

유연생산라인의 부하평준화를 위한 작업흐름선택 전문가시스템

함호상* · 한성배*

Job Route Selection Expert System for Workload Balancing in Flexible Flow Line

Ho-Sang Ham*, Sung-Bae Han*

Abstract

A flexible flow line(FFL) consists of several groups of identical machines. All work-orders flow along the same path through successive machine groups. Thus, we emphasized the balancing of workloads between machine groups in order to maximize total productivity. On the other hand, many different types of work-orders, in varying batch or lot sizes, are produced simultaneously. The mix of work-orders, their lot sizes, and the sequence in which they are produced affect the amount of workload. However, the work-orders and their lot sizes are prefixed and cannot be changed. Because of these reasons, we have developed an optimal route selection model using heuristic search and Min-Max algorithm for balancing the workload between machine groups in the FFL.

Keyword : flexible flow line(FFL), workload balancing, route selection model, Min-Max algorithm

1. 서 론

유연생산라인(FFL : flexible flow line)은 하나 이상의 동일한 기계를 갖는 일련의 순차적인 작업 셀들로 구성된 생산라인을 의미하는 것으로서 셀 내의 기계간의 작업은 상호 변경이 가능하다. 이러한 유

연생산라인에서의 작업특징은 일련의 작업순서를 가지고 있으며 불필요한 셀의 경우는 경유하지 않고 다음 셀로 넘어가게 된다. 일반적으로 유연생산라인은 주로 단납기의 특징을 갖는 여러 종류의 작업을 동시에 수행하게 되어 셀 간의 부하가 불균형하게 되어 라인의 생산성을 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 기계들로 구성된 일

련의 순서를 갖는 유연생산라인에서 셀 간의 작업부하를 평준화하는 작업흐름을 선택하는 전문가시스템을 구축하고자 한다.

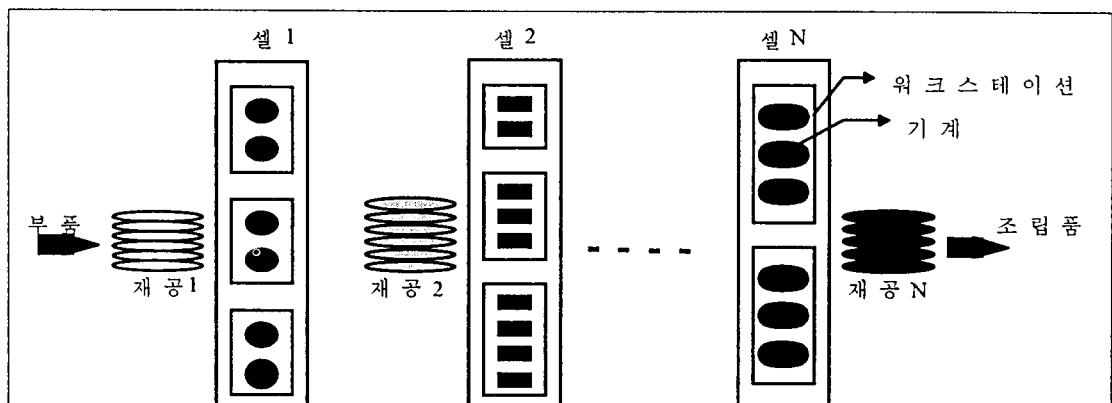
유연생산라인에 대한 연구는 그 동안 계속적으로 수행되어 왔다(Deane, Moon, 1992 ; Kochhar, Morris, 1987 ; Rabin, Nagel, 1991 ; Wittrock, 1988). 일반적으로 기계가공작업에서의 유연생산시스템은 작업변경 시간을 고려하지 않지만 전자부품조립의 생산현장에서는 작업변경시 상당시간의 작업준비시간(Set Up Time)이 소요되고 있다. 일례로서 인쇄회로기판(PCB : Printed Circuit Board)의 자동 부품삽입 라인의 경우 고도의 부품삽입률을 위해서는 작업준비시간의 단축이 필수적이다(Maimon, Shtub, 1991). 본 연구에서 고려하고 있는 유연생산라인은 인쇄회로기판의 자동 부품삽입 라인작업에서 일반적으로 나타나는 형태이다(Johri, 1991 ; Beng , 1994 ; Dessouky *et al.*, 1995 ; Lofgren *et al.*, 1991).

작업교체로 인한 준비시간을 단축하기 위한 접근방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫번째가 생산 룻의 크기를 늘려 단위 준비시간을 단축하는 것이다. 그러나 이 경우 공정 내의 재공이 늘어나게 된다. 두 번째로는 그룹테크놀로지(GT : group technology)의

개념을 도입하여 제품을 군집화하는 것이다. 이 경우는 지그, 고정척, 공구 등 유사한 자원을 사용하거나 유사한 자재를 사용하는 제품을 동일한 군으로 편성하여 작업을 수행하는 방법이다(Carmon *et al.*, 1989).

그룹테크놀로지 개념을 유연생산라인에 적용할 경우, 개개의 셀을 동일한 자원과 자재를 사용하는 워크스테이션이라고 하는 몇 개의 소그룹으로 구분할 수 있다. <그림 1>은 이러한 개념의 유연생산라인을 나타내는 것으로서, 하나 이상의 동일한 기계군을 워크스테이션으로 편성하였으며 다시 하나 이상의 워크스테이션의 군이 모여 하나의 셀을 구성하였고 이러한 셀은 일련의 순서를 가지고 있음을 나타내고 있다. 결국 이렇게 구성된 군집화된 유연생산라인은 기존의 유연생산라인에 비해 작업변경에 따른 작업준비시간과 노력을 단축시킬 수 있다는 장점을 갖게 되는 것이다.

그러나 군집화된 유연생산라인의 경우는 워크스테이션 간의 부하 불균형이 발생하게 된다. 만약 모든 작업량이 하나의 작업흐름에 의해 생산될 경우 작업빈도가 높은 특정의 워크스테이션에서 병목현상이 발생하게 되며, 상대적으로 작업빈도가 낮은 워크스



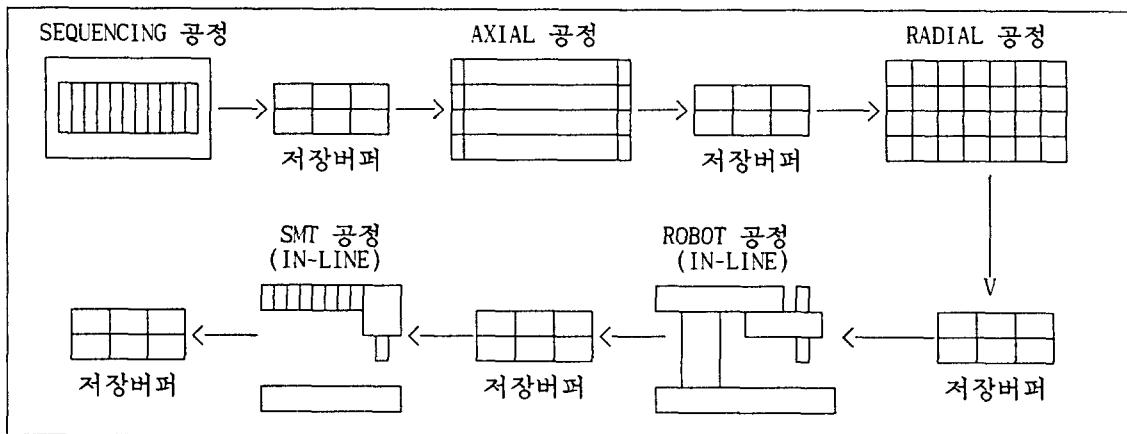
<그림 1> 유연생산라인의 공정흐름도

테이션에서는 유휴시간이 증가하게 된다. 따라서 위크스테이션 간의 작업부하평준화를 위한 작업흐름을 적절히 선택하는 것이 유연생산라인의 생산성 제고를 위해서는 필요하다.

2. PCB 자동삽입라인 분석

전자제품의 조립은 크게 인쇄회로기판 상에 부품을

조립하는 라인과 본체인 기구물에 조립된 PBA(Printed Board Assembly)를 실장하는 조립라인으로 구분할 수 있다. 전자에 속하는 인쇄회로기판 자동삽입라인은 일반적으로 Sequencing공정, Axial공정, Radial공정, Robot공정과 SMT공정으로 구성되며, 각 공정사이에는 공정간의 대기물량을 보관하는 저장버퍼가 있어 공정간의 부하불균형을 부분적으로 흡수해 주는 역할을 하고 있다. <그림 2>는 국내의 전자조립업체인 S전자의 인쇄회로기판 자동삽입라인 공정구성도이다.



<그림 2> PCB 자동삽입라인의 공정구성도

인쇄회로기판 자동삽입라인의 Sequencing공정은 Axial공정에서 인쇄회로기판에 삽입될 부품을 삽입 순서에 따라 재배열하는 공정으로서 Axial공정의 준비공정이다. Axial공정은 저항, 코일, 콘덴서, 다이오드와 같은 Axial형태의 부품을 VCD(Variable Center Distance) 방식으로 자동 삽입해 주는 공정이다. Radial공정은 트랜지스터, 세라믹콘텐서, 스위치류 등과 같은 Radial형태의 부품을 수직 삽입하는 공정으로 Axial공정과는 달리 Sequencer를 자체 부착하고 있어 Sequencing공정과 같은 준비작업이 필요 없다. 로보트공정은 자삽기로 부품삽입이 불가능한 코트

류의 이형부품을 삽입시켜 주며 SMT공정에서는 상기의 자삽기로 삽입할 수 없는 극소형화된 부품인 Register, Ceramic Capacitor, SOIC(Small Outline Integrated Circuit) 등을 Bond Cream을 사용하여 표면에 부착시키는 공정이다.

인쇄회로기판 자동삽입라인은 전형적인 유연흐름 생산형태로서 단기간의 생산주기동안 여러 종류의 기판들에 다양한 이종의 부품을 조립한다. 그런데 최근 제품의 수명이 크게 단축됨에 따라 제품종류의 다양화, 주문의 소로트화 및 단납기화가 초래되어 생산현장에서는 작업교체가 빈번히 발생하고 있다.

이러한 작업교체는 부품삽입에 필요한 NC프로그램 변경, 부품의 Sequencing을 위한 부품 재배열 등과 같은 부수적인 작업준비시간을 증대시키는 결과를 가져와 생산성 저하의 주요 원인이 되고 있다. 특히 빈번한 작업교체로 부적합한 제품조합이 발생하여 공정간의 부하불균형이 일어난다. 이로 인해 공정간에 Blocking 또는 Starvation이 발생하여 공정내 재공물량과 설비의 유휴시간이 증대된다.

따라서 기업현장에서는 작업교체에 따라 발생되는 많은 양의 작업준비시간을 단축시키기 위해 삽입부품이 유사한 기관들을 그룹테크놀로지개념으로 분류해 몇 개로 그룹화하여 생산하고 있다. 이를 위해 공정 내의 설비들을 삽입부품의 그룹에 맞게 몇 대씩 묶어 5~6개의 소공정으로 특화하여 운영함으로써 작업교체 회수를 최소화하고 있다. 그러나 이와 같은 생산방식은 작업준비시간을 대폭적으로 줄여주기는 하나 공정의 부하량 예측이 어려워 공정간 부하불균형을 야기시키고 있다.

이와같은 공정간 부하불균형을 해소하기 위해 하나의 기관에 대해 부품의 삽입방식 변경과 부품의 삽입순서 조정 등을 통해 여러 가지의 작업흐름(Route)을 설정해 놓고 공정의 부하상황에 따라 적절한 경로를 선택하고 있다. 그러나 현실적으로 생산현장의 작업자가 복수의 공정 및 소공정의 부하상황과 여러 개의 작업흐름경로를 동시에 고려하는데는 한계가 있어 통상 초기공정의 부하상황 만을 보고 작업흐름경로를 선택하고 있는 실정이다. 과거에는 각 기관을 여러 개의 가능한 작업흐름경로 중 단지 하나의 작업흐름경로로 고정시켜 놓았기 때문에 선호도가 높은 일부 소공정에 집중적으로 많은 부하가 편중되어 작업의 효율성이 크게 떨어졌다. 그러나 현재 사용 중인 초기 공정의 부하율 만을 평가하여 경로를 선정하는 경우도 역시 차기공정 이후부터의 부하불균형이 초래되기는 마찬가지이다. 따라서 실질적인 부하의 평준화를 위해서는 라인

내의 전체 공정을 대상으로 부하율을 평가하는 공정간 부하평준화 방안이 필요하다.

3. 휴리스틱 탐색에 의한 알고리즘 개발

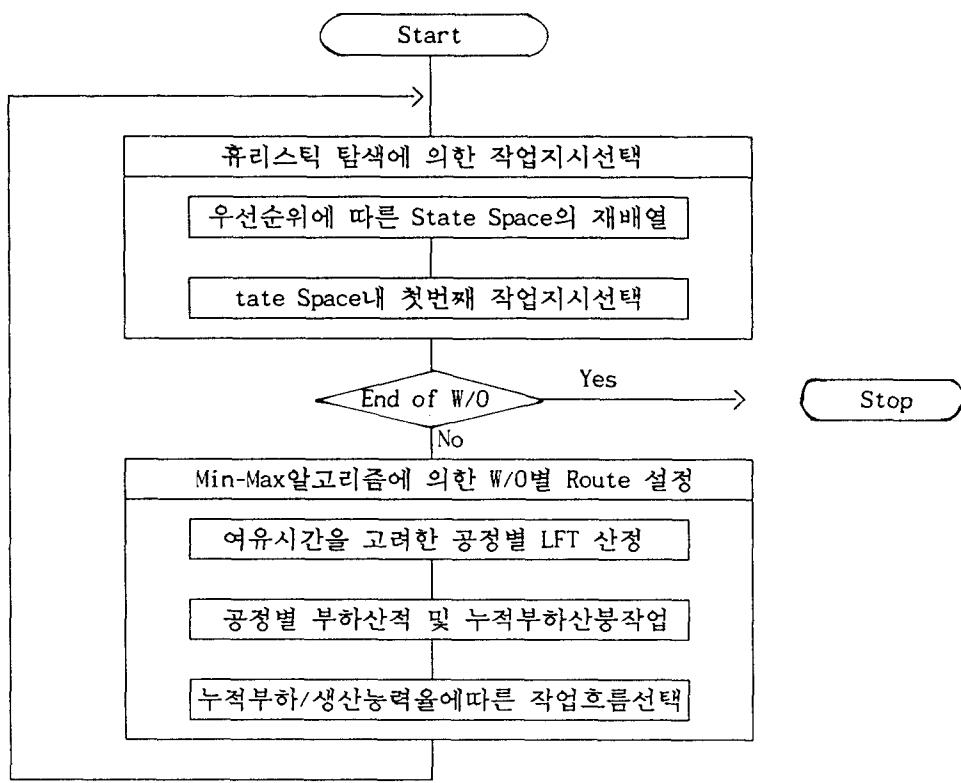
3.1 개요

본 연구에서는 휴리스틱 접근방법을 기본으로 한 계산적인 알고리즘을 개발하여 문제를 해결코자 한다. 수학적인 모델링에 의한 해의 도출은 Global한 접근방법으로 동시에 모든 조건과 제약을 고려하여 최적의 해를 구하지만, 본 논문의 접근방법에서는 근시안적인(Myopic Policy) 접근방법으로 Local 최적해를 점진적으로 산출함으로써 위하는 최종의 해를 구하게 된다.

한편, 이 접근방법은 <그림 3>에서와 같이 휴리스틱 탐색에 의한 작업지시선택부분과 부하율에 대한 Min-Max알고리즘을 활용한 작업지시(W/O : Work Order)의 작업흐름선택부분으로 구분된다. 먼저 휴리스틱 탐색은 작업지시단위로 작업흐름을 선택하기 위하여 인쇄회로기판 자동삽입공정의 특징 및 작업부하분석의 특성을 고려하여 작업지시를 선택하는 순위기준을 수립한다. 그리고, 부하율에 따른 작업흐름의 선택에서는 각 작업지시가 지니는 모든 작업흐름에 대하여 부하율을 계산하여 가장 큰 병목 현상의 발생을 억제하는 최적의 작업흐름을 설정하게 된다. 한편, 이와 같은 두단계의 처리과정은 모든 작업지시에 대하여 반복되어 수행된다.

3.2 휴리스틱 탐색 방법에 의한 작업지시 선택

휴리스틱 기법은 완벽함에 대한 보장은 기대할 수



〈그림 3〉 자동삽입공정의 작업흐름선택을 위한 알고리즘 흐름도

없는 대신에, 가능한 탐색코자하는 과정을 효과적으로 유도하는 기법이다. 즉, Global 최적해를 보장할 수 없으나, 탐색과정을 보다 단순화하기 때문에 복잡한 실제적인 문제해결방안으로 많이 활용되고 있다[8]. 특히, 인쇄회로기판 자동삽입공정의 경우에는 특정한 생산기간동안에 생산되는 기판이 수백 종에 이르며, 작업지시는 납기라는 시간적인 제약과 선택해야하는 다수의 작업흐름을 지니고 있기 때문에 동시에 모든 공정의 부하평준화를 만족시키면서 모든 작업지시에 대한 최적의 작업흐름을 결정하기란 거의 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 근시안적인 접근방법에 의하여 Local 최적해를 단계적으로 산출함으로써 Global 최

적해는 아니지만 타 접근방법에 비하여 우수한 작업선택의 해를 도출한다.

인쇄회로기판 자동삽입공정의 부하평준화를 만족시키는 접근방법은 크게 두가지 방안을 고려할 수 있다. 첫번째 방법은 자동삽입공정은 작업흐름의 특성상 Flow-shop의 개념으로 구성되어 있기 때문에 공정을 단계(Stage)로 고려하는 방법이고, 두번째 방법은 작업지시를 단계로 간주하는 방법이다. 즉, 작업흐름이란 작업지시마다 어떠한 공정을 거쳐 작업이 수행되는지를 정하는 것이기 때문에 전자의 방법은 공정을 단계적으로 고정시킨 후 모든 작업지시에 대하여 최적 작업흐름을 수립하는 방안이고,

후자의 방법은 특정의 기준에 의하여 임의의 작업지시를 선택한 후 모든 공정에 대하여 부하를 분석한 후 가장 공정간 부하를 평준화시키는 작업흐름방안을 선택하는 방안이다. 그런데, 전자의 방법에서는 단계마다 수립된 해 사이에 연계성이 존재하므로 Backtracking이 발생한다. 즉, 앞공정에서 최적의 작업흐름을 선택하였으나, 후공정에서는 불균형을 이루는 경우 앞공정으로 Backtracking하여 다시 최적의 해를 구해야한다. 그러나, 후자의 방법은 단계마다 독립성이 유지되기 때문에 Backtracking이 발생하지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 후자의 방법을 활용코자 한다.

이와 같은 개념 하에서 휴리스틱 탐색을 표현하는 State Space를 정의하면, (식 1)과 같다. 따라서, Initial State와 Goal State는 (식 2)와 (식 3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{State Space } S &= \{\text{Route을 선택 못한 작업지시}\} \\ &= \{w_1, w_2, \dots, w_k\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Initial State } S &= \{\text{생산코자하는 모든 작업지시}\} \\ &= \{w_1, w_2, \dots, w_{Nw}\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Goal State } S = \{\text{Null}\} \quad (2)$$

단, w_i : 정해진 우선순위에 따라 State Space내에 i 번째로 정렬된 작업지시

다음은 State Space내 존재하는 작업지시들에 대하여 어떠한 기준으로 서열지워서 선택하느냐가 우리의 관심사항이다. 일반적으로 우선순위기준에 의하여 탐색과정이 수립되기 때문에 순위기준에 대한 설정은 매우 중요하다. 이와 같은 중요성에 비추어, 본 논문에서는 인쇄회로기판 자동삽입공정의 유연성 측면과 부하산봉작업의 특성을 고려하여 다음과 같은 우선순위기준을 설정하였다.

순위기준 1 : 기판이 지니는 작업흐름의 개수가 적은 순서로 배열한다.

일부의 기판은 작업흐름이 고정되어 있지만, 대부분의 기판의 경우에는 하나 이상의 작업흐름을 지니고 있다. 일례로 Main Board의 경우에는 제품의 중요성 및 품질안정 때문에 고정된 작업흐름을 갖고 있지만, Sub-Board의 경우에는 공정간의 부하를 고려하여 작업을 진행하기 위하여 하나 이상의 작업흐름을 지니고 있다. 이와 같은 현실 속에서 고정된 작업흐름을 지닌 기판을 제일 나중에 처리하는 경우에는 부하불균형으로 작업이 불가능하게 된다. 따라서, 작업흐름의 개수가 적은 기판부터 State Space에 배열한다.

순위기준 2 : 납기순으로 작업지시를 배열한다. 누적부하에 대한 산봉작업은 부하량이 Peak를 이루는 Time-bucket보다 이전의 Time으로 산봉되고, 이후의 시점으로는 산봉되어지지 않는다. 따라서, 납기순으로 W/O를 배열하여 부하를 LFT에 따라 해당 Time-bucket에 산적함으로써 공정간의 부하에 대한 산봉작업을 효율적으로 수행할 수 있다. 일례로 뒤에 제일 납기가 빠른 작업을 처리한다면, 이미 평균화된 공정간의 부하를 혼란시키는 결과를 가져온다.

순위기준 3 : 작업부하량이 큰 작업부터 작업지시를 배열한다.

우리는 가정에서 초기에 설정한 Lot을 도중에 분리시키지 않기로 정의하였다. 따라서, 작업부하량이 큰 작업지시순으로 배열함으로써 공정간의 불균형을 사전에 방지할 수 있다. 일례로 부하량이 적은 순으로 배열시키는 경우, 최종단계에서 큰 부하량이 산적되기 때문에 이전의 공정간 균형상태는 깨질 수 있다.

한편, 이들 순위기준들은 순위가 높은 순서로 Tie-break 규칙을 적용시킴으로써 작업지시를 State Space내 정렬시킨다. 일례로, 2개의 작업지시의 1순위값이 동일한 경우에는 2순위수치를 비교하여 정

렬시키고, 만약 2순위값마저도 동일한 경우에는 3순위의 기준을 적용시킨다. 따라서, Initial State로부터 Goal State로 전개되는 단계는 작업지시개수만큼 반복되어 진행된다. 그러므로, 본 논문에서 제안하는 휴리스틱 탐색방식을 활용하는 경우에는 N_w 번의 처리과정을 거쳐 Goal State에 접근할 수 있다. 그러나, 일반적인 Search방법에서는 N_w ! 번만큼의 단계를 처리하여야 Goal State에 도달할 수 있다.

이상과 같은 휴리스틱 탐색방법을 종합적으로 요약하면, 다음과 같은 절차로 표현할 수 있다.

절 차 :

- 1) Initial State를 평가한다. 만약, 그것이 Goal State라면, 과정을 중단한다. 그렇지 않으면, Initial State를 Current State로 한다.
- 2) Current State가 Goal State에 이를 때까지 다음 과정을 반복한다.
 - ① Current State내에서 가장 우선순위가 높은 작업지시를 선택한다.
 - ② 누적부하율에 대한 Min-Max 알고리즘을 통한 최적 작업흐름을 설정한다.
 - ③ 작업흐름이 결정된 작업지시를 Current State에서 제외시킨 후, 새롭게 Current State를 수립한다.

3.3 Min-Max알고리즘에 의한 작업흐름 선택

작업지시별 작업흐름의 선택은 수학적인 모델링에서 언급되었듯이 공정간 누적된 부하량의 균형을 이루는 목적 하에서 최적안이 수립된다. 따라서, 본 과정은 다음과 같이 3단계로 구분하여 생각할 수 있다.

- 1) 여유시간의 공정간 배분에 따른 공정별 LFT

산정

- 2) 공정별 LFT를 기준으로한 부하산적 및 누적부하 산봉작업
- 3) 누적부하율에 대한 Min-Max알고리즘에 의한 작업흐름선택

3.3.1. 총 여유시간의 공정간 배분에 따른 공정별 LFT산정

공정흐름에 따른 일련의 작업활동을 위한 유용한 시간 간격들은 가장 빠른 시작시점(EST)과 가장 늦은 종료시점(LFT)에 의하여 표현된다. 그러나, 본 논문에서는 LFT만을 주로 활용하는데, LFT는 총 여유시간을 어떠한 기준에 의하여 배분시키는가에 따라 정의될 수 있다[9]. 먼저, 임의의 작업지시에 대한 총 여유시간($ST(w)$) : Total Slack Time of 작업지시 w)을 정의하면 식 4와 같다. 여기서 Np 는 대공정 수, s 는 대상 소공정, t 는 작업분석 시작일로부터 t 번째 일자, r_w 는 작업지시 w 에 대한 작업흐름, $l_{s,w,r_w}(t)$ 는 시점 t 에서 작업지시의 작업흐름중 소공정 s 에서의 작업부하량, x_{w,r_w} 는 작업지시 w 가 작업흐름 r_w 를 선택하는 변수를 의미한다.

$$ST(w) = \left\{ [Due-date(w) - EST(w)] - \sum_{p=1}^{N_p} l_{w,p} \right\} \quad (4)$$

단, $l_{w,p}$: 대공정 p 에서의 작업지시(w)에 의한 작업부하량

$$\left\{ l_{w,p} = \sum_{s=p+1}^x \sum_{r_w=1}^{Nr_w} (l_{s,w,r_w}(t) * x_{w,r_w}) \right\}$$

이와 같이 산정된 총 여유시간을 공정마다 배분함에 있어서 여러 가지 방법이 존재하나, 일반적으로 공정의 부하비율(R : Ratio of Load)에 비례하여 분배시킨다. 따라서, 임의의 공정 p 에 대한 여유시간을 정의하면 식 5와 같으며, 이를 활용한 공정 p 에 대한 LFT는 식 6과 같다.

$$ST(w, p) = R(w, p) * ST(w)$$

$$\text{단, } \sum_{p=1}^{N_p} R(w, p) = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$LFT(w, p) = EST(w) + \sum_{p_j=1}^{N_p} [l_{w, p_j} + ST(w, p_j)] \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

단, $R(w, p)$: 작업지시(w)의 전체작업부하율에대한 공정 p 에서의 부하율

$$\left\{ R(w, p) = \frac{l_{w, p}}{\sum_{p=1}^{N_p} l_{w, p}} \right\}$$

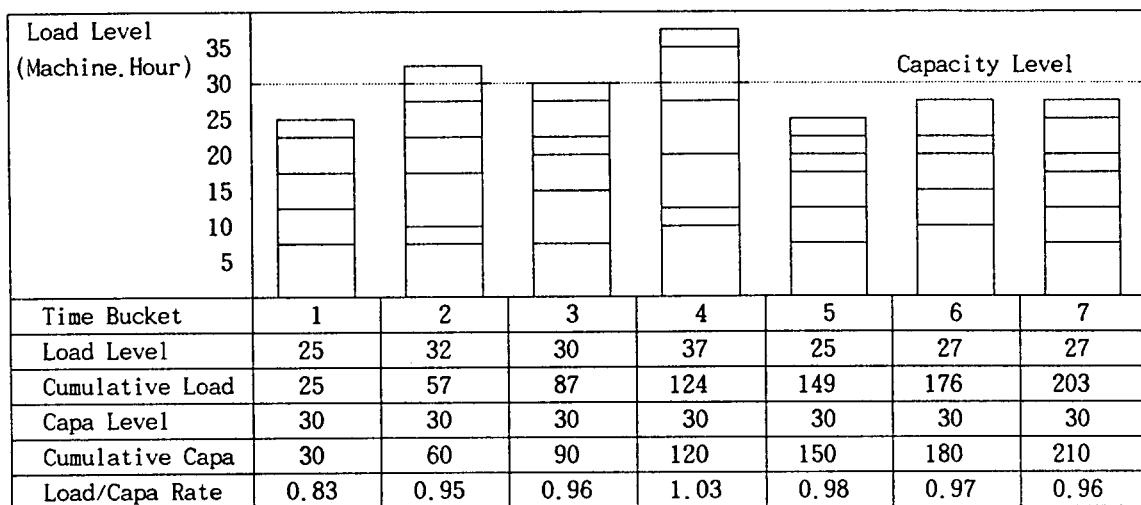
그리고, $ST(w, p)$: 공정 p 에서의 작업지시(w)가 지니는 여유시간.

3.3.2. 공정별 부하산적 및 누적부하 산봉작업

앞에서 산출된 공정별 LFT를 기준으로 각각의 작업지시의 작업부하량을 산적한다. 이때, 산적되는 작업부하량은 “Machine * Hour”의 단위로, 기판이

지니는 작업흐름에 따라 공정마다 정해진 작업준비시간과 실작업시간의 합으로 계산한 후, 해당 LFT와 일치하는 Time-bucket에 누적한다. 한편, 생산능력은 설비대수와 당일 작업시간의 곱으로 산출되는데 만약 해당 공정내 일부 설비가 예방정비 및 설비의 고장으로 작업이 불가능한 경우에는 이를 사전에 고려해야 한다.

따라서, 공정별 작업부하량 및 생산능력에 대한 수준 및 누적된 수준을 도표로서 도시하면, <그림 4>와 같이 나타낼 수 있다. 특히, 맨 하단부분의 계산된 누적 부하량/누적 생산능력의 비율은 생산능력을 고려한 작업부하수준을 표현하기 때문에 이에 대한 수치를 활용하여 공정마다의 부하수준을 판단할 수 있다. 또한, 이들 누적된 부하량과 생산능력간의 비율은 절정을 이루는 부하에 대한 산봉된 부하수준을 의미한다. 일례로 4번째 시점에서 1.03이라는 수치는 이 Peak-time의 시점이전의 모든 기간에서 1.03의 작업부하량이 부과된다는 사실을 의미한다. 따라서, 이들 수치를 활용하여 생산현장에 걸리는 산봉된 부하수준을 표현하면 <그림 5>와 같이 나타낼 수



<그림 4> 부하산적 및 누적부하에 의한 부하/능력을 산출도표

Load/Capa Rate	1.1	1.03					
	1.0						
	0.9						
	0.8					0.87	
Time Bucket	1	2	3	4	5	6	7
Load/Capa Rate	1.03	1.03	1.03	1.03	-	-	-
			Load Level	25	27	27	
			Cumulative Load	25	52	79	
			Capa Level	30	30	30	
			Cumulative Capa	30	60	90	
			Load/Capa Rate	0.83	0.86	0.87	

〈그림 5〉 산봉작업결과에 따라 평준화된 작업부하율 산출도표

있다. 이때, 기간중 최고의 정점을 이루는 산을 허물고 난 후, 이후 시점에 대해서는 새롭게 부하평준화작업을 수행하여야 한다. 결과적으로 산봉작업은 뱀을 막아 수위를 조정하는 개념으로 생각할 수 있다.

3.3.3. 누적부하율에 대한 Min-Max 알고리즘에 의한 작업흐름선택

산봉작업단계에서는 가장 높은 부하의 산을 앞쪽으로 봉괴시켜 정점시점에 걸리는 부하를 평준화시킨다. 그리고, 이후 시점에 대하여는 동일한 방법으로 두번째 높은 부하의 산을 발견하여 산봉시킨다. 만약, 두번째의 산봉작업이후에 산봉할 기간이 존재한다면 동일한 방법으로 산봉시킴으로써 전체적인 분석기간동안의 공정부하를 평준화시킨다.

이때, 평준화된 수위는 생산능력과 비교하여 작업지시된 부하량을 소화할 수 있는지 여부를 결정하는 중요한 변수가 된다. 일례로, 수위기준치가 1보다 작은 값일 경우에는 현재의 생산능력으로 부과된 모든 작업을 수행할 수 있음을 의미하며, 반대로 1보다 큰 경우에는 현 생산능력으로는 이 공정에 전달된 모든 작업을 수행하는데 어려움이 있음을 의미한다. 따라

서, 임의의 작업흐름이 $s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4$ 공정으로 정의된 경우라면, 먼저 각 공정마다 계산된 수위기준치중 가장 높은 수치를 해당 작업흐름의 누적부하/누적능력을로 정의할 수 있다. 이와 같은 방법에 의하여 산출된 수위기준치를 근거로 하여 해당 수위기준치가 가장 낮은 작업흐름을 선택하면, 공정의 병목현상을 최소화하는 결과를 가져온다.

한편, 다수의 작업흐름에 대하여 선호도가 존재하는 경우 이에 대한 가중치도 적용이 가능하다. 일례로 하나의 기관에 2개의 작업흐름이 존재하는 경우, 일상적으로는 작업흐름-1을 선택하나, 이로 인하여 특정 설비의 부하율이 높고, 다른 작업흐름에 의한 설비의 부하율이 낮은 경우 작업흐름-2를 활용한다면, 가중치를 활용하여 선호도에 따른 작업흐름을 결정할 수 있다. 따라서, 이상의 작업흐름 선택과정을 알고리즘으로 정리하면 다음과 같은 절차로 요약된다.

절 차 :

- 1) 초기 작업흐름을 선택한다.

만약, 작업흐름이 오직 하나만 존재하는 경우에는 Current Route에 해당 작업흐름번호를 기록한 후, 3)으로 간다.

그렇지 않으면,

초기치(Current 작업흐름, Current Load Rate 등)를 부여한 후, 2)를 진행한다.

2) 선택할 새로운 작업흐름이가 없을 때까지 다음 과정을 반복한다.

- ① 작업흐름에 정의된 각 공정마다의 최종작업종료시점(LFT)을 구한다.
 - ② 각공정의 Peak-time의 누적 부하/생산능력을 산출한다.
 - ③ 공정마다 산정된 최대부하/생산능력을 비교하여, 이들중 최대값을 해당 작업흐름의 부하율로 선택한다.
 - ④ 작업흐름의 부하율에 선호도의 가중치를 곱한 후 Current_Load_Rate와 비교한다.
- 만약, 새로운 작업흐름의 부하율이 Current Load_Rate보다 작다면, Current_Route를 새로운 작업흐름번호로 수정하고, 이때의 부하율을 Current_Load_Rate로 변경한다.

그렇지 않으면, 2)번으로 되돌아간다.

3) Current Route를 현 Work Order의 최적 작업흐름으로 결정한다.

그리고, 작업흐름에 의해 정의된 각 공정의

LFT를 산정한후, 공정마다의 부하량을 LFT를 기준으로 하여 부하Table에 산적시킨다.

4. 사례분석

본 절에서는 앞에서 제시한 작업흐름선택 기법에 대해 〈그림 6〉과 같이 모형화된 사례를 대상으로 하여 다음과 같은 작업흐름선정기준과 가정을 전제로 모의실험을 수행하였다. 먼저, 작업흐름선정 기준은 다음과 같다.

A) 기관에 대한 작업흐름경로가 사전에 하나로 설정되어 작업지시 발생시 경로가 고정되는 경우

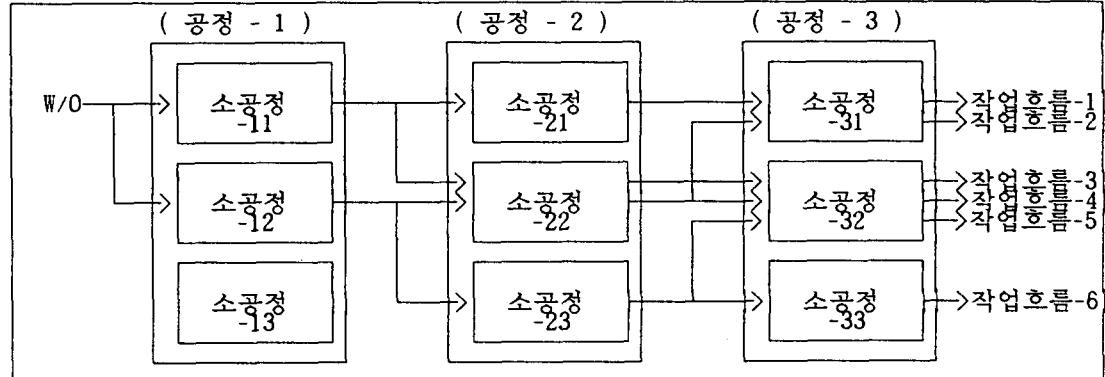
B) 기관에 대한 가능한 작업흐름경로중 작업지시 발생시 초기공정만의 부하율을 평가해서 초기공정이 최소의 부하율을 갖는 경로를 선택하는 경우

C) 기관에 대한 가능한 작업흐름경로중 작업지시 발생시 전체의 작업공정에 대한 부하율을 평가해 전공정의 부하율이 최소치로 평준화되는 경로를 선택하는 경우

기준 A)는 기업현장에서 과거에 사용했던 방법이며

기준 B)는 현재 사용중인 방법이고 기준 C)는 본 연구에서 제안한 방법으로서 상기의 기준에 의해

선정된 작업흐름경로는 다음의 표 1과 같다.



〈 그림 6〉 공정 구성도

한편, 모의시험을 위한 제반 전제조건은 다음과 같다.

- 1) 라인은 3개의 공정으로 구성되며 각 공정은 3 개의 소공정으로 편성된다.
- 2) 모든 작업지시는 상기의 3개 공정을 거쳐 작업이 완료된다.
- 3) 각 공정에서의 작업은 공정 내에 존재하는 소 공정 중 하나에서 작업이 수행된다.
- 4) 공정간 및 소공정간의 생산능력은 평준화되어 있다.

- 5) 작업지시의 작업흐름경로 개수는 최대 10개이다.
- 6) 각 작업지시의 각 공정별 작업부하는 동일하다.
- 7) 공정간 물류이동시간과 작업준비시간은 무시한다.
- 8) 공정 내 설비는 항상 가동이 가능한 상태이다.
- 9) 생산계획기간은 1주일, 단위기간은 1일이다.

이상의 전제조건을 근거로 300개의 작업지시를 대상으로 모의실험을 수행하였다. 시뮬레이션 과정에서 도출된 선택기준별 누적부하의 편차를 보면 (표

(표 1) 기준에 따라 선택된 작업흐름경로

W/O 번호	가능 작업흐름 경로수	가능 작업흐름 경로	하기 기준에 의해 선택된 작업흐름경로		
			A) 고정경로기준	B) 첫 공정부하	C) 전공정 부하
1	1	1 → 1 → 1	1 → 1 → 1	1 → 1 → 1	1 → 1 → 1
2	3	2 → 2 → 3 1 → 2 → 3 3 → 1 → 1	2 → 2 → 3	2 → 2 → 3	2 → 2 → 3
3	2	3 → 1 → 1 2 → 3 → 1	3 → 1 → 1	3 → 1 → 1	3 → 1 → 1
4	7	3 → 1 → 3 3 → 2 → 2 3 → 3 → 2 1 → 2 → 3 2 → 1 → 3 3 → 3 → 1 3 → 2 → 1	3 → 1 → 3	3 → 1 → 3	3 → 3 → 2
5	6	3 → 1 → 2 2 → 2 → 3 1 → 2 → 1 2 → 1 → 2 3 → 1 → 1 2 → 2 → 1	3 → 1 → 2	1 → 2 → 1	2 → 2 → 3
.
.
300	2	3 → 1 → 2 2 → 3 → 1	3 → 1 → 2	2 → 3 → 1	2 → 3 → 1

2)에서와 같이 기준 A)는 전 공정이 모두 약 200 MH이고 기준 B)는 초기공정은 12.36MH로 매우 낮으나 공정-2는 209.11, 공정-3은 189.35로 급속히 증가하며 기준 C)는 전 공정이 약 20MH로서 라인 전체가 안정되어 있음을 알 수 있다. 또한 (표 3)의 시뮬레이션의 결과를 보면 동일한 실 가동시간 중 Starvation 시간과 Blocking 시간의 합이 기준 A), B), C)별로 3174.10 MH, 2620.06 MH, 799.56 MH로

나타나 라인의 비가동시간이 기준 C)의 경우 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 결과 라인의 평균설비가동율은 73.91%, 77.43%에서 기준 C)의 경우 91.83으로 크게 향상되어 생산성 향상에 크게 기여함을 알 수 있다. 여기서 평균설비가동율은 설비의 총작업시간 대비 실 가동시간 비율로서 이론적인 최대가동율 1에서 Blocking 및 Stavation에 의해 발생되는 설비의 손실율을 뺀 값이다.

(표 2) 선택기준에 따른 부하분석 결과

작업흐름경로 선택기준	누적부하의 편차 (단위 : Man-Hour)			
	공정-1	공정-2	공정-3	Total
A) 작업흐름이 고정된 경우	220.94	193.17	208.54	622.65
B) 첫 공정의 부하자료 만을 평가한 경우	12.36	209.11	186.35	407.82
C) 전 공정의 부하를 평가한 경우	25.73	19.45	23.19	68.37

(표 3) 시뮬레이션 결과

구 분	제1공정	제2공정	제3공정	합 계
A) 작업흐름이 고정된 경우	Starvation 시간	-	836.66	1090.05
	Blocking 시간	1048.38	199.01	-
	실 가동 시간	2993.79	3022.99	2975.87
	총 작업 시간	4042.17	4058.66	4065.92
	*평균 설비 가동율	74.04%	74.47%	73.18%
B) 첫공정의 부하 만을 평가한 경우	Starvation 시간	-	651.65	917.53
	Blocking 시간	856.21	194.67	-
	실 가동 시간	2993.79	3022.99	2975.87
	총 작업 시간	3850.00	3869.31	3893.40
	평균 설비 가동율	77.74%	78.10%	76.41%
c) 전 공정의 부하를 평가한 경우	Starvation 시간	-	62.78	321.74
	Blocking 시간	238.00	177.04	-
	실 가동 시간	2993.79	3022.99	2975.87
	총 작업 시간	3231.79	3262.81	3297.61
	평균 설비 가능율	92.63%	92.64%	90.23%

* 평균 설비 가능율 = 설비의 실가동 시간 / 설비의 총 작업 시간

(단위 : MH)

$$= 1 - (\text{Blocking율} + \text{Starvation율})$$

분석된 결과에 의하면, 단일공정의 부하만을 고려 한 작업흐름을 선택한 경우, 순수한 가동율은 작업지시개수가 150개에 이르러 95%에 수렴하고 있으며, 전공정의 부하를 고려한 작업흐름을 선택한 경우에는 110개의 작업지시수에 이르러 가동율이 99%에 수렴하고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 본 모델에 의한 작업흐름선택방법이 기존의 단일공정만을 고려한 작업흐름선택방법에 비하여 약 5%정도의 설비가동율을 증가시킬 수 있었다.

한편, 위의 결과에 대하여 대공정수, 소공정수, 최대작업흐름의 개수를 변화시켜 시뮬레이션을 수행한 결과 표 4에서 보듯이 다음과 같은 결과를 도출하게 되었다.

첫째, 작업지시가 선택할 수 있는 작업흐름개수가 증가하는 경우 가동율은 점진적으로 증가한다. 즉, 제품에 대해 고정된 작업흐름에 의한 작업보다는

다수의 작업흐름을 지녀 제품의 유연성을 증가시키는 경우 공정간의 부하 평준화로 인한 설비의 가동율을 증가시킬 수 있었다.

둘째, 대공정수를 증가하면 할수록, 가동율은 점차로 감소한다. 즉, 소공정수를 고정시킨 후, 대공정수를 1개부터 10개까지 증가시켜 모의실험을 수행한 결과, 생산공정의 불균형으로 Blocking과 Starvation이 증가되어 설비의 가동율은 감소되었다.

셋째, 소공정수의 변화는 공정간의 부하불균형과는 무관하다. 즉, 대공정수를 고정시킨 후 소공정수를 1개로부터 10까지 증가시킨 결과 가동율은 특정한 추이를 발견할 수 없었다. 그러나, 소공정이 1개인 경우에는 작업흐름이 고정되므로 두 방법 모두에서 가동율이 100%에 이르렀으나, 그 이후에는 특정한 흐름으로 감소하거나, 증가함이 없이 발생되는 작업지시의 조건에 따라 가동율이 변화되었다.

(표 4) 변수변화추이에 따른 설비가동율 도표

Nr _w 를 변화시키는 경우 (N _p =3, N _s =3, N _w =150)			N _p 를 변화시키는 경우 (N _s =3, Nr _w =10, N _w =300)			N _s 를 변화시키는 경우 (N _p =3, Nr _w =10, N _w =300)		
Nr _w	첫공정	전공정	N _p	첫공정	전공정	N _s	첫공정	전공정
1	0.92	0.92	1	1.00	1.00	1	1.00	1.00
2	0.92	0.96	2	0.96	1.00	2	0.98	0.99
3	0.93	0.97	3	0.95	0.99	3	0.95	0.99
4	0.93	0.98	4	0.95	0.99	4	0.97	0.98
5	0.93	0.98	5	0.95	0.99	5	0.94	0.97
6	0.94	0.98	6	0.94	0.99	6	0.98	0.98
7	0.94	0.98	7	0.94	0.98	7	0.99	0.99
8	0.94	0.99	8	0.94	0.98	8	0.94	0.99
9	0.95	0.99	9	0.94	0.98	9	0.98	0.99
10	0.95	0.99	10	0.93	0.98	10	0.95	0.98

5. 결 론

유연생산라인에서는 일련의 순서열을 갖는 여러 개의 공정을 거쳐 제품이 완성된다. 따라서 연속되는 공정간에서 부하의 불균형이 발생할 경우 특정 공정에서 병목현상이 발생하게 되며 이는 라인의 생산성 저하의 주요요인이 되며 심지어는 라인의 중단이 야기된다. 유연생산라인의 경우 단일 제품을 생산하는 대량생산라인과 달리, 정해져 있는 특정 공정에서 항상 병목현상이 발생하는 것이 아니고 생산에 투입되는 제품의 종류에 따라 그 공정이 변하게 된다. 이와 같은 현상을 해결하기 위해 작업흐름을 최적화하는 연구가 수행되고 있다.

그러나 수학적 개념의 모델을 활용하여 작업흐름을 최적화하는 경우 실제 현장의 수 많은 변수와 생산시스템의 복잡성으로 인하여 현실적으로 활용 가능한 적절한 해를 구하는 데 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 작업선택을 위한 우선순위규칙과 작업부하율을 활용한 Min-Max개념을 활용한 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서는 유연생산시스템의 대표적인 예인 인쇄회로기판 자동삽입라인을 대상으로 각 공정간의 부하 평준화를 유지시키는 최적의 작업흐름을 결정하는 알고리즘을 개발하였으며, 이를 사례분석을 통해 적용하였다. 사례 적용 결과에 의하면 라인전체의 생산성은 단일 공정의 부하분석에 의존하기보다는 라인전체의 부하를 평준화시키는 측면에서 접근하여야 한다는 결론이 도출되었다. 그리고 제품의 유연성측면에서 고정된 작업흐름 보다는 다수의 작업흐름을 가짐으로써 라인 내 공정간의 부하 불균형을 해소할 수 있다. 특히, 라인의 공정수가 많아 생산시스템이 복잡해질수록 공정간의 부하 불균형의 수준이 높아지므로 작업흐름의 선택을 위한 의사결정은 더욱 중요한 역할을 담당하게 된다.

생산현장에서 발생하는 긴급주문에 따른 새로운 생산지시가 수시로 불규칙하게 발생되는 현실을 감안할 때, 기존의 수학적인 모델링에 의한 정적인 방법으로는 해결이 불가능한 문제를 본 논문에서는 누적된 부하표를 활용하여 신규로 발생하는 작업지시에 대한 작업흐름을 단시간내 수립하여 이를 생산현장에서 활용 가능하게 하기 때문에 실시간의 개념이 중시되는 최근의 생산시스템 개념에도 부합된다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- BENGÜ, G., "A simulation-based scheduler for flexible flowlines", *International Journal of Production Research*, Vol.32, (1994), 321-344.
- CARMON, T. F., MAIMON, O. Z., and DAR-EL, E. M., "Group set-up for printed circuit board assembly", *International Journal of Production Research*, Vol.34, (1989), 1795-1810.
- DEANE, R. H., and MOON, S. H., "Work flow control in the flexible flow line", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol.4, (1992), 217-235.
- DESSOUKY, M. M., ADIGA, S., and PARK, K., "Design and scheduling of flexible assembly lines for printed circuit boards", *International Journal of Production Research*, Vol.33, (1995), 757-775.
- HILLIER, F. S., and LIEBERMAN, G. J., *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill, New York, 1990.
- JOHRI, P. K., "Engineering a circuit board assembly line for a desired capacity and Flowtime", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.10, (1991), 492-500.

- KOCHHAR, S., and MORRIS, R. J. T., "Heuristic methods for flexible flow line scheduling", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.6, (1987), 299-314.
- LOFGREN, C. B., MCGINNIS, L. F., and TOVEY, C. A., "Routing printed circuit cards through an assembly cell", *Operations Research*, Vol.39, (1991), 992-1004.
- MAIMON, O., and SHTUB, A., "Grouping methods for printed circuit board assembly", *International Journal of Production Research*, Vol.29, (1991), 1379-1390.
- RABIN, S., and NAGEL, R. N., "Constraint-based control of flexible flow lines", *International Journal of Production Research*, Vol.29, (1991), 1941-1951.
- WITTROCK, R. J., "An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines", *Operations Research*, Vol. 36, (1988), 445-453.