

공구이송이 가능한 유연제조시스템에서의 공구 할당 및 스케줄링을 위한 발견적 기법

A Heuristic Algorithm for Tool Loading and Scheduling in a Flexible
Manufacturing System with an Automatic Tool Transporter

박상실*, 김영대**

Sang-Sil Park*, Yeong-Dae Kim**

Abstract

We consider problems of tool loading and scheduling in a flexible manufacturing system (FMS) in which tool transportation constitutes the major portion of material flows. In this type of FMSs, parts are initially assigned to machines and released to the machines according to input sequencing rules. Operations for the parts released to the machines are performed by tools initially loaded onto the machines or provided by an automatic tool transport robot when needed. For an efficient operation of such systems, therefore, we may have to consider loading and scheduling problems for tools in addition to those for parts. In this paper, we consider three problems, part loading, tool loading, and tool scheduling problems with the overall objective of minimizing the makespan. The part loading problem is solved by a method similar to that for the bin packing problem and then a heuristic based on the frequency of tool usage is applied for tool loading. Also suggested are part input sequencing and tool scheduling rules. To show the effectiveness of the overall algorithm suggested here, we compare it with an existing algorithm through a series of computational tests on randomly generated test problems.

* 현대정공주식회사 공작기계기술부

** 한국과학기술원 산업공학과

1. 서론

이 논문에서는 자동화된 공구이송장치가 있는 유연제조시스템(flexible manufacturing system; FMS)의 운용 문제를 다루고자 한다. 일반적으로 유연제조시스템은 여러 대의 기계(machining center)와 자동화된 자재취급시스템(material handling system), 그리고 전체 시스템을 총괄하는 컴퓨터 네트워크 등으로 구성되는 다품종 중소량생산에 적합한 자동화된 제조시스템을 말한다. 이러한 유연제조시스템은 물류의 주 대상이 가공품(part)인가 공구(tool)인가에 따라 크게 두가지 형태로 구분될 수 있다.

먼저, 물류의 주 대상이 가공품인 경우는 각 기계에서 행할 작업들이 정해져 이를 위해 필요한 공구들이 미리 기계에 장착되고, 가공품을 필요한 기계로 이동시켜 가면서 가공을 하는 형태의 시스템이다. 초기에 구축된 유연제조시스템은 대부분 이러한 형태를 띠고 있는데, 이들 시스템의 가장 큰 제약으로 각 기계에 장착할 공구의 수에 한계가 있다는 것과 필요한 공구의 자동이송이 불가능하다는 점이다. 이 제약이 시스템의 가동을 위한 셋업을 필요하게 하는 이유 중의 하나이며, 시스템의 유연성을 떨어뜨리는 주 원인이다 [20]. 따라서, 유연제조시스템의 운영에 관련되는 문제로는 시스템준비(system setup)와 스케줄링 및 통제 등이 있으며, 각 문제에 대하여 많은 연구들이 수행되어 왔다. 여기서, 시스템준비문제란 한번의 셋업으로 가공할 가공품 집합을 결정하는 것과 선택된 가공품의 가공을 위한 작업(공정; operation) 들과 이를 위한 공구들을 각 기계에 할당하

는 것 등을 말한다. 그리고 스케줄링은 이 준비문제의 결과를 이용하여 수행되게 된다.

반면, 공구의 이송이 물류의 대부분을 이루는 경우는 각 기계에서 가공될 가공품이 이를 위한 모든 작업이 완료될 때까지 그 기계에서 처리된다. 만약 필요한 공구가 그 기계에 장착되어 있지 않을 시는 공구저장소(tool crib) 또는 다른 기계에서 가져 오게 된다. 이와 운반 장치로는 Mazak사에서 사용하는 공구이송 로봇트(servo motor-driven vehicle)와 Kearney & Tracker 공장의 무인운반차(automated guided vehicle), 그리고 Hitachi Seiki의 갠트리 로봇트(overhead gantry robot) 등을 들 수 있다 [20]. 즉, 공구가 필요할 시 즉시 공급할 수 있게 하여 공구에 관련된 제약을 하드웨어적으로 크게 줄일 수 있게 되었다. 이러한 시스템에서의 공구의 흐름은 여러 요인, 즉 공구이송 시스템의 능력, 각 기계의 공구 장착대 크기, 가공품의 공구 필요 정도에 영향을 받게 된다 [35].

이러한 형태의 유연제조시스템이 가지는 장점으로서는 사용되는 총 공구의 수가 전자의 유연제조시스템의 경우보다 일반적으로 적다는 것과 [5, 9, 38], 하나의 가공품이 한 기계에서만 가공되므로 가공품의 repositioning이 필요 없어 보다 정밀한 가공을 할 수 있다는 것 [13], 마모나 파손된 공구의 즉각적인 교체가 가능하므로 무인화가 더 용이해진다는 [34] 장점들이 있다. 반면에, 이러한 유연제조시스템은 각 기계에서 공구를 필요로 할 때 이용할 수 있게, 발전된 형태의 공구관리 시스템을 필요로 한다 [20]. 공구관리 시스템은 공구이송 시스템과 연계하여 공구정보관리, 공구할당, 공구흐름관리 (tool

flow control), 공구인식 (tool identification), 실시간 공구모니터링 (tool monitoring), 공구 이상점검 (tool breakage detection), 공구초기 장착 (tool presetting) 등을 포함하며, 근래에 와서는 공구에 관련된 스케줄링이 중요한 문제로 부각되게 되었다 [11, 35]. 공구 스케줄링(tool scheduling)의 목적은 가공품의 흐름과 공구의 흐름을 일치시켜 공구로 인해서 가공품의 가공이 지연되는 것을 최소화 하는데 있다 [21]. 이러한 공구관리 시스템은 유연제조시스템의 높은 효율을 유지하기 위해서도 필수적인 요소이며 공구 관련 비용의 감소, 공구재고의 감소, 가공품의 품질향상에도 기여하게 된다 [12].

효율적인 공구관리를 위한 공구의 운용과 관련된 문제를 정리해보면 크게 공구준비문제 (tool provisioning problem), 공구정보관리문제 (tool information management problem), 공구할당문제 (tool loading problem), 공구스케줄링문제로 나눌수 있다. 공구준비문제란 주어진 생산계획 하에서 공구의 필요량을 결정하는 문제인데, 필요한 공구의 수가 많은 경우 중요한 문제로 부각된다. 지금까지 공구관련 문제에 대해서 많은 연구가 수행되어 왔지만 공구소요계획(tool requirement planning)에 대해서는 다소 소홀히 다루어져 왔다. 일반적으로 정밀가공을 하는 유연제조시스템에서 한 공정에 필요한 공구의 수는 평균 15개 정도이고, 공구수명에 따라서 복제공구(copy tool)가 필요하게 되어 시스템 내에서 필요한 공구 수가 수백에서 수천개에 이르게 된다 [7, 10, 38]. 이 문제에 대하여 Graver and McGinnis [10]는 정적인 상황과 동적인 상황하에서 접근방법을 제시하고, 이

를 비교 분석하여 동적인 상황 하에서의 접근이 필요함을 강조하였다. Wang *et al.* [37]은 공구관련 비용을 최소화 하면서 시스템 내에 유지해야 할 복제공구의 갯수를 구하는 문제를 다루었다. 다음으로, 공구정보관리문제는 공구형태, 공구수명, 공구위치, 절삭조건 등의 공구에 관련된 정보와 공구의 물류를 관리하는 문제를 말한다. 이 두 문제(준비문제, 정보관리문제)는 앞에서 설명한 두 가지 형태의 유연제조시스템에 공통적으로 발생하는 문제이며, 유연제조시스템을 효율적으로 운영하기 위해서는 이 두 문제의 해결이 필수적이다.

공구할당문제란 “각 기계에 어떤 공구를 할당하여 가공을 수행할 것인가”를 결정하는 문제를 말한다. 이 문제 역시 위의 두 가지 유연제조시스템에 공통적인 문제가 되나, 특히 전자의 유연제조시스템에서 시스템준비문제 중 가공품 및 공구할당 문제와 깊은 관련이 있다. 이 문제에 대해서는 Stecke and Solberg [32] 이후로 많은 연구가 수행되어 왔으며, 다양한 목적함수 하에 많은 문제해결 방법들이 제시되어 왔다 [1, 15, 16, 17, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 36]. 특히, Stecke [29]은 실제 유연제조시스템의 준비문제에서 공구할당(tooling)이 중요함을 강조하였으며, Carrie and Perera [2]는 공구할당이 스케줄링에 많은 영향을 준다는 것을 시뮬레이션을 통하여 보여 주었다. 또한, de Werra and Widmer [6]는 공구관리를 포함하는 준비문제를 선형정수계획모형(integer linear programming model)으로 모형화 하였으며, Leung *et al.* [19]은 가공품 및 공구할당에 물류시스템을 고려하였고, Chen and Chung [4]은 준비문제에서

복제공구 수가 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 이 공구할당문제도 역시 후자 형태의 유연제조시스템에서도 발생하게 되는데 그 이유는 각 기계들이 일정 크기 만큼의 공구장착대(tool magazine)를 갖추고 있으므로 초기에 공구를 각 기계에 할당해야 하기 때문이다. 물론 그 외에 필요한 공구들은 공구이송 로봇을 통하여 자동으로 공급되게 된다.

공구스케줄링문제는 전자의 유연제조시스템에서는 발생하지 않는, 본 논문의 연구 대상이 되는 후자의 유연제조시스템에서 특히 중요한 새로운 형태의 문제이다. 이 문제에 대하여 ElMaraghy [7]는 자동공구관리에 대한 전반적인 설명과 자동 공구이송 시스템을 평가하기 위한 시뮬레이션 설계에 대하여 연구하였고, Perera and Carrie [24]는 데이터베이스 관리 시스템에 시뮬레이터를 연결하여 공구의 이용율, 공구의 재고관리, 공구스케줄링, 공구의 청구(tool requisition) 등을 하는 절차를 제시하였다. 그리고, Han *et al.* [13]은 각 기계와 전체 공구저장소 사이의 공구이동량을 최소화 하는 공구할당에 대한 비선형수리계획모형과 실시간 공구 통제를 위한 정책을 제시하고 시뮬레이션을 이용하여 그 정책들을 분석하였다.

본 연구에서는 공구의 이동이 가능한 유연제조시스템에서의 가공품 및 공구의 할당 문제와 스케줄링 문제를 다루고자 한다. 이 문제의 목적함수로는 최종완료시점(makespan)의 최소화, 공구 이동량(tool movement)의 최소화, 작업부하의 균형(workload balancing) 등이 될수 있으나, 본 연구에서는 최종완료시점의 최소화에 초점을 맞추도록 한다. 이

기준(measure)은 각 기계 및 전체 시스템의 사용도(utilization)와 직접적인 관련이 있으며, 특히 시스템의 생산율, 즉 생산능력과도 깊은 관련이 있는 기준이라고 알려져 있다.

본 연구에서는 일간 생산계획이 주어졌다는 상황이 다루어 진다. 이 유연제조시스템에서는 가공품의 기계 간 이동이 없으므로, 하루동안 생산해야 할 가공품을 그룹으로 나누어서 각각의 기계에 할당하고, 각 가공품 그룹에 필요한 공구의 일부를 각 기계의 공구장착대에 초기로 할당하는 방법을 개발하고자 한다. 이것이 가공품 할당과 공구의 할당이 되며, 스케줄링 문제와는 별도로 먼저 다루어 지는 문제로 볼 수 있다. 가공품 및 공구할당문제에 대해서는 Chung [3], Han *et al.* [13], Hankins and Rovito [14], Kusiak [17], Kwasi *et al.* [18], Tomek [33] 등이 부분적으로 다루었다. 그러나, 가공품 및 공구스케줄링의 효과는 할당 결과에서 영향을 받게되며, 스케줄링 방법의 효율도 역시 할당 방법에 따라 다르게 나타날 수 있다. 따라서, 이들 간의 상호연관성을 염두에 두고 이러한 방법들을 개발 비교평가하여야 한다. 본 연구에서는 가공품 및 공구 할당과 더불어, 각 기계에 할당된 가공품의 가공순서를 결정하고, 필요한 공구가 공구 장착대에 없을 경우 어떻게 필요한 공구를 가져올 것인가와 사용한 공구를 어떻게 처리할 것인가에 대한 운용 방법 즉 가공품 및 공구 스케줄링 방법도 함께 개발하고자 한다.

본 연구에서는 가공품할당은 bin packing문제의 해법으로 사용되는 MULTIFIT형태의 알고리즘의 개념을 적용하고, 공구할당은 공구의 사용빈도에 따라 공구장착대나 공구저

장소에 할당한다. 또한, 공구의 사용빈도에 따른 새로운 실시간 공구운반정책을 제시하여, 공구이송 시스템의 능력과 실시간 운용시 추가 장착하게 될 공구를 위해 비워두는 공구장착대에서의 여유분의 공간의 크기(여분의 slot 수)가 최종완료시점에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

본 연구에서는 이러한 기법을 두가지 단계로 나누어 분석 평가하는데, 첫번째 단계에서는 가공품 및 공구 할당 문제에 대한 초기해를 구한다. 즉, 각 기계에 할당될 가공품 집합을 결정하고 각 기계마다 필요한 공구의 종류와 복제공구의 수를 개략적으로 결정하며, 각각의 기계에 처음 할당할 공구를 결정한다. 두번째 단계에서는 각 기계에 할당된 가공품 집합에 대해 가공품의 가공순서(input sequence)와 공구스케줄링의 여러 방법을 시뮬레이션을 통하여 분석을 하여 앞으로 제시할 가공품과 공구 스케줄링을 위한 여러 방법들의 조합 중 가장 적합한 것을 제시하고자 한다.

2. 대상시스템 및 가정

이 절에서는 본 연구에서 고려하는 공구이송이 가능한 유연제조시스템과 이 시스템의 기본적인 운영 방법 및 이 연구를 위해 설정한 가정들을 설명하고자 한다. 우선 이 시스템을 그림으로 그려보면 그림 1과 같다. 즉, 이 유연제조시스템은 제한된 크기의 공구장착대를 가진 여러대의 기계(machining center)와, 기계와 공구저장소 사이의 공구이송을 담당하는 공구이송 로봇(tool transport robot), 시스템내의 공구의 정보와 물류를 관리하는

공구관리시스템, 물류처리기기(material handling device) 및 이들을 통제하는 컴퓨터 네트워크로 구성된다. 이 시스템에서는, 어느 기계에서 한 작업(operation)이 끝나고 다음 작업을 시작하려고 할때, 필요한 공구가 공구장착대에 있으면 바로 다음 작업을 수행하고, 공구가 다른 기계나 공구저장소에 있을 때에는 그 공구의 위치를 찾아서 공구이송 로봇을 통하여 이송하게 된다. 필요한 공구가 사용 중이거나 공구이송 로봇에 의해 운반 중일 때는 작업이 지연된다.

본 연구에서 설정하고 있는 가정은 다음과 같다.

- 1) 모든 기계(machining center)는 기능상 동일하며, 필요한 공구만 공급되면 생산계획된 가공품의 어떠한 작업(operation)도 수행할 수 있다.
- 2) 각 기계의 공구장착대는 제한된 용량을 갖는다.
- 3) 각 공구는 공구장착대에서 동일한 크기의 공간(한개의 slot)을 필요로 한다.
- 4) 가공품은 여러개의 공구를 필요로 하는데 바로 다음 작업을 위해 필요한 공구만 있으면 즉시 작업을 시작한다.
- 5) 가공품 간에는 선후관계(precedence relationship)가 없다.
- 6) 두개 이상의 동일한 공구 즉 복제품이 있을수 있으나, 그 복제공구의 수는 제한되어 있다.

3. 발견적 기법

본 연구에서 제시하는 발견적 기법에는 가공품할당, 공구할당, 가공품스케줄링, 공구스

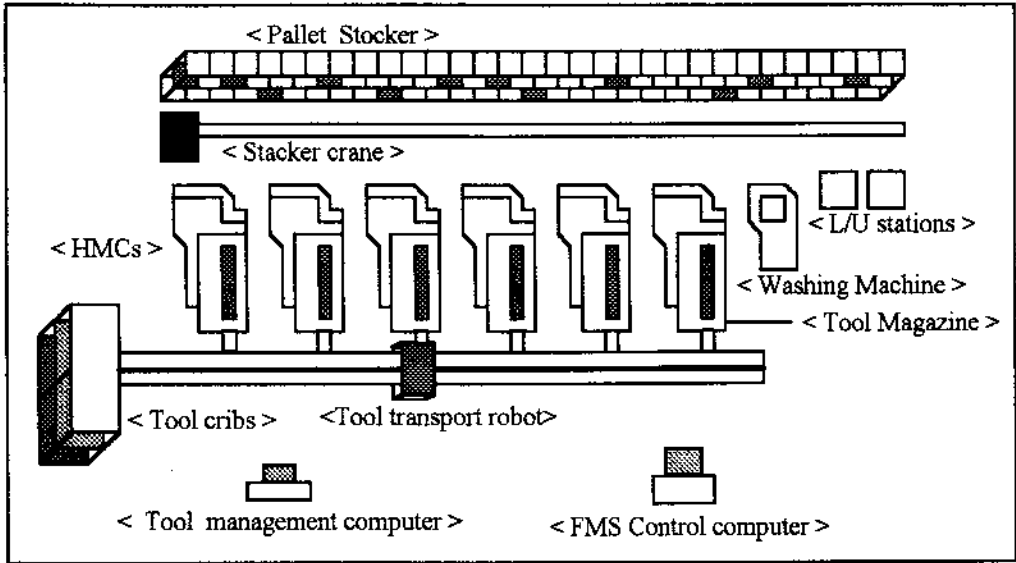


그림 1. 공구이송이 가능한 유연제조시스템

케줄링의 네가지 방법들이 포함되어 있다. 이 절에서는 이들 방법들을 각각 구체적으로 설명하기로 한다.

3.1. 가공품 할당 (Part allocation)

가공품 할당은 bin packing 문제의 first-fit-decreasing (FFD) 규칙을 채용하는 MULTIFIT 형태의 알고리즘을 사용한다. Bin packing 문제란 크기가 다른 물건(item)들을 상자(bin)에 집어 넣는 문제이며, 흔히 bin의 크기가 주어져 있을 때에는 모든 item을 다 집어 넣을수 있는 최소한의 bin의 수를, bin의 수가 주어져 있을 시는 bin의 최소 크기를 구하는 것을 목표로 한다. 가공품할당문제에서의 가공품을 그 크기가 그 가공품의 가공시간으로 나타나는 item으로 보고, 기계를 bin으로 가정하면, bin의 최소 크기는 주어진 가공품들의 가공을 완료하는 최종완료시점이

된다. MULTIFIT 형태의 알고리즘은 bin의 크기를 늘이거나 줄여가며, 이때의 bin들에 item들을 할당해 보아 해가 얻어지는지를 검토하여 bin의 최소 크기를 구하는 일종의 이분탐색(binary search)법을 이용한다. 여기서, 주어진 크기의 bin에 item을 할당하는 방법으로는 FFD 규칙을 사용하는데, 이것은 item(가공품)을 크기(가공시간)가 큰 순서로 분류하고, 그 순서대로, item을 할당할수 있는 첫번째 bin, 즉 각 bin에 번호를 매겼을때 번호가 낮은 bin에 할당하는 방법이다.

이 알고리즘을 간단히 정리해 보면 다음과 같다. 여기서 B 는 정확하게 균형된(balanced) 기계별 작업부하(workload), 즉 전체 가공품을 위한 작업량을 총 기계 수로 나눈 값이라고 정의한다. 또 α 는 부하불균형계수(workload imbalance factor)로서, bin의 크기는 B 에 $(1 + \alpha)$ 를 곱한 값으로 정하여 item을 할

당해 나간다. 즉, 모든 item의 할당이 가능하게 하는 α 의 최소값을 구하는 것이 이 알고리즘의 목적이다.

알고리즘 1. (가공품할당)

Step 1. 가공품들을 가공시간이 큰 것에서부터 작은 것의 순서대로 나열하고, 기계에 임의로 일련 번호를 매긴다. $L \leftarrow -0.00001$, $U \leftarrow 0.4$ 로 초기화한다.

Step 2. 각각의 bin의 크기를 부하불균형계수 $\alpha = (U+L)/2$ 로 조정한다.

Step 3. 주어진 bin의 크기에 대하여, 현재까지 할당이 되지 않은 가공품 중 가공시간이 가장 큰 것을 선택하여, 할당이 가능한 기계들 중 일련 번호가 가장 작은 기계에 할당한다. 이를 모든 가공품의 할당이 완료되거나 할당이 더 이상 불가능해질 때까지 계속한다. 만약 할당이 가능했다면 $U \leftarrow \alpha$, 불가능했다면 $L \leftarrow \alpha$ 로 한다.

Step 4. 만약 U 와 L 이 충분히 가까운 숫자이면, 이때의 U 의 값을 부하불균형계수의 값으로 가졌던 문제의 해를 최종해로 취하고 끝낸다. 그렇지 않을 경우는 Step 2로 되돌아간다.

그런데, MULTIFIT 알고리즘에 대한 연구에서 Step 3이 7회 정도 반복되면 충분히 좋은 해를 얻을 수 있다고 밝히고 있으므로, 종료조건을 위의 Step 4에서와는 달리 반복회수로 주어도 무방하다. 또한, Step 1에서의 U 의 초기치로는 Friesen [8]이 증명한 바 있는 MULTIFIT 알고리즘의 최악의 성능비 (worst case performance ratio), $1.2 + (1/2)^k$ 의 (여기서 k 는 반복회수를 나타냄) 두배 정도

되는 값을 사용하였다. 이 최악의 성능비는 최적해에서 얼마까지 나쁜 해가 주어질 것인가를 나타낸 값이므로 부하불균형계수가 0.4일 경우에도 할당이 가능하지 못할 가능성이 있다. 따라서, 보다 정확하게 알고리즘을 정리하려면, U 의 초기치에 대해 할당을 시도하여 보아 불가능하면 초기치를 증가시켜야 한다는 것을 Step 1에 포함시켜야 하나, 여기서는 알고리즘을 간단하고 알기 쉽게 정리하고자 이 부분을 생략하였음을 밝혀 둔다.

3.2. 공구 할당 (Tool allocation)

본 연구에서 제안되는 공구할당 방법에서는, 각 기계에 할당된 가공품들을 가공하는데 필요한 공구들을 공구의 사용빈도에 따라 사용빈도가 높은 공구들은 각 기계의 공구장착대에 할당하고 사용빈도가 낮은 공구는 공구저장소에 할당하는 정책을 사용한다. 또한, 각 공구장착대에 여유공간(slack slots)을 미리 할당하여, 공구를 타 기계에서나 공구저장소에서 가져와 사용하고자 할때, 그러한 공구를 장착하기 용이하게 한다. 이 여유공간이 시스템의 운용에 영향을 미칠 가능성이 높으므로, 여기서는 여러 수준, 즉 공구장착대의 전체 공간(slots)의 수의 0%, 5%, 10%, 15%의 네가지 수준의 여유공간에 대해 실험을 하여 최종완료시점에 미치는 영향을 분석하기로 한다.

공구할당을 위한 알고리즘을 제안하기 위해 우선 몇가지 용어를 아래와 같이 정의한다.

T 전체 공구(종류)들의 집합

M 전체 기계들의 집합

K 각 기계의 공구장착대의 용량

f_m 기계 m 에 할당되었으며, 공구 t 를 사용하는 가공품의 수
 C_t 공구 t 의 복제공구 (tool copy) 수
 c_t 공구 t 의 복제공구 중 현 시점까지 할당이 된 공구의 수
 n_m 기계 m 에 현 시점까지 할당된 공구의 수
 L_T 현 시점에 아직 할당이 되지 않고 남아 있는 공구(종류)들의 집합
 L_M 현 시점에 아직 공구가 할당될수 있는 빈 공간이 남아 있는 기계들의 집합
 이 용어를 사용하여 공구할당 알고리즘을 정리하면 다음과 같다. 여기서의 공구장착대의 용량(K)은 공구장착대의 여유공간을 제외한, 공구 할당 시 사용이 가능한 공간(tool slot) 만을 말한다.

알고리즘 2. (공구할당)

Step 1. (초기화)

$$c_t \leftarrow 0, n_m \leftarrow 0, L_T \leftarrow T, L_M \leftarrow M.$$

Step 2. (각 기계에 공구 할당)

$m \in L_M, t \in L_T$ 인 (m, t) 중 f_m 의 값을 최대로 하는 쌍, (m', t') 을 찾는다.

기계 m' 에 공구 t' 을 할당한다.

$$c_{t'} \leftarrow c_{t'} + 1, n_{m'} \leftarrow n_{m'} + 1 \text{ 로 변경.}$$

Step 3. (종료조건 검토)

만약 $c_{t'} = C_{t'}$ 이면, $L_T \leftarrow L_T - \{t'\}$.

만약 $n_{m'} = K$ 이면, $L_M \leftarrow L_M - \{m'\}$.

만약 $L_T = \emptyset$ or $L_M = \emptyset$ 이면 Step 4로, 아니면 Step 2로.

Step 4. (공구저장소에 공구 할당)

아직 할당이 되지 않은 공구들을 공구저장소에 할당하고 알고리즘 종료.

3.3. 가공품 스케줄링

유연제조시스템의 가공품 스케줄링과 관련된 여러 규칙들은 Montazeri and Van Wassenhove [22]가 자세히 언급하고 있으나, 본 연구에서 고려하는 유연제조시스템에서는 가공품이 한번 기계에 장착되면 이를 위한 모든 작업이 완료될 때까지 탈착되지 않기 때문에 가공품의 투입순서를 정하는 문제를 해결하면 된다. 그러나, 이 투입순서 결정 문제에서는 작업을 수행하기 위한 공구이송을 고려하여야 할 필요성이 없지 않다. 즉, 공구로 인한 작업지연을 최소화하게 가공품을 투입시키는 것이 필요하다. 이 문제의 최적해를 적당한 시간 내에 구하기는 어려우므로, 여기서는 다음 네가지의 비교적 간단한 규칙을 제안하여 그 성능을 평가해 보고자 한다. 이 규칙들에서는, 어떤 기계에서 가공 중인 가공품이 완료되는 시점에 그 기계에 할당된 아직 가공되지 않은 가공품들 중 다음의 조건을 만족하는 가공품을 투입한다.

- 1) LPT (Longest Processing Time) : 가장 긴 가공시간을 갖는 가공품
- 2) SPT (Shortest Processing Time) : 가장 짧은 가공시간을 갖는 가공품
- 3) LTT (Least Tool Transfer) : 현재 각 기계에 할당된 공구로 보아서, 앞으로 다른 기계로 부터 공구를 가장 적게 빌려올 가공품
- 4) RAN (Random) : 무작위로 선택

3.4. 공구 스케줄링

가공품을 가공하는 중 작업을 위해 필요한 공구가 없을 경우 다른 기계나 공구저장소에

서 공구를 빌려오게 되는데, 공구스케줄링은 실시간으로 공구를 빌려오거나 빌려온 공구를 사용후 처리하는 것을 말한다. 각 기계에서 공구를 빌려올 때 공구장착대에 빈 공간(empty slots)이 없을 경우에는 현 시점에서 사용이 안되는 공구는 다른 여분의 장소, 즉 공구저장소로 옮기고, 공구장착대의 빈 공간을 확보한 다음에 필요한 공구를 빌려오게 된다. Han *et al.* [13]은 공구 스케줄링의 방법으로 빌려온 공구를 사용 즉시 본래의 위치로 되돌려 주는 정책과, 빌려온 공구를 다른 기계에서 필요로 할 때까지 가지고 있는 정책을 제시하고 이 정책들에 대한 시뮬레이션 분석을 하였다.

본 연구에서는 이 두가지 정책(아래에서 주어진 ITR과 NTR)과 사용빈도에 따라 공구할당문제에서 각 기계와 공구저장소에 할당된 공구들에 대해 각각 다른 규칙을 적용하는 새로운 정책(PTR)을 제시하여 그 성능을 분석한다. 이 세가지 정책을 간단히 설명하면 다음과 같다.

- 1) ITR (immediate tool return policy): 빌려온 공구를 사용한 후 즉시 본래의 위치로 되돌려 보낸다.
- 2) NTR (no tool return policy): 빌려온 공구를 다른 기계에서 필요로 할 때까지 가지고 있으며, 다음 빌려올 공구를 위해 공구장착대의 빈 공간이 없으면 현 시점에서 사용되지 않는 공구는 공구저장소(tool crib)로 이송하여 다른 기계에서 필요로 할 때까지 보관한다.
- 3) PTR (partial tool return policy): 다른 기계에서 빌려온 공구는 사용한 후 다

른 기계에서 필요로 할 때까지 가지고 있다. 그러나, 앞으로 빌려올 공구를 위해 빈 공간을 확보해야 할 필요가 있을 때에는, 현 시점에서 사용되지 않는 공구에 대해, 추후 그 공구를 사용할 빈도가 높은 기계 순으로 빈 공간이 있는 기계로 보내고, 빈 공간이 있는 기계가 없을 때에는 공구저장소로 이송한다. 반면에, 공구저장소에 위치한 공구들을 빌려온 경우는, 사용한 후 다음 빌려올 공구들을 위한 공간을 확보하기 위해서, 공구저장소로 되돌려 보낸다. 이는 공구할당이 공구사용빈도에 따라 이루어졌으므로 공구저장소에 할당된 공구들은 각 기계에 할당되어 있는 공구들보다 상대적으로 사용빈도가 낮기 때문이다.

4. 시뮬레이션 실험

여기서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 가공품과 공구의 할당 및 스케줄링 방법, 공구 할당 시 고려하는 공구장착대의 여유공간의 크기가 유연제조시스템의 최종완료시점에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이 실험에서 모사되는 시스템에서는 [그림 1]에서와 같이 공구이송 시스템이 직선으로 된 overhead track 형태의 양방향으로 움직일수 있는 공구이송 로봇이며, 가공품이송 시스템과는 별도로 움직인다. 이 시스템에서는, 바로 인접한 기계 간의 거리는 동일하며 첫번째 기계와 공구저장소 간의 거리는 기계 간 거리의 두 배이다.

이 시스템의 시뮬레이션 모형에서는, 각 기

계에서 가공 중인 작업을 끝내고 다음 작업을 시작하려 할 때 필요한 공구의 위치를 찾게 된다. 이때, 필요한 공구가 각 기계의 공구장착대에 있으면 다음 작업을 바로 시작하고, 필요한 공구가 없으면 필요한 공구의 위치를 찾아, 공구이송 로봇에게 명령을 보내어 공구를 이송하게 한다. 필요한 공구의 이송 요청과 공구장착대의 빈 공간을 확보하기 위해 사용되지 않는 공구를 공구저장소로 이송하려는 요청이 여러 기계에서 올 경우의 대기원칙으로는 FCFS (first come first served)를 사용하였다. 또한, 여러 기계에서 한 종류의 공구에 대한 대여 요청이 그 공구 종류의 복제공구 수 이상 있을 경우에도 FCFS를 적용하였다.

시뮬레이션에서 고려하는 공구이송 로봇의 속도는 가공품의 평균가공시간에 속도계수(β)를 곱하여 사용하였다. 실험에서는 세가지의 속도계수를 ($\beta=0.01, 0.05, 0.1$) 사용하였다. 속도계수 0.01은 아래 4.1절에서 그 발생 방법이 설명될 데이터를 따르면 인접한 기계간의 이동시간이 12초 정도, 0.05는 60초, 0.1은 120초 정도가 되게 한다. 여기서 공구이송 로봇의 속도는 일정하다고 가정하며 가감속은 고려하지 않는다. 또, 공구이송 로봇과 기계의 고장은 고려하지 않는다.

4.1. 실험 문제

시뮬레이션 수행을 위해 사용한 데이터는 다음과 같은 방법 및 모수를 사용하여 임의로 발생시켰다.

- 1) 공구의 종류는 85가지로 하였다.
- 2) 복제공구의 수는 공구 한 종류 당 1-4개로 하였다. 즉, 85가지의 각각의 공구

종류에 대해 복제공구 수를 1과 4 사이의 이산형일양분포로부터 발생된 값으로 정하였다.

- 3) 기계의 수는 4대로 하였다.
- 4) 기계 당 공구장착대의 용량은 40개로 하였다.
- 5) 가공품의 가공시간은 10분에서 450분 사이의 범위를 가지는 일양분포로부터 발생되었다.
- 6) 가공품의 종류는 12가지로 설정하였다.
- 7) 가공품 당 필요 공구의 종류 수는 7에서 20 사이의 값을 임의로 주었다.
- 8) 공구중복성정도는 50%로 설정하였다. 여기서 공구중복성정도란 공구 종류들에 대해 얼마나 많은 복제공구를 사용하는지를 나타내는 척도로서, 사용되는 총 공구 수를 기계 수와 공구종류 수의 곱으로 나눈 값으로 정의된다. 공구중복성이 작을수록 시스템 내에서 공구대기가 많이 발생하게 되며, 공구중복성정도 100%는 모든 기계가 모든 종류의 공구를 다 가질수 있는 상황을 나타낸다.

위에서 설명된 방법에 의해 생성된 문제에 대해, 비교 대상이 되는 가공품 및 공구할당 방법, 즉 Han *et al.* [13]의 알고리즘과 이 연구에서 제시되는 방법을, 네가지 가공품스케줄링 규칙 (LPT, SPT, LTT, RAN), 세가지 공구스케줄링 정책 (ITR, NTR, PTR), 네가지 공구장착대의 여유공간 (0%, 5%, 10%, 15%), 세가지 공구이송 속도계수 ($\beta=0.01, 0.05, 0.1$) 등의 모든 조합에 대해서 10회씩의 시뮬레이션을 수행하였다. Han *et al.*의 알

고리들은 가공품을 가공시간이 긴 것부터 차례로 할당 가능한 기계에 할당하고 난 후, 각각의 공구를 가장 사용빈도가 높은 기계에 할당하는 방법을 채택하고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 FACTOR/AIM 을 사용하여 80486 프로세서를 채용한 PC에서 이루어졌다.

4.2. 실험 결과

실험결과로부터 각각의 성능을 비교하기 위해, 본 연구에서는 최종완료시점을 목적함수로 하는 문제에서 성능 기준으로 흔히 쓰이는 성능비(performance ratio)를 사용한다. 이 성능비 R 은, C_{max} 를 어떤 방법을 사용한 시뮬레이션에서 구해진 최종완료시점, B 를 정확하게 균형된 기계별 작업부하량이라 정의할때, $R = C_{max}/B$ 로 구해지는 값이다. 여기서 B 는 전체 가공품을 처리하는데 걸리는 총 시간을 기계수로 나눈 값으로 주어진다. 결과는 표 1, 표 2, 표 3에 나타나 있으며, 위에서 밝힌 할당 및 스케줄링 규칙 등의 각 조합에 대한 10번의 시뮬레이션 결과로부터 구해진 성능비의 평균값이 주어졌다. 이 표에서는 본 연구에서 제안하는 방법과 Han *et al.* [13]의 방법이 비교되어 있는데 전자는 표에서 NEW로 후자는 HNH로 명명되어 있다.

이 표들에서 보는 바와 같이, 가공품스케줄링 규칙은 시스템의 성능에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. (각 시뮬레이션에서 가장 좋은 결과를 주는 규칙과 가장 나쁜 결과를 주는 규칙의 최종완료시점은 평균 1.7%, 최대 5.4%의 차이 밖에 나지 않았다.) 가공품할당에 관한 정보를 이용하는 LIT가 더 좋은 결과를 나타내지 못한 것은,

가공품이 투입되는 시점에서의 공구장착(할당) 상황을 보고 가공품 투입을 하더라도 가공이 진행되면서 다른 기계들에서 공구를 빌려가거나 빌어오는 경우가 잦아 가공품 투입시의 상황이 공구 이송에 관한 예측을 위한 정확한 정보를 제공하지는 못하기 때문으로 추정할 수 있다. 이것은 (본 논문에서는 결과의 상세한 분석이 주어지지 않았으나) 공구 대기 및 공구 이송으로 인한 가공품 가공 지연이 다른 스케줄링 규칙과 거의 비슷하게 나타난 것으로부터 알 수 있다.

반면에, 가공품 및 공구할당 방법을 비교한 결과는 여기서 제시된 방법이 Han *et al.* [13]의 방법보다 모든 경우에 대해 일관적으로 좋은 것으로 나타났다. 전자가 후자보다 평균 4.2% 정도 좋은 해(최종완료시점이 작은 해)를 주었으며, 이 두 방법의 결과는 스케줄링 규칙 등 문제의 조합에 따라서는 9% 이상의 차이가 나는 경우도 있었다. 이것은 가공품 및 공구 할당의 영향으로 추정되며, 새로 제시된 가공품할당 방법으로부터 보다 더 균형된 작업부하의 배분을 이루었고 새로운 공구할당 방법으로 부터 얻어지는 해가 공구이송회수를 줄였기 때문으로 분석된다.

이와는 달리, 공구스케줄링 규칙은 공구장착대의 여유공간에 따라 다른 결과를 주었다. 여유공간이 전혀 없는 경우에는, 빌려온 공구를 사용 즉시 본래의 위치로 되돌려 주는 정책(ITR)이 가장 좋은 결과를 보였다. 이것은 공구장착대의 여유공간이 없기 때문에 사용 즉시 원래 자리로 되돌려 보내는 것이 공구로 인한 작업지연을 최소화시켰다는 것을 의미한다. 사용한 공구를 되돌려 주지 않는 정책(NTR)이 가장 나쁘게 나타났는데, 이것

표 1. 가공품/공구 할당 및 스케줄링 방법의 평균성능비 (공구이송속도계수 β 가 0.01일 경우)

공구장착대 여유공간	스케줄링 규칙	LPT		SPT		LTT		RAN	
		NEW	HNH	NEW	HNH	NEW	HNH	NEW	HNH
0%	ITR	1.439	1.490	1.444	1.527	1.436	1.511	1.432	1.517
	NTR	1.901	1.943	1.794	1.871	1.829	1.859	1.818	1.896
	PTR	1.598	1.687	1.589	1.741	1.593	1.711	1.642	1.743
5%	ITR	1.439	1.490	1.444	1.527	1.436	1.511	1.432	1.517
	NTR	1.529	1.592	1.528	1.617	1.505	1.587	1.524	1.621
	PTR	1.369	1.510	1.381	1.529	1.377	1.504	1.370	1.510
10%	ITR	1.439	1.490	1.444	1.527	1.436	1.511	1.432	1.517
	NTR	1.432	1.499	1.452	1.498	1.442	1.502	1.424	1.512
	PTR	1.434	1.479	1.435	1.521	1.435	1.472	1.428	1.483
15%	ITR	1.439	1.490	1.444	1.527	1.436	1.511	1.432	1.517
	NTR	1.419	1.430	1.416	1.460	1.419	1.459	1.401	1.460
	PTR	1.434	1.462	1.432	1.501	1.435	1.478	1.428	1.428

표 2. 가공품/공구 할당 및 스케줄링 방법의 평균성능비 (공구이송속도계수가 0.05일 경우)

공구장착대 여유공간	스케줄링 규칙	LPT		SPT		LTT		RAN	
		NEW	HNH	NEW	HNH	NEW	HNH	NEW	HNH
0%	ITR	3.382	3.687	3.417	3.649	3.397	3.599	3.439	3.629
	NTR	4.742	4.812	4.942	5.008	4.729	4.974	4.807	5.009
	PTR	3.917	4.041	3.838	4.177	3.852	4.406	3.977	4.177
5%	ITR	3.382	3.687	3.417	3.649	3.397	3.599	3.439	3.629
	NTR	3.701	3.740	3.621	3.790	3.564	3.743	3.715	3.777
	PTR	3.337	3.337	3.139	3.358	3.174	3.347	3.158	3.369
10%	ITR	3.382	3.687	3.417	3.649	3.397	3.599	3.439	3.629
	NTR	3.001	3.072	2.947	3.151	2.897	3.092	2.954	3.138
	PTR	3.092	3.207	3.103	3.201	3.127	3.257	3.093	3.332
15%	ITR	3.382	3.687	3.417	3.649	3.397	3.599	3.439	3.629
	NTR	2.680	2.789	2.690	2.907	2.665	2.881	2.652	2.789
	PTR	3.092	3.027	3.103	3.201	3.127	3.257	3.093	3.332

은 공구를 다른 기계나 공구저장소에서 빌어 올때 이 공구를 위한 공간을 확보하기 위해서 사용되지 않는 공구를 공구저장소로 옮겨야 하는 경우가 잦았기 때문에 풀이된다.

지면의 제약으로 본 논문에는 나타나지 않았지만 이 정책을 사용할때 공구이송 로봇의 이동 횟수가 가장 많이 나타났음을 통해서도 알 수 있다.

표 3. 가공품/공구 할당 및 스케줄링 방법의 평균성능비 (공구이송속도계수가 0.1일 경우)

공구장착대 여유공간	스케줄링 규칙	LPT		SPT		LTT		RAN	
		NEW	HNH	NEW	HNH	NEW	HNH	NEW	HNH
0%	ITR	6.725	7.029	6.639	6.871	6.547	6.722	6.734	6.851
	NTR	9.521	9.932	9.231	9.430	9.397	9.504	9.732	9.910
	PTR	7.432	7.603	7.296	7.475	7.279	7.763	7.254	7.419
5%	ITR	6.725	7.029	6.639	6.871	6.547	6.722	6.734	6.851
	NTR	6.760	6.903	6.838	7.030	6.724	6.938	6.910	7.188
	PTR	6.142	6.280	6.262	6.389	6.192	6.369	6.273	6.312
10%	ITR	6.725	7.029	6.639	6.871	6.547	6.722	6.734	6.851
	NTR	5.432	5.502	5.459	5.632	5.576	5.686	5.582	5.662
	PTR	6.040	6.081	6.099	6.254	5.976	6.059	6.002	6.167
15%	ITR	6.725	7.029	6.639	6.871	6.547	6.722	6.734	6.851
	NTR	4.592	4.731	4.732	4.861	4.665	4.739	4.654	4.757
	PTR	6.040	6.081	6.099	6.254	5.976	6.059	6.002	6.167

공구장착대 공간의 5%가 여유공간으로 할애된 경우에는 본 연구에서 제시한 새로운 공구스케줄링 정책(PTR)이 좋은 결과를 보였다. 이것은, 상대적으로 사용빈도가 낮은 공구를 사용 즉시 본래의 위치로 되돌려 주는 것이 다음 공구들이 빈 공간을 확보하는데 도움을 주었고, 사용빈도가 높은 공구를 공구저장소로 바로 이송하지 않고 그 공구를 자주 사용할 기계의 빈 공간으로 보내는 것이 공구이송 로봇의 이동량과 공구로 인한 작업지연을 줄여 주었기 때문으로 분석된다. 여유공간이 10%와 15%로 주어진 경우는, 사용한 공구를 되돌려 주지 않는 정책(NTR)이 좋은 결과를 보였다. 이것은 각 기계가 필요한 공구를 빌어 올 때 사용되지 않는 공구를 다른 곳으로 보낼 필요가 없을 만큼 빈 공간을 충분히 확보하고 있어, 다른 정책들에 비해 NTR에서 공구의 필요없는 이동이 적었기 때문으로 보인다.

시뮬레이션의 결과를 종합적으로 검토해 볼 때, 공구의 이송이 짧은 시간 내에 이루어지는 시스템에서는 적당히 작은 여유분의 (예를 들면, 5% 정도의) 공구장착대를 비워 두는 공구할당 정책을 쓰며, 공구 사용빈도에 따른 공구통제(스케줄링) 정책(PTR)을 쓰는 것이 좋은 반면에, 공구 이송 시간이 긴 시스템에서는 충분한 공구장착대 여유공간을 유지하면서, 빌어온 공구를 다른 기계에서 필요로 할 때까지 가지고 있는 정책(NTR)을 쓰는 것이 시스템의 효율적인 운용에 도움이 된다는 결론을 내릴 수 있을 것이다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구는 가공품과 공구의 할당 및 스케줄링에 관한 문제를 다루었다. 공구의 이송이 물류의 대부분을 이루는, 최종완료시점의 최소화를 목적함수로 하는 유연제조시스템에

서 가공품의 할당, 공구의 할당을 위한 새로운 알고리즘을 제시하였으며, 가공품 및 공구의 실시간 스케줄링을 위한 여러 규칙을 적용하여, 시뮬레이션을 통해 기존의 알고리즘과 비교하였다. 시뮬레이션 결과로부터, 가공품스케줄링 규칙은 시스템의 성능에 큰 영향을 미치지 않았으며, 공구스케줄링 정책은 공구장착대의 여유공간에 크게 영향을 받는다는 것을 알수 있었다. 또한 그 결과는 본 연구에서 제시된 가공품 및 공구 할당 방법이 기존의 방법보다 일관적으로 더 좋은 성능을 주는 것을 보여 주었다.

유연제조시스템에서 사용되는 하드웨어의 발전으로, 적지 않은 유연제조시스템들이 본 연구에서 다루는 시스템의 형태를 띠게 될 것으로 예상된다. 따라서, 가공품 및 공구의 할당과 스케줄링 문제는 유연제조시스템의 운용 측면에서 주요한 과제로 부각될 것이며, 이때 본 연구의 결과는 이러한 유연제조시스템을 효율적으로 운용하는데 기여할 것으로 기대된다. 또한, 하드웨어의 발전에 의해 공구이송 시간이 줄어들어 따라 본 연구에서 제시한 사용빈도에 따른 공구 할당 및 스케줄링 정책의 기여도는 높아질 것이다.

그러나 본 연구의 결과가 모든 시스템에서 적용될 수는 없으며, 보다 많은 시스템에서 실용적으로 사용되기 위하여는 보완 연구가 이루어져야 할 것이다. 예를 들면, 여기서 고려하지 않은 장비의 고장, 긴급 가공품의 도착 등 시스템의 변동을 고려하는 연구로의 확장이 필요하며, 가공품의 납기가 주어져 이 납기에 따라 생산하여야 하는 시스템을 위한 할당 및 스케줄링 방법에 대한 연구도 가치가 있을 것이다. 또한, 유연제조시스템의 유

연성에 공구가 많은 영향을 미치기 때문에, 시스템의 설계 및 운용 측면에서 하드웨어 및 공구 관련 비용을 고려 복제공구의 수 (또는 공구중복성정도)와 공구장착대의 크기를 결정하는 문제와 본 연구에서 다른 문제를 같이 고려하는 것도 실질적이며 중요한 연구 과제가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Berrada, M. and Stecke, K. E., "A Branch and Bound Approach for Machine Load Balancing in Flexible Manufacturing Systems," *Management Science*, 32, 10, 1316-1335 (1986).
- [2] Carrie, A. S. and Perera, D. T. S., "Work scheduling in FMS under tool availability constraints," *International Journal of Production Research*, 24, 6, 1299-1308 (1986).
- [3] Chung, C.-H., "Planning Tool Requirements for Flexible Manufacturing Systems," *Journal of Manufacturing Systems*, 10, 6, 476-483 (1991).
- [4] Chen, I. J. and Chung, C.-H., "Effect of Loading and Routing Decisions on Performance of Flexible Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, 29, 11, 2209-2225 (1991).
- [5] Crite, G. D., Mills, R. I., and Talavage, J. J., "PATHSIM, A Modular Simulator for an Automatic Tool Handling System Evaluation in FMS," *Journal of Manufacturing Systems*, 4, 1, 15-28 (1985).
- [6] de Werra, D. and Widmer, M., "Loading

- Problems with Tool Management in Flexible Manufacturing Systems: A Few Integer Programming Models," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 3, 1, 71-82 (1991).
- [7] ElMaraghy, H. A., "Automated Tool Management in Flexible Manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, 4, 1, 1-13 (1985).
- [8] Friesen, D. K., "Tighter Bounds for the MULTIFIT Processor Scheduling Algorithm," *SIAM Journal on Computing*, 13, 1, 170-181.
- [9] *The FMS Magazine*, "Seeking Software Solution to Tool Management," 6, 4, 203-206 (1988).
- [10] Graver, T. W. and McGinnis, L. F., "A Tool Provisioning Problem in an FMS," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1, 3, 239-254 (1989).
- [11] Gray, A. E., Seidmann, A., and Stecke, K. E., "A Synthesis of Decision Models for Tool Management in Automated Manufacturing," *Management Science*, 39, 5, 549-567 (1993).
- [12] Gruver, W. A., and Seinninger, M. T., "Tooling Management in an FMS," *Mechanical Engineering*, 112, 3, 40-44 (1990).
- [13] Han, M. H., Na, Y. K., and Hogg, G. L., "Real-Time Tool Control and Job Dispatching in Flexible Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, 27, 8, 1257-1267 (1989).
- [14] Hankins, S. L., and Rovito, V. P., "The Impact of Tooling in Flexible Manufacturing," *Proceeding of the 2nd Biennial International Machine Tool Technical Conference*, Illinois, National Machine Tool Builders' Association, 175-198 (September, 1984).
- [15] Kim, Y-D., and Yano, C. A., "Heuristic Approach for Loading Problems in Flexible Manufacturing Systems," *IIE Transactions*, 25, 1, 26-39 (1993).
- [16] Kim, Y-D., and Yano, C. A., "A New Branch and Bound Algorithm for Loading Problems in Flexible Manufacturing Systems," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 6, 4, 361-382 (1994).
- [17] Kusiak, A., "Parts and Tools handling Systems," in *Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems*, Andrew Kusiak(Ed.) Elsevier Science Publications, Amsterdam, 99-109 (1986).
- [18] Kwasi, A.-G., Meredith, J. R., and Raturi, A., "A Comparison of Tool Management Strategies and Part Selection Rules for a Flexible Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, 30, 4, 733-748 (1992).
- [19] Leung, L. C., Maheshwari, S. K., and Miller, W. A., "Concurrent Part Assignment and Tool Assignment in FMS with Material Handling Considerations," *Inter-*

- national Journal of Production Research*, 31, 1, 117-138 (1993).
- [20] Luggen, W. W., "Flexible Manufacturing Cells and Systems," Prentice-Hall International Editions, 1991.
- [21] *Machinery and Production engineering*, "Software Strategies for Cell Management," 7, 32-35 (1990).
- [22] Montazeri, M. and Van Wassenhove, L. N., "Analysis of Scheduling Rules for an FMS," *International Journal of Production Research*, 28, 4, 785-802 (1990).
- [23] O'Grady, P. J. and Menon, U., "Loading a Flexible Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, 25, 7, 1053-1068 (1987).
- [24] Perera, D. T. S. and Carrie, A. S., "Simulation of Tool Flow Within a Flexible Manufacturing System," *Proceeding of the 6th International Conference on FMS*, Turin, Italy, G. F. Micheletti (Ed.), IFS Publications, 211-222 (November, 1987).
- [25] Rajagopalan, S., "Formulation and Heuristic Solutions for Part Grouping and Tool Loading in Flexible Manufacturing Systems," *Proc. of the 2nd ORSA/TIMS Conf. on Flexible Manufacturing Systems*, K. E. Stecke and R. Suri (Eds.), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 312-320 (1986).
- [26] Shanker, K. and Tzen, Y.-J. J., "A Loading and Dispatching Problem in a Random Flexible Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, 23, 3, 579-595 (1985).
- [27] Stecke, K. E., "Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems," *Management Science*, 29, 3, 273-288 (1983).
- [28] Stecke, K. E., "A Hierarchical Approach to Solving Machine Grouping and Loading Problems for Flexible Manufacturing Systems," *European Journal of Operational Research*, 24, 3, 369-378 (1986).
- [29] Stecke, K. E., "Planning and Scheduling Approaches to Operate a Particular FMS," *European Journal of Operational Research*, 61, 3, 273-291 (1992).
- [30] Stecke, K. E. and Kim, I., "A Flexible Approach to Implementing the Short-Term FMS Planning Function," *Proc. of the 2nd ORSA/TIMS Conf. on Flexible Manufacturing Systems*, K. E. Stecke and R. Suri (Eds.), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 283-295 (1986).
- [31] Stecke, K. E. and Kim, I., "A Study of FMS Part Type Selection Approaches for Short-Term Production Planning," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1, 1, 7-29 (1988).
- [32] Stecke, K. E. and Solberg, J. J., "Loading and Control Policies for a Flexible Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, 19, 5, 481-490 (1981).

- [33] Tomek, P., "Tooling Strategies Related to FMS Management," *The FMS Magazine*, 4, 2, 102-107 (1986).
- [34] Tomek, P., "Tooling concept for FMS," *Proc. of the 5th International Conference on FMS*, K. Rathmill (Ed.), IFS Publications, 315-326 (1986).
- [35] Veeramani, D., Upon, D. M., and Barash, M. M., "Cutting-Tool in Computer-Integrated Manufacturing," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 4, 3/4, 237-265, (1992).
- [36] Ventura, J. A., Chen, F. F., and Wu, C.-H., "Grouping Parts and Tools in Flexible Manufacturing Systems Production Planning", *International Journal of Production Research*, 28, 6, 1039-1056 (1990).
- [37] Wang, J., Yang, J., and Gargeya., V. B., "Tool Requirement Planning in Stochastic Job Shops: A Simulated Annealing Approach," *Computers and Industrial Engineering*, 24, 2, 249-265 (1993).
- [38] Zeleny, J., "Unmanned Technology and Control Strategies in Flexible Manufacturing Systems with Random Flow of Parts and Tools," *Annals of The CIRP*, 34, 1, 391-395 (1985).