

혼합 흐름공정에서 라인 밸런싱을 위한 휴리스틱 개발

이근철[†]

건국대학교 경영대학 경영학전공

Heuristics for Line Balancing in Hybrid Flowshops

Geun-Cheol Lee[†]

College of Business Administration, Konkuk University

In this paper, we consider a line balancing problem in hybrid flowshops where each workstation has identical parallel machines. The number of machines in each workstation is determined in ways of satisfying pre-specified throughput rate of the system. To minimize the total number of machines in the systems, we propose five heuristic methods and one simulated annealing method. Extensive computational experiments found the superiorities of two heuristic methods and the meta-heuristic.

Keywords : Line Balancing, Hybrid Flowshop, Heuristics, Simulated Annealing

1. 서론

본 연구에서는 반도체, PCB 등 첨단 전자 제품 제조 산업에서, 주어진 생산율을 만족시키기 위한 생산 라인 구성 방법에 관한 연구를 수행한다. 첨단 전자 제품 산업은 고가의 장비 투자를 바탕으로 한 고도의 장치산업으로 볼 수 있다. 장비 한 대의 가격이 수억에서 수십억 원을 호가하기 때문에, 한 두 대의 장비 도입 절약을 통해 수십 억 원의 비용절감 효과를 얻을 수 있다 [12]. 따라서 장비 도입과 운영에 관한 합리적인 의사결정이 필요하다 [2, 13]. 제품 수요에 따라 장비 도입을 결정하는 용량 관리(Capacity Management)와 관련된 연구는 최근 서베이 논문 [14]에서 보듯이 꾸준히 수행되어 왔지만, 첨단 산업과 직접적으로 관련된 연구는 그리 많지 않은 편이다. 본 연구에서는 주어진 생산율을 달성하기 위해, 반도체, PCB 등 전자 제품 제조 시스템의 생산 라인을 구성하는 방법을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 전자 제품 제조 시스템을 혼합 흐름공

정으로 모형화하여 접근하고자 한다. 혼합 흐름공정(hybrid flowshop 또는 flexible flowline)은 흐름공정의 확장된 형태로 직렬로 연결되어 있는 작업장에 복수의 병렬 기계가 존재하는 생산라인을 말한다. 직렬의 프로세스를 갖는 생산라인에서 한 작업장의 용량을 증가시키기 위해서 기계 설비를 추가하는 것은 일반적인 방법이기 때문에 [6], 혼합 흐름공정 형태를 갖는 제조 시스템을 흔히 찾아볼 수 있다. 반도체나 PCB와 같은 전자제품 제조 시스템이 혼합 흐름공정 형태의 생산라인을 갖고 있다는 것은 기존 연구에서도 확인할 수 있다 [1, 10].

일반적으로 라인 밸런싱 문제라 하면 ‘조립 라인 밸런싱(assembly line balancing)’ 문제를 말하며, 이 문제는 ‘특정 성과치도에 대해 작업장간의 작업량을 최적으로 배분하는 의사결정을 하는 것’으로 소개된다 [3]. 전통적인 조립 라인 밸런싱에 대한 문제는 수십년간 진행되어 왔으며, 문헌 조사 연구도 최근까지 여러 수행되었다 [3, 5, 10]. 이러한 연구들은 주요 시사점은, 예외가 있긴 하지만, 균형적인(balanced) 생산라인이 불균형적인 생산라

[†] 교신저자 gcleee@konkuk.ac.kr

인에 비해 성능의 우수성을 보인다는 것이다[4].

본 연구에서는 조립 라인의 밸런싱 문제가 아니라, 혼합 흐름공정에서의 라인 밸런싱 문제를 고려하여 혼합 흐름공정에 적용하고자 한다. 혼합 흐름공정에서 라인 밸런싱이란 각 작업장의 용량을 일정하게 맞추는 것이고, 그것을 통하여 제품 흐름을 원활하게 하는 것을 목적이라 할 수 있다. 각 작업장에서 수행되는 작업의 가공시간이 모두 다르기 때문에, 기계 수를 조절하여 작업장 간의 생산용량의 균형을 조절할 필요가 있다.

결국, 혼합 흐름공정의 라인 밸런싱은 각 작업장에 몇 대의 기계를 설치할 것인가라는 의사결정에 좌우된다. 물론 무조건 기계 대수를 늘려준다면, 어떠한 생산율이든 달성할 수 있을 것이다. 하지만, 혼합 흐름공정의 대상이 되는 반도체, PCB 제조 시스템을 이루는 장비의 가격은 수십 만 불에서 수백 만 불을 호가한다[13]. 같은 생산능력을 보인다면, 되도록 적은 장비대수로 제조 시스템을 구성하는 것이 큰 비용을 절감하는 방법일 것이다.

본 연구에서는 주어진 목표 생산율을 달성하기 위한 각 작업장의 기계 대수를 결정하는 문제를 고려한다. 이때 시스템 전체의 기계 대수를 최소로 할 수 있는 각 작업장의 기계 대수 조합을 찾자 한다. 이 문제의 해를 구하기 위해서 5가지 휴리스틱 방법과 로컬썬치 방법인 시뮬레이티드 어닐링 방법을 제안한다. 계산 실험을 통해서 제안된 방법의 성능을 평가하고 그 특성을 분석한다. 계산 실험을 위해 혼합 흐름공정을 모의하는 시뮬레이션 모형을 개발한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 다음 장에서는 구체적인 문제 정의를 하고, 제 3장에서는 여러 가지 휴리스틱 방법의 자세한 절차를 설명한다. 계산 실험과 그 결과를 제 4장에 소개하고, 마지막 장에 결론과 추후 연구에 대해 언급한다.

2. 문제 정의

본 연구에서는 혼합 흐름공정의 라인 밸런싱 문제를 해결하고자 한다. 혼합 흐름공정에서의 라인 밸런싱이란, 혼합 흐름공정의 생산율을 특정 수준이상으로 유지하면서 전체 기계 대수를 최소화하는 각 작업장의 기계의 대수를 결정하는 것으로 가정한다.

이 때 생산율이란 단위시간당 제품 투입대비 산출량을 통해 얻어질 수 있다. 이러한 값을 측정하기 위해서는 주어진 혼합 흐름공정에 대해 각 작업장의 장비의 대수를 결정한 후 일정 기간 제품들을 흘려보아야 할 수 있다. 즉, 생산율을 구하기 위해서는 시뮬레이션 작

업이 반드시 필요하게 된다. 본 연구에서는 시뮬레이션 모형에 반영할 몇 가지 생산 상황에 대해 다음과 같이 가정하고자 한다.

고려하는 혼합 흐름공정은 복수의 작업장이 직렬로 연결되어 있는 형태로 작업물(job)이 도착하면 각 작업장을 순서대로 거치면서 가공이 된다. 이 때 각 작업장에는 동일한 가공작업을 할 수 있는 동일한 성능을 갖는 병렬 기계들(identical parallel machines)로 이루어져 있다.

작업물은 동적으로 시스템에 도착한다. 도착된 작업물은 첫 번째 작업장의 병렬 기계들 중 하나의 기계에서 가공이 되며 가공 완료 후 두 번째 작업장으로 이동하며 이러한 방식으로 모든 작업장을 순서대로 방문한다. 마지막 작업장에서의 가공이 완료되면, 해당 작업물이 최종 제품으로 완성이 된다.

어떤 작업물이 한 작업장에 도착했을 때, 해당 작업장의 모든 병렬 기계들이 미리 도착했던 작업물들을 가공하고 있는 상태라면, 방금 도착한 작업물은 해당 작업장의 재공으로 남아 가공 순서를 기다린다. 가공 가능한(available) 기계가 발생했을 때는, 재공으로 있는 작업물들 중 선입선출법(First Come First Served, FCFS)으로 하나의 작업물이 선택되어 해당 기계에서 가공이 시작된다.

명확한 문제 정의를 위해서 본 연구에서 고려하는 문제를 수리적 모형으로 표현한다. 먼저 용어를 정리하면 다음과 같다.

<용어>

K : 작업장의 수

x_k : 작업장 k 의 장비 대수($k=1, 2, \dots, K$)

T : 지정된 생산율 수준(< 1)

$f(\cdot)$: 작업장별 장비 대수가 주어졌을 때 시뮬레이션을 통해서 생산율을 출력하는 함수

위의 용어들을 이용하여 본 연구에서 해결하고자 하는 문제를 다음과 같은 수리적 모형으로 나타낼 수 있다.

<모형>

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^K x_k$$

$$\text{s.t. } f(x_1, x_2, \dots, x_K) \geq T$$

$$x_1, x_2, \dots, x_K: \text{비음의 정수}$$

위의 모형을 통해, 본 연구에서 고려하는 문제가, 주어진 생산율(T)을 만족하면서 전체 장비 수($\sum_{k=1}^K x_k$)를 최소

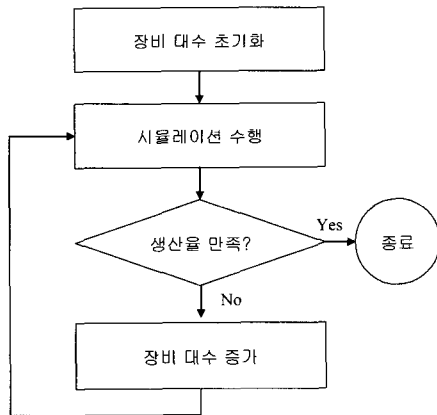
화하는 작업장별 장비의 대수를 결정하는 문제라는 것이 명확히 설명이 되었을 것이다. 모형의 제약식에 포함된 함수 f 의 출력값은 시뮬레이션을 통해서 알 수 있기 때문에, 모형을 직접적으로 이용한 분석적인 방법을 해를 구하기보다는 휴리스틱 방법을 이용하여 해를 찾는다.

3. 해 법

본 연구에서는 주어진 문제를 해결하기 위해서 5가지 휴리스틱 방법과 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing, SA) 방법을 제안한다.

3.1 휴리스틱 방법

휴리스틱 방법들의 전체적인 절차는 특정 작업장의 장비의 대수를 증가시키거나 감소시킨 후 주어진 생산율의 만족 여부를 검사하는 흐름을 갖는다. 먼저, 장비를 증가시키면서 실행가능해를 찾는 방법(장비 증가법) 두 가지를 소개한다. <그림 1>에 이러한 휴리스틱 방법의 전체 절차가 소개되어 있다. 소개될 두 가지 방법의 차이는 <그림 1>에서 ‘장비 대수 증가’ 방법에 차이가 있을 뿐 나머지 절차는 모두 같은 방법들이다.



<그림 1> 장비 증가법 순서도

<그림 1>에서 보듯이 모든 방법은 동일한 ‘장비 대수 초기화’ 절차를 거친다. 초기 장비 대수는 작업장별 작업량을 예상하여 최소한 필요한 용량만큼으로 결정해 준다. 각 작업장별 초기 장비 대수를 x_k^0 라고 하면 다음 수식을 통해 초기 값이 결정된다.

$$x_k^0 = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^N p_{ik}}{N} \lambda T \right\rceil \dots\dots\dots (1)$$

이때, p_{ik} 는 제품 i 의 작업장 k 에서의 가공시간, N 는 전체 제품의 종류, λ 는 주문 도착율(단위 시간당 주문 도착 빈도), T 는 지정된 생산율 수준이다.

일단, 각 작업장별 장비 대수가 주어졌으면(초기값을 포함해서), 다음 절차로 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션을 수행하면 주어진 장비 대수 조합에 따른 생산율 값을 구할 수 있기 때문에, 미리 지정된 생산율을 만족시키는지 판정할 수 있다. 생산율 조건을 만족한다면, 방금 사용되었던 장비 대수 조합을 최종해로 선정하고 전체 절차를 종료한다. 그렇지 않다면(생산율이 지정된 생산율에 미치지 않는다면), 생산 용량을 증가시켜주는 단계, ‘장비 대수 증가’ 단계로 넘어간다. 시뮬레이션 수행에 관한 자세한 사항들은 다음 장에서 기술한다.

앞서 언급했듯이 ‘장비 대수 증가’ 단계의 구체적인 방법에 따라 휴리스틱 방법이 구분된다. 본 논문에서는 순방향 증가법과 병목 증가법, 이렇게 두 가지 장비 증가법을 소개한다.

3.1.1 순방향 증가법

장비 증가법에서는 특정 작업장 한 곳을 선정하여 해당 작업장의 장비를 하나씩 증가시켜 나가는데, 두 장비 증가법의 차이는 장비를 증가시킬 작업장을 선정하는 기준이 다르다는 점이다. 순방향 증가법은 작업장을 선정하는 방법이 전체 시스템의 첫 번째 작업장부터 순서대로 선정하는 방식이다. 첫 번째 작업장의 장비 대수를 늘려준 후 시뮬레이션을 통해 생산율을 만족하는지 판정하고, 부족하다면, 두 번째 작업장의 장비 대수를 늘려주는 식으로 생산율을 만족할 때까지 반복한다. 일반적으로 흐름 공정의 형태를 갖는 생산시스템의 작업부하는 제일 첫 작업장에 우선 많이 걸리기 때문에 그러한 작업부하를 처리하기 위해 순방향으로 용량을 늘려주는 방법이다. 이 방법에 대한 절차를 다음과 같이 정리할 수 있다. 절차에서 K 는 작업장의 수 그리고, T_c 는 장비대수가 주어졌을 때 시뮬레이션을 통해서 구해지는 생산율을 의미한다.

절차 1 (순방향 증가법)

- 단계 1 : 모든 $k(=1, 2, \dots, K)$ 에 대해, $x_k := x_k^0, l := 1$.
- 단계 2 : 시뮬레이션을 수행하여 생산율 T_c 를 구한다.
- 단계 3 : 만약 $T_c \geq T$ 이면, 종료 ; 그렇지 않으면 단계 4로 간다.
- 단계 4 : $x_l := x_l + 1, l := l + 1$, 만약 $l = K + 1$ 이면, $l := 1$ 단계 2로 간다.

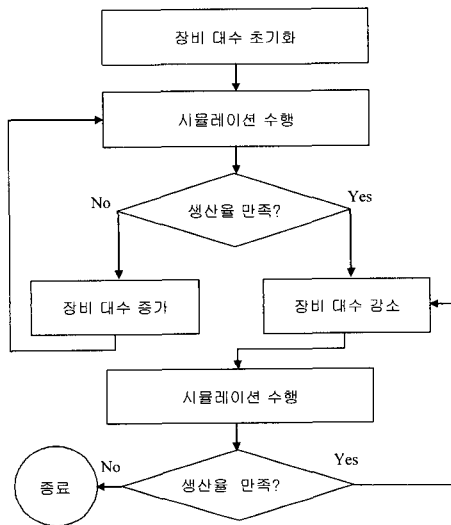
3.1.2 병목 증가법

두 번째 장비 증가법인 병목 증가법은 가장 작업 부

하가 많이 걸려있는 작업장의 장비 대수를 증가시켜주는 방법이다. 병목 작업장 b 는 다음 수식을 통해 선정한다. $b = \operatorname{argmax}_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$. 이때 Ω 는 작업장 번호의 집합이다. 수식을 풀어서 설명하면, 현재의 보유 장비 대수를 기준으로 장비 한대당 가장 많은 작업부하를 갖고 있는 작업장을 병목 작업장으로 선정하는 것이다. 앞의 방법들과 마찬가지로 병목 작업장의 선정과 장비 증가 작업을 기준 생산율을 만족시킬 때까지 반복한다. 병목 작업장의 장비를 증가시키면 전체 작업장들의 생산율을 균형있게 맞출 수 있어 혼합 흐름공정의 라인 밸런싱 효과를 기대할 수 있으리라 본다. 구체적인 절차는 다음과 같이 정리될 수 있다.

절차 2 (병목 증가법)

- 단계 1 : 모든 $k(=1, 2, \dots, K)$ 에 대해, $x_k := x_k^0$.
- 단계 2 : 시뮬레이션을 수행하여 생산율 T_c 를 구한다.
- 단계 3 : 만약 $T_c \geq T$ 이면, 종료; 그렇지 않으면 단계 4로 간다.
- 단계 4 : $b := \operatorname{argmax}_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$. $x_b := x_b + 1$.
단계 2로 간다.



<그림 2> 장비 증감법 순서도

위에서 소개된 두 가지 방법은 장비를 증가시키는 방향으로만 절차가 진행 되지만, 특정 작업장의 장비를 감소시키더라도 전체 생산을 저하에는 영향을 적게 미치는 경우도 생각해 볼 수 있다. 다음에 소개될 세 가지 방법들은 먼저 장비를 증가시켜서 실행가능해(지정된 생산율을 만족시키는 장비 대수 조합)를 찾은 후에

다시 실행불가능해(지정된 생산율을 만족시키지 못하는 장비 대수 조합)로 되기 전까지 장비를 감소시키는 절차를 갖는다. <그림 2>에 장비 증감법의 절차가 순서도 형태로 소개되어 있다.

장비 증감법의 순서도는 장비 증가법의 절차를 포함하고 있다. 즉, 장비 증가법의 종료 절차 대신에 장비 감소 절차가 추가되는 형태이다. 본 연구에서는 장비 증감법으로 부하량 증감법, 부하량 증감법 2, 그리고 예측차 증감법을 소개한다.

3.1.3 부하량 증감법

부하량 증감법은 부하량이 가장 많이 걸리는 작업장을 선정하여 장비 대수를 증가시키면서(즉, 병목 증가법 형태로) 실행가능해를 찾은 후 부하량이 가장 적게 걸리는 작업장을 선정하여 실행불가능해가 되기 전까지 장비 대수를 감소시키는 방법이다. 장비를 감소시키는 기준은, 현재의 보유 장비 대수를 기준으로 장비 한대당 가장 적은 작업부하를 갖고 있는 작업장을 선정하여 해당 작업장의 장비 대수를 하나 감소시켜 준다. 장비 감소 절차 후에도 계속해서 기준 생산율을 만족하고 있는지 판정하여, 만족한다면 장비 감소 단계를 반복해주고 그렇지 않다면 최근 장비 감소 바로 전의 장비 대수 조합을 최종해로 결정한다. 부하량 증감법을 다음과 같은 절차로 정리할 수 있다.

절차 3 (부하량 증감법)

- 단계 1 : 모든 $k(=1, 2, \dots, K)$ 에 대해, $x_k := x_k^0$.
- 단계 2 : 시뮬레이션을 수행하여 생산율 T_c 를 구한다.
- 단계 3 : 만약 $T_c \geq T$ 이면, 단계 5로 간다. 그렇지 않으면 단계 4로 간다.
- 단계 4 : $b := \operatorname{argmax}_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$, $x_b := x_b + 1$
단계 2로 간다.
- 단계 5 : $h := \operatorname{argmin}_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$, $x_h := x_h - 1$.
- 단계 6 : 시뮬레이션을 수행하여 생산율 T_c 를 구한다.
- 단계 7 : 만약 $T_c < T$ 이면, $x_h := x_h + 1$ 종료; 그렇지 않으면 단계 5로 간다.

3.1.4 부하량 증감법2

부하량 증감법 2는 위에 소개된 부하량 증감법 절차의 단계 4에 차이가 있을 뿐 나머지 절차는 모두 동일하다. 단계 4는 장비 대수를 증가시켜주는 절차로써, 부하량 증감법에서는 작업장 한 곳의 장비를 증가시켜주는데 반해, 부하량 증감법 2에서는 두 곳의 작업장을 선정하여 장비를 각각 하나씩 증가시켜주고, 다른 한

곳의 작업장을 선정하여 장비를 대수를 하나 감소 시켜 주는 방법이다. 전체적으로 하나의 장비가 증가되는 셈이다. 장비를 증가시키는 작업장의 선정 기준은 가장 작업 부하가 많은 작업장 두 곳, 그리고 장비를 감소시키는 작업장의 선정 기준은 가장 작업 부하가 적은 한 곳으로 정한다. 부하량 증감법 2를 다음과 같은 절차로 정리할 수 있다.

절차 4 (부하량 증감법 2)

단계 1 : 모든 $k(=1, 2, \dots, K)$ 에 대해, $x_k := x_k^0$.

단계 2 : 시뮬레이션을 수행하여 생산을 T_c 를 구한다.

단계 3 : 만약 $T_c \geq T$ 이면, 단계 5로 간다. 그렇지 않으면 단계 4로 간다.

단계 4 : $b_1 := \arg \max_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$, $x_{b_1} := x_{b_1} + 1$.

$b_2 := \arg \max_{k \in \Omega / b_1} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$, $x_{b_2} := x_{b_2} + 1$.

$b_3 := \arg \min_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$, $x_{b_3} := x_{b_3} - 1$ 단계 2로 간다.

단계 5 : $h := \arg \min_{k \in \Omega} \left\{ \sum_{i=1}^N p_{ik} / x_k \right\}$, $x_h := x_h - 1$.

단계 6 : 시뮬레이션을 수행하여 생산을 T_c 를 구한다.

단계 7 : 만약 $T_c < T$ 이면, $x_h := x_h + 1$ 종료; 그렇지 않으면 단계 5로 간다.

3.1.5 예측차 증감법

예측차 증감법은 위에서 소개된 두 장비 증감법과 비교했을 때 장비가 증감되는 작업장을 선정하는 기준만 차이가 있을 뿐 나머지 절차는 동일하다. 따라서 예측차 증감법과 부하량 증감법의 절차의 차이는 단계 4와 단계 5에서만 찾아 볼 수 있다. 이 방법에서는 각 작업장에서 필요로 하는 장비 대수의 예측치와 실 장비 대수의 차이값을 구한 후, 차이값에 크기에 따라 장비 증감 작업장을 선정한다. 이 때, 각 작업장의 소요 장비 대수의 예측치는 제품평균가공시간, 주문도착율, 그리고

지정생산율의 곱, 즉 $\frac{\sum_{i=1}^N p_{ik}}{N} \lambda T$ 의 수식으로 계산할 수 있다. 이 예측치(실수 형태)는 실 장비 대수(정수 형태)와 차이가 발생하게 된다. 예측차 증감법에서는 작업장마다 이 차이값을 구해서, 가장 값이 적은 작업장에 장비 대수를 증가시키면서 실행 가능해를 찾은 후, 이 차이값이 가장 큰 작업장의 장비 대수를 실행 불가능해가 되기 전까지 감소시켜준다. 예측차 증감법을 다음과 같은 절차로 정리할 수 있다.

절차 5 (예측차 증감법)

단계 1 : 모든 $k(=1, 2, \dots, K)$ 에 대해, $x_k := x_k^0$.

단계 2 : 시뮬레이션을 수행하여 생산을 T_c 를 구한다.

단계 3 : 만약 $T_c \geq T$ 이면, 단계 5로 간다. 그렇지 않으면 단계 4로 간다.

단계 4 : $b := \arg \min_{k \in \Omega} \left\{ x_k - \frac{\sum_{i=1}^N p_{ik}}{N} \lambda T \right\}$, $x_b := x_b + 1$.

단계 2로 간다.

단계 5 : $h := \arg \max_{k \in \Omega} \left\{ x_k - \frac{\sum_{i=1}^N p_{ik}}{N} \lambda T \right\}$, $x_h := x_h - 1$.

단계 6 : 시뮬레이션을 수행하여 생산을 T_c 를 구한다.

단계 7 : 만약 $T_c < T$ 이면, $x_h := x_h + 1$ 종료. 그렇지 않으면 단계 5로 간다.

3.2 시뮬레이티드 어닐링 방법

장비의 대수를 결정하는 문제는 현장에서 자주 발생하는 문제가 아니기 때문에 빠른 수행시간 안에 해를 도출할 필요가 없는 성격의 문제이다. 오히려 많은 수행시간이 소요된다라고 더 좋은 해를 찾는다면 더 바람직한 결과일 것이다. 본 논문에서는 대표적인 메타 휴리스틱 방법의 하나인 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing, SA)을 이용하여 장비의 대수를 결정한다.

SA는 Kirkpatrick et al.[8]에 소개된 이후 수많은 조합 최적화 문제에 응용이 되어왔다. 조립라인 밸런싱 문제에 대해서도 SA를 적용한 기존 연구를 찾아볼 수 있지만[9], 혼합 흐름공정에서의 라인 밸런싱 문제에 대해 SA를 이용한 연구는 찾을 수 없다. 고려하는 문제에 SA를 적용하기 위해서는 탐색 특성, 종료 조건 등에 관한 사항을 몇 가지 모수값을 이용하여 제어할 수 있는데, 본 논문에서는 Johnson et al.[7]에서 소개된 모수들을 이용한다. 온도가 냉각되는 정도는 TempFactor, 동일 온도에서 탐색 횟수는 SizeFactor, 그리고 종료 여부는 MinPercent로 결정된다. 모수에 관한 자세한 설명은 <표 1>에 정리하였다. 본 연구에서는 초기 실험을 거쳐 TempFactor와 SizeFactor값을 각각 0.90과 4로 결정하였고, MinPercent값은 Johnson et al.[7]에서 추천 값인 2로 고정하였다.

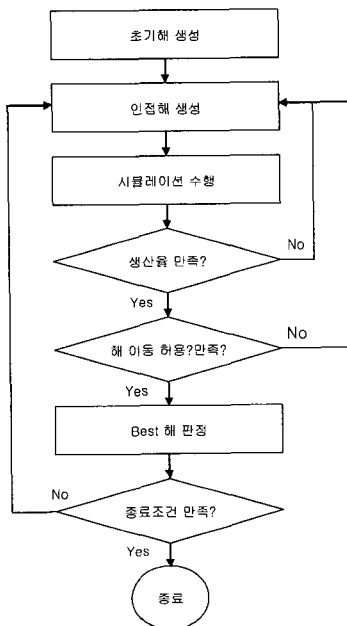
SA의 실행을 위해 위에서 소개된 모수값 결정 이외에 초기해(장비 대수) 생성, 초기 온도값 지정, 인접해 생성에 관해 본 연구의 문제 특성을 고려하여 결정해 주어야 한다. 먼저 초기해는 앞서 소개된 휴리스틱 방법 중 '전체 증가법'을 이용하여 작업장별 초기 장비 대수를 결정한다. 두 번째로 초기 온도는 초기해의 목적함

수 값, 즉 전체 장비 대수로 지정하였다.

<표 1> SA 제어 모수

모수 명	제어 내용
TempFactor	SA 온도는 현재 온도에서 TempFactor가 곱해진 값으로 생각된다.
SizeFactor	한 온도에서 인접해 크기와 SizeFactor의 곱의 횟수만큼 탐색한다.
MinPercent	다섯 온도에서 연속으로 허용 비율(acceptance ratio)이 MinPercent 퍼센트보다 작으면 종료한다.

인접해를 생성하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 본 연구에서는 (1)임의의 작업장의 장비 대수를 감소시키거나, (2)임의의 작업장에서 임의의 작업장으로 장비를 이동시키거나, (3)임의의 작업장을 선택하여 특정 확률로 증가 또는 감소시키거나, (4)병목에서 비병목 작업장으로 장비를 이동시키거나 하는 방법 등 네 가지 인접해 생성 방법을 고안하였다. 이 중 한 가지를 최종 방법으로 선택하기 위하여 사전 실험을 수행 하였다. 사전 실험은 가장 작은 크기의 문제, 즉 제품 종류 수 10개, 작업장 수 10개인 문제에 대하여 10회 반복 수행하였고, 가장 좋은 평가 척도(4장에서 소개됨)를 보이는 (3)번 방법을 최종 인접해 생성 방법을 선택하였다. 이 방법에서는 증감 여부를 특정 확률값을 기준으로 결정하는데, 본 연구에서는 증가될 확률을 10%, 감소될 확률을 90%로 정하였다. 본 연구에서 제안하는 SA 방법의 전체적인 절차가 <그림 3>에 정리되어 있다.



<그림 3> SA 방법 순서도

4. 계산 실험

본 논문에서 제안된 방법들의 성능을 평가하기 위해서 계산 실험을 수행한다. 먼저 생산율을 구하기 위해 사용된 시뮬레이션 모형에 대해서 소개하고, 자세한 계산 실험 내용에 대해서 설명한다.

4.1 시뮬레이션 모형

본 연구에서는 하나의 주어진 장비 대수 조합에 대하여 생산 시스템의 생산율을 측정하기 위해 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 시뮬레이션 수행을 위하여 C언어를 사용하여 시뮬레이션 모형을 개발하였다.

시뮬레이션 모형에서 여러 가지 경우의 혼합 흐름공정과 제품 흐름을 모의할 수 있게, 임의로 결정되는 사항들에 대해 다음과 같이 가정한다. 먼저, 주문은 랜덤하게 도착하는데, 주문의 도착간격 시간은 평균이 0.1인 지수분포를 따르고, 그때 주문 제품의 종류는 전체 종류 중 임의의 한 종류로 결정이 되고, 주문의 크기는 모두 1로 가정한다. 그리고 각 제품(i)의 작업장(k)별 가공시간(p_{ik})은 다음과 같은 이산균등분포를 따른다. 즉, $p_{ik} \sim DU(B_k + 1, B_k + 20)$, 이때, $DU(L, U)$ 는 범위 $[L, U]$ 를 갖는 이산균등분포를 의미하고, B_k 는 상한, 하한이 각각 80, 0인 이산균등분포를 따르는 값으로(즉, $B_k \sim DU(0, 80)$), 제품별 작업장별 가공시간이 임의로 결정되어지기 전에 각 작업장에 대해 임의로 결정되는 값이다.

4.2 실험 설계

여러 가지 환경에 대한 성능 변화를 측정하기 위해서 다음과 같은 요인들의 몇 가지 수준 조합에 대해 복수의 문제를 만든다.

- (1) 세 수준의 제품 종류의 수를 고려한다(10, 50, 100).
- (2) 세 수준의 작업장의 수를 고려한다(10, 20, 30).
- (3) 세 수준의 최소생산율을 고려한다(0.95, 0.90, 0.85).

각 문제 조합에 대해 5회 반복하여, 총 135개의 문제를 발생시킨다. 각 문제마다 제품별 작업장별 가공시간은 임의로 생성되기 때문에 모든 문제는 서로 다른 구성을 갖는 혼합 흐름공정을 반영하게 된다.

한 번의 시뮬레이션마다 50,000 단위 시간동안 수행되고, 초기 1,000시간은 준비시간으로 고려한다. 초기 준비시간 이전에 도착한 작업물에 대해서는 생산을 계산에서 제외한다. 생산율은 유효 시뮬레이션 시간(1,000~50,000)동안 도착한 작업물 중에 완료된 작업물의 비율 값으로 결정된다. 시뮬레이션 수행을 포함한 모든 계산 실험은 3.2Ghz의 속도를 갖는 Pentium IV 컴퓨터에서 수

행되었다.

4.3 실험 결과

앞 절에서 발생시킨 각 문제에 대해 제안된 6개의 방법을 적용하였다. 방법들의 성능을 표시하기 위하여 상대적인 지표인 최소 장비대수로부터의 차이값(Deviation From the Best, DFB)을 이용한다. DFB는 $(S_a - S_b)$ 로 정의되며, 이때, S_a 는 해당 방법으로부터 얻는 전체 장비대수이며, S_b 는 6개 방법으로 얻는 전체 장비대수 중 가장 적은 값이다. DFB가 0에 가까운 값을 가질수록 더 좋은 성능의 방법이 된다.

<표 2>에 전체 실험 결과가 정리되어 있다. 병목 증가법, 부하량 증감법, 그리고 SA 방법이 나머지 방법들에 비해 좋은 성능을 보이는 것을 개략적으로 확인할 수 있다. 각 방법 쌍끼리 통계적으로 차이가 있는지를 확인하기 위하여 전체 15쌍에 대하여 쌍 t-검정을 수행하였고, 그 결과가 <표 3>에 정리되어 있다. 두 쌍, 즉 (부하량 증감법 vs. SA법)과 (병목 증가법 vs. SA법)을 제외하곤 모든 쌍이 통계적으로 서로 차이가 있다고 판정되었다(유의 수준 0.01). <표 2>를 보면 (병목 증가법 vs. 부하량 증감법)쌍의 차이는 매우 미세하지만, 부하량 증감법은 병목 증가법보다 나쁘지 않은 해를 항상

<표 2> 전체 실험 결과

	DFB [†]	NBS [‡]
순방향 증가법	10.4(5.0)	1
병목 증가법	0.8(1.0)	64
부하량 증감법	0.7(0.9)	69
부하량 증감법 2	2.9(2.6)	19
예측차 증감법	6.6(9.9)	22
SA	0.6(1.4)	103

주) [†] 최소 장비대수로부터 차이값의 평균 및 분산(괄호안).
[‡] 전체 실험 문제(135개)에 대해 가장 좋은 해를 구한 횟수 (Number of Best Solutions found).

<표 3> 쌍 t-검정 결과

	병목 증가법	부하량 증감법	부하량 증감법 2	예측차 증감법	SA
순방향 증가법	*	*	*	*	*
병목 증가법		*	*	*	
부하량 증감법			*	*	
부하량 증감법 2				*	*
예측차 증감법					*

주) * 유의수준 0.01에서 통계적으로 서로 차이가 있음.

주기 때문에 통계적으로도 유의한 결과를 보였고, (부하량 증감법 vs. SA법)이나 (병목 증가법 vs. SA법)쌍은 문제에 따라 해의 우열이 뒤바뀌는 경우가 빈번하기 때문에 통계적으로 서로 차이가 없는 것으로 판정되었다.

실험 설계시 고려하였던 세 종류의 환경 변화가 성능에 영향을 미치는 정도를 알아보기 위하여 분산분석을 실시하였고, 그 결과가 <표 4>에 정리되어 있다. 결과를 보면, 작업장의 수에 따라 성능의 차이가 발생하였고, 방법론과 세 환경 요인간의 교호작용 효과를 보았을 경우에도 방법론(A)×작업장의수(C) 요인이 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다(유의수준 0.01).

<표 4> 분산 분석 결과

요인	자유도	제곱합	평균 제곱합	F
방법론(A)	5	11021.0	2204.2	156.4*
제품종류수(B)	2	4.3	2.1	0.2
작업장수(C)	2	3056.9	1528.5	108.5*
최소생산율(D)	2	46.7	23.3	1.7
A×B	10	151.5	15.1	1.1
A×C	10	3805.5	380.5	27.0*
A×D	10	101.4	10.1	0.7
오차	768	10821.3	14.1	

주) * 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의함.

작업장의 수에 따라 성능이 다르게 나타나는 것을 분산 분석을 통하여 확인했기 때문에, 구체적인 결과가 어떻게 달라지는지 살펴볼 필요가 있다. 작업장의 수에 따른 각 방법의 성능이 <표 5>에 정리되어 있다. SA 방법의 경우 작업장의 수가 적을수록 매우 좋은 성능을 보이지만, 작업장의 수가 30개일 경우에는 병목 증가법이나 부하량 증감법이 SA 방법에 뒤처지지 않는 성능을 보인다.

<표 5> 작업장 수에 따른 실험 결과

	DFB			NBS		
	10	20	30	10	20	30
순방향 증가법	5.0	11.0	15.4	1	0	0
병목 증가법	0.7	0.8	0.8	19	21	24
부하량 증감법	0.7	0.8	0.7	20	22	27
부하량 증감법 2	1.1	2.7	5.0	13	5	1
예측차 증감법	1.4	4.3	14.2	16	5	1
SA	0.2	0.3	1.3	38	39	26

마지막으로 <표 6>에는 각 방법의 계산 수행시간이 정리되어 있다. 평균 수행시간을 나타낸 것으로 전체

185문제를 풀 때마다 수행시간을 기록하여 그 평균값을 구한 것이다. 예상대로 휴리스틱 방법들은 길어야 1분 안에 해를 찾을 수 있었고, SA법은 평균적으로 약 950초 정도가 걸리고, 가장 긴 시간 수행된 경우는 8,000초를 넘기도 하였다.

<표 6> 평균 수행 시간(초)

순방향 증가법	병목 증가법	부하량 증감법	부하량증감법2	예측차 증감법	SA
9.1	5.3	5.8	7.3	19.9	949.1

본 연구에서 해결하고자 하는 문제의 성격 상 빠른 시간 안에 해를 구해야하는 필요성은 없다. 오랜 시간이 걸리더라도 가장 좋은 해를 찾는 것이 바람직한 일이다. 실험 결과에서 보듯이 SA 방법은 수행시간은 휴리스틱방법들에 비해 수십에서 수백까지 더 걸리지만 그 성능에서 많은 경우에 우수한 결과를 보인다. 하지만, SA 방법이 모든 경우에 가장 좋은 해를 보이는 것은 아니기 때문에, 부하량 증감법과 같은 휴리스틱 방법도 함께 이용하여야 SA 방법을 보완할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 반도체, PCB 등의 제조 시스템의 생산 형태인 혼합 흐름공정에서의 라인 밸런싱 문제를 고려하였다. 혼합 흐름공정은 각 작업장마다 복수의 기계를 보유할 수 있기 때문에, 각 작업장의 용량을 균일하게 만들어주기 위해서는 작업장마다의 기계 대수를 적절히 결정해 주어야 한다. 일반적으로 설비의 가격이 고가이기 때문에, 최소의 기계 대수로 주어진 생산율을 만족시킨다면, 최소의 비용으로 동일한 생산성을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 최소한 주어진 생산율 이상의 성능을 보이면서 시스템의 총 기계대수를 최소화할 수 있는 휴리스틱 방법과 시뮬레이션 어닐링 방법을 제시하였다.

첨단 전자 제품 제조업에서는 장비 도입에 막대한 금액이 투자되는데도 불구하고 본 연구와 같은 용량 관리에 관한 많은 연구들이 수행되고 있지 않은 상황이다. 본 연구에서는 제품 수요로부터 직접적으로 용량을 결정하는 것이 아니고, 구성된 생산 시스템에서 제품의 생산 흐름에 대해 좀 더 자세히 살펴보고, 시스템 구성의 작은 차이까지 실제 생산율에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하여 용량을 결정하게 된다. 개발된 방법을 통해 생산율에 영향을 주지 않는 장비의 도입을 줄이고, 생산율 향상에 효과적인 장비의 도입을 증가시킨다

면, 그에 따른 비용 절감은 최소한 장비 가격만큼은 이루어라 기대한다.

본 연구의 결과는 혼합 흐름공정과 같은 형태의 생산 시스템을 갖은 생산관리 분야의 연구에 이용될 수도 있다. 혼합 흐름공정과 같은 시스템은 매우 복잡한 형태의 생산 라인을 갖고 있기 때문에 그에 대한 이론적인 분석 및 해석 방법에 시뮬레이션 모형을 사용하는 것이 유일한 접근 방법일 경우가 많다. 본 연구에서 개발된 방법을 통해 시뮬레이션 모형을 초기에 구축 시, 생산 라인에서의 장비 대수에 관한 사항을 주어진 요소가 아니라 이론적인 분석을 통해 얻어진 결과로 이용할 수 있다. 임의로 주어진 장비 대수로 인해 불균형적인 작업장 용량을 갖는 혼합 흐름공정이 아니라, 본 연구에서 개발된 방법론으로부터 얻어진 장비 대수를 사용하여 균형적인 작업장 용량을 갖는 혼합 흐름공정을 시뮬레이션 모형에 구현할 수 있다. 결론적으로, 추후 혼합 흐름공정에 대해 시뮬레이션 모형화를 통해 분석하는 연구에 대하여 시뮬레이션 모형 구축시 본 연구의 결과물을 이용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Alisanto, D., Khoo, L. P., and Jiang, P. Y.; "An immune algorithm approach to the scheduling of a flexible PCB flow shop," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 22 : 819-827, 2003.
- [2] Bard, J. F., Srinivasan, K., and Tirupati, D.; "An optimization approach to capacity expansion in semiconductor manufacturing facilities," *International Journal of Production Research*, 37 : 3359-3382, 1999.
- [3] Becker, C. and Scholl, A.; "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing," *European Journal of Operational Research*, 168 : 694-715, 2006.
- [4] Chakravorty, S. S. and Atwater, J. B.; "A comparative study of line design approaches for serial production systems," *International Journal of Operations and Production Management*, 16 : 91-108, 1996.
- [5] Erel, E. and Sarin, S. C.; "A survey of the assembly line balancing procedures," *Production Planning and Control*, 9 : 414-434, 1998.
- [6] Gupta, J. N. D., Hariri, A. M. A., and Potts, C. N.; "Scheduling a two-stage flowshop with parallel machines at the first stage," *Annals of Operations Research*, 69 : 171-191, 1997.
- [7] Johnson, D. S., Aragon, C. R., McGeoch, L. A., and

- Schevon, C.; "Optimization by simulated annealing : an experimental evaluation; part I, graph partitioning," *Operations Research*, 37 : 865-892, 1989.
- [8] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr. C. D., and Vecchi, M. P.; "Optimization by simulated annealing," *Science*, 220 : 671-680, 1983.
- [9] McMillian, P. R. and Frazier, G. V.; "Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing with parallel workstations," *International Journal of Production Research*, 36 : 2717-2741, 1998.
- [10] Quadt, D.; *Lot-sizing and scheduling for flexible flow lines, Lecture notes in economics and mathematical systems*, Springer, Berlin Germany. 2004.
- [11] Scholl, A. and Becker, C.; "State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing," *European Journal of Operational Research*, 168 : 666-693, 2006.
- [12] Wang, K.-J. and Lin, S.-H.; "Capacity expansion and allocation for a semiconductor testing facility under constrained budget," *Production Planning and Control*, 13 : 429-437, 2002.
- [13] Wang, K.-J., Wang, S.-M., and Yang, S.-J.; "A resource portfolio model for equipment investment and allocation of semiconductor testing industry," *European Journal of Operational Research*, 179 : 390-403, 2007.
- [14] Wu, S. D., Erkoc, M., and Karabuk, S.; "Managing Capacity in the high-tech industry : A review of literature," *The Engineering Economist*, 50 : 125-158, 2005.