 해당 시간으로 나누어 계산한다. 즉, 생산율은 단위 시간당 랫의 개수로 측정된다(Kim 등, 1998).

### 4.2 예비 실험

본 연구에서 제안된 방법은 어느 기준을 어느 방법에서 어떻게 사용하느냐에 따라 많은 조합으로 적용될 수 있다. 그래서, 먼저 예비 실험을 통해 우수하다고 생각되는 기준과 방법을 조사해보고, 그 결과를 이용하여 좀 더 세밀한 문제 해결 절차를 제안하고자 한다. 본 연구에서 수행된 계산 실험은 예비 실험 및 주 실험을 포함하여 모두 3.2GHz i5 CPU와 3GB RAM을 갖는 PC에서 수행되었다.

먼저 제안된 10가지 기계 대수 증감 기준을 평가하기 위하여, 해당 증감 기준을 포함한 단조 증감법을 여러 조합의 문제에 대해 적용하였다. 적용된 문제 조합은 다음과 같다. 제품 종류별 가공 시간 및 셋업 시간의 변동폭을 지정하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 값이 각각 1.2와 1.8인 경우, 제품 종류  $M$ 는 10개와 30개인 경우, 공정의 수( $K$ )는 10개와 20개인 경우, 주문의 최대 크기( $Q$ )가 50인 경우, 사용되는 디스패칭 규칙이 FIFO, SPT, SFIFO, SSPT인 경우, 마지막으로 각 조합마다 반복수행 2회를 고려하여 총  $128(=2 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2)$ 개를 생성시켰다.

빠른 수행 시간을 위하여 기계대수 증감 단위( $g$ )는 2, 기계 대수 초기화 수준 모수  $\epsilon$ 은 0.8로 설정하였고 시뮬레이션 수행 시간은 20,000 단위 시간으로 설정하였다. 표 1에 증감 기준에 대한 예비실험 결과가 정리되어 있다. 각 증감 기준별로 평균 생산율(단위 시간 당 랫 생산 개수)과 128번의 문제 풀이 중 가장 높은 생산율을 보인 횟수를 보여주고 있다. 기계 대수 감소 기준에 대해서도 같

표 1. 증가 기준 예비실험 결과

| 증가 기준 | 평균 생산율 | 최고 생산율 횟수 |
|-------|--------|-----------|
| 1     | 0.147  | 0         |
| 2     | 0.168  | 20        |
| 3     | 0.151  | 0         |
| 4     | 0.174  | 58        |
| 5     | 0.167  | 4         |
| 6     | 0.170  | 16        |
| 7     | 0.165  | 10        |
| 8     | 0.168  | 8         |
| 9     | 0.144  | 0         |
| 10    | 0.169  | 14        |

표 2. 감소 기준 예비 실험 결과

| 감소 기준 | 평균 생산율 | 최고 생산율 횟수 |
|-------|--------|-----------|
| 1     | 0.143  | 6         |
| 2     | 0.156  | 6         |
| 3     | 0.151  | 12        |
| 4     | 0.165  | 24        |
| 5     | 0.153  | 4         |
| 6     | 0.152  | 0         |
| 7     | 0.165  | 12        |
| 8     | 0.168  | 62        |
| 9     | 0.130  | 2         |
| 10    | 0.115  | 0         |

표 3. 예비 실험 ANOVA 결과

|          | 자유도  | Sum Sq | Mean Sq | F value |
|----------|------|--------|---------|---------|
| 제품종류     | 1    | 0.0031 | 0.0031  | 6.3     |
| 공정개수     | 1    | 0.6809 | 0.6809  | 1361.5  |
| 가공시간 변동폭 | 1    | 0.0020 | 0.0020  | 3.9     |
| 셋업시간 변동폭 | 1    | 0.0002 | 0.0002  | 0.3     |
| 디스패칭 규칙  | 3    | 0.4295 | 0.1432  | 286.3   |
| 잔차       | 2552 | 1.2763 | 0.0005  |         |

은 방식으로 예비 실험을 진행하여 표 2와 같은 결과를 얻었다.

표 3은 예비실험에 대한 분산분석 결과를 정리하여 보여준다. F값에 밑줄이 표시된 요인, 즉 공정 개수와 디스패칭 규칙이 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 공정 개수가 늘어날수록 생산을 줄어 들고,

가공시간 및 셋업시간을 고려한 디스패칭 규칙일수록 생산율이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

예비실험을 통한 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저, 기계 구입비용을 고려하는 것이 생산을 측면에서는 큰 도움이 되지 않았고, 평균적으로 증가 기준을 이용한 방법(0.162)이 감소 기준을 이용한 방법(0.150)보다 우수한 성능을 보이고 있다. 증가/감소 기준마다 몇 가지만 선택하여 주 실험에서 사용할 수 있다.

### 4.3 주 실험

주 실험에서는 예비 실험의 결과를 바탕으로 몇 가지 증가 기준을 이용한 단조증가법, 감소 기준을 이용한 단조 감소법, 증가/감소 기준 조합을 이용한 반복증감법, 그리고 벤치마킹으로 기존방법을 여러 가지 문제조합에 대해 비교 실험한다.

먼저, 벤치마킹으로 이용될 기존방법을 소개한다. 본 연구에서 고려하는 문제 상황과 동일한 경우를 고려한 기존 연구는 없기 때문에, 기존 방법을 본 문제에 적용할 수 있게 수정하도록 한다. 교과서적인 필요 기계대수 산출 공식은 다음과 같이 정리될 수 있다(강종렬 등, 2006). 결과를 정리하면 다음과 같다.

$$\text{필요 기계 대수} = \frac{\text{연간 모든 제품의 가공시간과 셋업시간의 합}}{\text{기계 1대의 연간 가용시간}} \quad (14)$$

본 문제에 적용하기 위해, 먼저, 위와 같은 공식을 공정별로 적용하는데, 시간 기준을 연간 단위가 아니라, 단위 시간을 기준으로 고려한다. 기계 1대의 단위시간동안 가용시간은 1이므로 분모는 1이 되고, 나머지 식을 앞서 소개된 기호를 이용하여 정리하면 다음과 같이 단위시간동안 필요한 공정별 기계 대수를 결정할 수 있다.

$$x_k = \sum_{i=1}^N \left\{ \lambda \times \bar{Q} \times (p_{ik} + \frac{s_{ik}}{Q}) \right\}, \text{ for all } k \quad (15)$$

위에서 구해진 값은 예산이 고려되어 있지 않고, 단위 시간동안의 필요 기계 대수 이므로 1보다 작은 값이 나올 수도 있다. 이를 보정해주기 위해서, 아래 식을 통해 구해지는 파라미터  $\pi$ 를 이용한다.

$$\pi = \frac{B}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N c_{ik} x_{ik}} \quad (16)$$

파라미터  $\pi$ 가 구해졌으면, 최종적인 공정별 기계 대수

표 4. 반복 증감법에 사용된 증감기준 집합 구성요소

| 번호 | $M_1$         | $M_2$   |
|----|---------------|---------|
| 1  | {2, 4, 6, 10} | {4, 8}  |
| 2  | {2, 4}        | {4, 8}  |
| 3  | {2, 4, 6, 10} | {6, 10} |
| 4  | {2, 4}        | {6, 10} |

를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_k = \lfloor \pi \times x_k \rfloor, \text{ for all } k \quad (17)$$

예비 실험 결과를 고려하여, 단조 증가법으로는 증가 기준 2, 4, 6, 10을 적용한 네 가지, 단조 감소법으로는 감소 기준 4, 8을 적용한 두 가지를 주 실험에 반영한다. 반복 증감법은 증가/감소 기준 집합  $M_1$ 과  $M_2$ 의 구성 요소 선정이 필요하다. 단조방법에서 선정한 기준을 중심으로 다음과 같은 네 가지 조합을 만들어 사용한다.

정리하면, 주 실험에서는 벤치마킹 방법을 포함하여 단조 증가법 네 가지, 단조 감소법 두 가지, 반복 증감법 네 가지, 이렇게 총 11가지 방법에 대해 실험을 수행한다. 문제 생성도 예비 실험 결과를 반영하여 제품 종류, 가공 시간 및 셋업 시간의 변동폭을 지정하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 값은 한 가지만 적용하고(각각 30, 1.8, 1.8), 디스패칭 규칙은 FIFO와 SSPT 두 가지만 고려하고, 공정 개수는 10, 20, 30 세 가지, 그리고 반복 수행을 10회하여 총  $60(=2 \times 3 \times 10)$ 문제에 대하여 실험한다.

제안된 방법의 정밀한 수행을 위하여 단조 증가/감소법에서 기계대수 증감 단위( $g$ ), 반복 증감법에서  $g_1$ 과  $g_2$ 는 모두 1로 설정하였다. 기계 대수 초기화 수준을 나타내는 모수  $\epsilon$ 은 0.8로 설정하였고 시뮬레이션 수행 시간은 50,000 단위 시간으로 설정하였다. 종료조건에서  $\omega$ 는 10으로 지정한다. 각 방법의 계산 수행 시간을 정리하면, 평균적으로 벤치마킹 방법은 1초 이내, 단조 증/감법은 약 83초, 반복 증감법은 약 127초에 해를 찾을 수 있었다. 표 5에 생산율에 대한 주 실험 결과가 정리되어 있다. 표에서 단조 증가/감소법 괄호 안의 숫자는 증가/감소 기준 인덱스이고, 반복 증감법 옆 숫자는 표 4에 소개된 번호이다.

표 5와 그림 1에서 볼 수 있듯이, 제안된 휴리스틱 방법들이 평균적으로 벤치마킹 방법보다 우수한 성능을 보이고 있고, 제안 방법 중에서는 반복 증감법이 대체적으로 우수한 성능을 보이고 있다. 평균적으로 가장 높은 생산율을 보이는 상위 다섯 가지 방법을 나열하면, 반복 증

표 5. 주 실험 결과

| 비교 방법      | 평균 생산율 | 최고 생산율 횟수 |
|------------|--------|-----------|
| 벤치마킹 방법    | 0.1603 | 0         |
| 단조 증가법(2)  | 0.1711 | 0         |
| 단조 증가법(4)  | 0.1743 | 11        |
| 단조 증가법(6)  | 0.1585 | 0         |
| 단조 증가법(10) | 0.1585 | 0         |
| 단조 감소법(4)  | 0.1750 | 4         |
| 단조 감소법(8)  | 0.1727 | 11        |
| 반복 증감법1    | 0.1763 | 15        |
| 반복 증감법2    | 0.1773 | 18        |
| 반복 증감법3    | 0.1711 | 0         |
| 반복 증감법4    | 0.1769 | 6         |

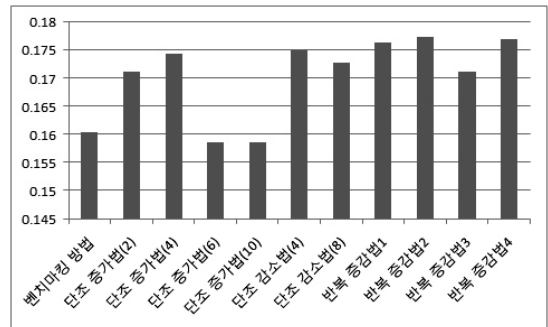


그림 1. 평균 생산율에 대한 주 실험 결과

표 6. paired- $t$  test 결과

|           | 반복 증감법4 | 반복 증감법1 | 단조 감소법(4) | 단조 증가법(4) |
|-----------|---------|---------|-----------|-----------|
| 반복 증감법2   |         |         | **        | **        |
| 반복 증감법4   |         |         | **        | **        |
| 반복 증감법1   |         |         | *         | *         |
| 단조 감소법(4) |         |         |           |           |

\* 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의함  
 \*\* 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의함

감법2, 반복 증감법4, 반복증감법1, 단조 감소법(4), 단조 증가법(4)이며, 가장 높은 생산율을 보이는 횟수도 반복 증감법2가 가장 많았다. 나열한 다섯 가지 방법에 대해서 통계적 유의성을 검증하기 위하여, 모든 쌍 조합( $C_2$ )에 대하여 paired- $t$  test를 수행하였다(표 6).

표 6에서 보듯이 세 가지 반복 증감법 모두 두 가지 단조 증가/감소법에 대하여 통계적으로 유의한 차이를 보였



다. 반복 증감법 간, 그리고 단조 증가/감소법 간에 통계적 유의성은 찾을 수 없었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 혼합흐름공정에서 주문이 동적으로 도착하는 상황에서 공정별 기계 대수 조합을 결정하는 문제를 다루었다. 논문에서는 여러 가지 조합의 휴리스틱 방법을 제안하였고, 제안된 휴리스틱의 성능을 다양한 계산 실험을 통하여 그 우수성을 입증하였다. 시뮬레이션 실험 결과에서 보듯이 제안된 방법을 통해 주어진 예산 제약 하에서 더 높은 생산율을 기계 대수 조합을 찾을 수 있었다. 즉, 혼합흐름공정과 같은 복잡한 제조시스템의 기계 조합을 구성하는 경우, 본 연구에서 제안하는 방법을 통해 같은 예산 범위 내에서 더 높은 제조 시스템 성능을 보이는 용량 계획을 수립할 수 있다.

본 연구의 결과로부터 얻은 추가적인 결론을 언급하자면, 먼저 혼합흐름 공정과 같은 복잡한 형태의 제조시스템의 경우에 기계 조합의 미세한 차이에 따라라도 생산율의 변동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있는 제조시스템의 동적인 정보를 이용하면 좀 더 우수한 성능을 갖는 기계 대수 조합을 찾을 수 있다. 마지막으로 제안된 방법은 신규 기계 대수 조합을 결정할 수 있을 뿐 아니라, 주어진 기계 조합에서 추가적인 투자를 하고자 할 때 가장 적합한 장비 추가 공정을 선정하는 경우에도 사용될 수 있다. 본 연구에서와 같이 체계적인 절차를 통해 결정된 신규 또는 수정 기계 대수 조합은 주어진 예산 범위 내에서 최대의 생산율을 산출해낼 것으로 기대된다.

본 연구와 관련되어 향후에 수행될 수 있는 연구 방향을 몇 가지 소개하자면 다음과 같다. 먼저, 본 연구에서 고려하는 용량계획은 그 수립 빈도가 빈번하지 않기 때문에 빠른 수행 시간을 요구하지 않는다. 메타 휴리스틱 방법과 같은 좀 더 세밀한 탐색 방법을 적용한다면 더 나은

성능의 기계 대수 조합을 찾을 수 있으리라 기대된다. 그리고 실제 제조 시스템의 특징을 더 고려한 용량 계획 연구도 필요하겠다. 반도체나 TFT-LCD 공정은 여러 번의 재투입을 요구하고 있고, 주문의 발생 역시 더 실제적인 상황에 맞는 접근을 필요로 한다. 이러한 특징들을 고려한 시뮬레이션 모델이나 휴리스틱 방법론의 개발 등의 추후 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 강종열, 민동권, 박재홍, 손병규, 원유동 공역, Larry P. Ritzman and Lee J. Krajewski, *생산운영관리*의 기초, 시그마프레스, 2006.
2. F. Barahona, S. Bermon, O. Gunluk, and S. Hood, "Robust capacity planning in semiconductor manufacturing," *Naval Research Logistics*, vol. 52, pp. 459-468, 2005.
3. N. Geng, and Z. Jiang, "A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry," *International Journal of Production Research*, vol. 47, pp. 3639-3655, 2009.
4. W.T. Huh, R.O. Roundy, and M. Kakanilydirim, "A general capacity planning model under demand uncertainty," *Naval Research Logistics*, vol. 53, pp. 137-150, 2005.
5. Y.-D. Kim, D.-H. Lee, J.-U. Kim, and H.-K. Roh, "A simulation study on lot release control, mask scheduling, and batch scheduling in semiconductor," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 17, pp. 107-117, 1998.
6. J. Robinson, J. Fowler, and E. Neacy, "Capacity loss factors in semiconductor manufacturing," Working paper, [online] [www.fabtime.com](http://www.fabtime.com), 2003.
7. J.G. Shanthikumar, S. Ding, and M.T. Zhang, "Queueing theory for semiconductor manufacturing systems: a survey and open problems," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 4, pp. 513-522, 2007.
8. S.D. Wu, M. Erkoç, and S. Karabuk, "Managing capacity in the high-tech industry: a review of literature," *The Engineering Economist*, vol. 50, pp. 125-158, 2005.



**이 근 철** (gclee@konkuk.ac.kr)

1995 고려대학교 산업공학과 학사  
1997 한국과학기술원 산업공학과 석사  
2003 한국과학기술원 산업공학과 공학박사  
2006~현재 건국대학교 경영대학 재직중

관심분야 : 제조 및 서비스 시스템의 운영 및 설계 방법론



**최 성 훈** (shchoi@smu.ac.kr)

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

관심분야 : 컴퓨터 시뮬레이션 이론 및 응용, APS, 정보통신 시스템