Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 25, No. 3, pp. 298-309, September 1999.

FMS 부하할당과 일정계획에 대한 통합적 접근법

우상복[1] · 김기태[2] · 정대영[3] · 박진우[4]

[1]고등기술연구원 생산기술연구실 / [2]포스코경영연구소 / [3]LG-EDS CALS&CIM 사업부/
[4]서울대학교 산업공학과

An Integrated Approach for Loading and Scheduling of a Flexible Manufacturing System

Sangbok Woo[1] · Kitae Kim[2] · Daeyoung Chung[3] · Jinwoo Park[4]

In this study, we attempt to solve the loading and scheduling problems of an FMS in an integrated manner. We propose an integrated approach and its solution methodologies which can fully exploit the flexibility of an FMS effectively and make decisions about tool allocation, machine selection, and job sequencing simultaneously. The proposed approach consists of two main modules : 'schedule generating module' which makes partial schedules and 'tool-allocation checking module' which investigates the feasibility of tool-allocation for unscheduled tasks. Utilizing two interacting modules, we can finally settle the loading and scheduling problems. Experimental results show that in most cases the proposed integrated approach outperforms existing hierarchical approaches in the scheduling performance and the computational time required. In addition to that, the difference between the two approaches tends to increase when the number of part types and the number of alternative machines increase and the tool constraints become tight. To conclude, the experimental results show that the proposed approach is a viable one for solving practical problems.

1. 서 론

유연생산시스템(FMS : Flexible Manufacturing System)은 transfer line의 생산성(productivity)과 job shop의 유연성(flexibility)을 동시에 추구하는 시스템이다. 특히, FMS의 유연성은 변화하는 시장환경과 생산현장의 불확실성에 효율적으로 대처하기 위한 핵심 요소로 인식되어져 왔다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 FMS의 설계, 생산계획, 일정계획 그리고 통제 단계에서 유연성을 효율적으로 사용하기 위한 연구는 매우 부족한 실정이다(Stecke, K. E. and Raman, N., 1995; Wilhelm, W. E and Shin, H. -M, 1985).

FMS에서 사용하는 범용기계는 기능이 다양하므로 많은 공정을 수행할 수 있으며, 제한된 용량의 공구 매거진(tool magazine)에 장착된 공구의 종류에 따라 수행할 수 있는 공정의 종류가 정해진다. 각 부품들은 공정별로 필요한 공구가 어느 기계에 장착되었는가에 따라 가능한 공정경로가 결정되며, 세부 일정계획에 의해 전체 수행도가 결정되게 된다. 따라서, FMS가 제공하는 유연성을 효율적으로 활용하기 위해서는 주어진 계획기간에 생산하는 부품의 공정별 대체기계(alternative machines)를 적절히 계획하고 운용하는 것이 중요하게 된다. 그러나 대체기계를 적절히 계획하고 운용하기 위해서는 일정계획 단계의 기본적인 제약뿐만 아니라 생산계획 단계에서의 공구제약(tool constraints) 등을 동시에 고려해야만 하기 때문에 문제가 매우 어렵고 복잡하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 기존의 연구에서는 부하할당 문제에서 공구 제약을 해결하고 여기서 결정된 공정경로를 입력으로 하여 일정계획 문제를 해결하는 단계적인 접근법을 사용하였다. 부하할당 문제에서는 일반적으로 부하 균형화, 최대부하량 최소화, 총가공시간 최소화 또는 부품이동 최소화 등을 목적으로 하여 공구할당(tool allocation)과 공정경로 비율(routing mix) 등을 결정하게 된다. 이러한 단계적 접근법은 전체 문제를 공정 단위(operation unit)의 할당(allocation)문제와 기본 일정계획 단위(basic scheduling unit)의 순서결정(sequencing) 문제로 분리함으로써 문제의 복잡도를 줄이고 문제에 적절한 해법을 개발하여 각 문제영역에 독립적으로 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 단계적 접근법은 일정계획 수행도에 적합한 부하할당 문제의 목적을 제대로 설정하기가 어렵다

는 단점을 가지고 있다. 또한 두 단계로 분리된 각각의 문제 역시 매우 어려운 문제이므로 현실적인 문제를 실시간에 구하기 위해서는 문제마다 발견적 해법을 사용해야 되는데, 이 과정에서 수행도의 손실이 중복으로 발생하게 된다. 즉, 단계적 접근법에서는 일정계획에서 사용할 수 있는 공정경로 유연성(routing flexibility)을 미리 제한시킴으로써, 부하할당과 일정계획을 동시에 해결하는 것과 비교해서 일정계획 수행도를 감소시키는 결과를 가져온다. 일반적으로 일정계획 단계까지 가능한 유연성을 최대한 유지하면서 일정계획을 수립하는 것이 전체 시스템의 수행도를 향상시킬 수 있게 된다(Rachamadugu, R. and Stecke, K. E., 1994).

따라서 궁극적인 목적인 일정계획 수행도를 위해서는 일관된 목적으로 부하할당과 일정계획 문제를 동시에 접근하는 것이 바람직하게 된다. 그러나 FMS 일정계획에서 부하할당을 함께 고려할 경우 문제의 복잡도가 증가하여 현실적인 시간 내에서 실제 문제의 최적해를 구하기는 더욱 어려워진다. 본 연구에서는 부하할당과 일정계획 문제를 동시에 고려하여, 기계에 공구를 할당하고 기계 내에서의 가공순서를 결정하는 효과적인 해법을 제시하고자 한다.

FMS의 부하할당(loading)과 일정계획(scheduling) 문제에 관한 대부분의 연구는 각 문제에 대하여 개별적으로 이루어졌으며, FMS의 부하할당과 일정계획을 함께 다루고 있는 연구는 매우 부족한 실정이다. Stecke와 Solberg(1981), Shanker와 Tzen(1985), Gupta et al.(1993), Maheshwari와 Khator(1995) 등은 부하할당과 일정계획을 단계적으로 해결하는 방식으로 문제를 접근하면서, 다양한 부하할당 전략과 온라인 일정계획 규칙간의 효과와 상호작용에 대하여, 시뮬레이션 실험을 통하여 분석하였다. Green과 Sadowski(1986)는 작업을 여러 개의 FMC중 하나에 할당하고 일정계획을 수립하는 문제에 대하여 총가공완료시각(makespan)을 최소화하는 혼합정수계획 모형을 제시하였다. 여기에서 한 작업은 할당된 FMC 내에서 고정 공정경로를 통해 완료되며, 공구문제는 고려하지 않고 있다. Sawik(1990)은 FMS의 전체 문제를 부품선택(part type selection), 부하할당(machine loading), 일정계획(operations scheduling) 문제로 크게 분해하여 각각에 대한 혼합정수계획 모형을 제시하고 단계적으로 해결하였다. Sherari et al.(1990)는 각 작업별로 대체 공정경로 조합(alternative routing combination)이 존재하는 상황에서 작업선택(job selection), 공정경로 결정(routing), 일정계획(Scheduling)을 동시에 해결하는 혼합정수계획 모형과 해법을 제시하였다. 수립된 모형은 일정한 시간간격(time interval) 내에서의 작업 할당여부를 결정하는 이산시간(discrete time) 모형이며 공구는 전혀 고려하지 않았다. Hutchison et al.(1991)은 대체기계를 갖는 random FMS에서의 일정계획 방식(scheduling schemes)과 공정경로 유연성(routing flexibility)이 FMS의 수행도에 미치는 영향을 조사하였다. 오프라인 일정계획 방식에서는 부하할당과 일정계획을 동시에 해결하는 통합구조와 단계적으로 해결하는 분해구조를 0/1 혼합 정수계획 모형으로 제시하였다. 그러나 최적해를 구하는 오프라인 일정계획 구조는 실제의 큰 문제를 해결하기에는 적합하지 않으며 공구문제는 전혀 고려하지 않았다. Kim(1993)은 FMS 부하할당 문제의 목적(부하평준화 관련)과 시스템 목적(지연, 총가공완료시각, 지연 작업수, 산출량)과의 관계를 규명하고자 했다. 이 관계를 수식적으로 직접 규명하는 것은 어려운 문제이므로, 단계적 접근법으로 실험을 통하여 관계를 도출하였다. 이 결과 부하균형화는 산출량, 총가공완료시각, 지연도와 밀접한 관계가 있음을 설명하였다.

기존의 연구를 정리해 보면, 부하할당과 일정계획의 통합과 관련한 시도는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 하나는 부하할당의 결과를 효과적으로 활용하기 위한 일정계획 문제의 발견적 해법을 개발하는 것이고, 다른 하나는 대체기계가 있는 일정계획 문제의 최적해를 구하려는 시도이다. 전자의 연구는 단계적 접근법을 기본으로 하여 공정경로 유연성을 효율적으로 활용하는 작업할당 규칙에 중점을 두고 있으며, 후자의 연구는 공구문제를 고려하지 않았으며 부하할당 문제와의 관계에 대한 설명이 없다는 한계를 가지고 있다. 즉, 부하할당 문제와 일정계획 문제를 함께 다루고 있는 대부분의 연구는 단계적 접근법을 기본으로 하고 있으며, 공정경로 유연성을 효율적으로 활용하기 위한 근본적인 통합에 대한 시도는 현재까지 보고된 바가 없는 실정이다.

본 연구에서는 FMS의 유연성을 충분히 활용하고 일정계획 수행도를 개선시키기 위하여 부하할당과 일정계획의 통합 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 통합 시스템에서는 일정계획 문제의 기본적인 제약뿐만 아니라 부하할당 문제의 공구제약 등을 동시에 고려하여 전체 문제를 해결함으로써 공구할당, 기계선택, 가공순서를 통합해서 결정하는 것이 가능하게 된다. 단계적 접근법과 통합적 접근법의 비교를 위하여 최대부하량을 최소화하는 부하할당 모형을 단계적 접근법에서 사용하도록 한다. 최대부하량을 최소화하는 것은 일정계획의 총가공완료시각을 최소화하는 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 많은 부하할당 관련 연구에서 이것을 다루고 있다(Kim, Y-D., 1993). 단계적 접근법의 일정계획 해법은 통합 시스템의 일정계획 생성 모듈에서의 해법과 동일하게 된다. 단지 차이가 나는 부분은 부하할당 문제에서 얻은 공정경로 비율이 非陰(nonnegative)인 대체기계에서만 가공이 가능하도록 대체기계 집합을 새로 조정한다는 것이다. 이렇게 함으로써 공구할당이 가능한 상태에서 일정계획을 수립하는 것이 가능하다. 따라서 통합적 접근법에서의 대체기계 집합은 단계적 접근법에서의 대체기계 집합을 포함하게 되므로, 최적해를 각각 구할 경우 통합적 접근법으로 구한 일정계획 수행도가 항상 우수하게 된다. 그러나 실시간 내에 현실적인 문제의 최적해를 구하는 것은 어느 방법으로도 현재로써는 불가능한 일이므로, 결국 발견적 해법을 통하여 해를 구하게 된다. 본 연구에서는 새로운 통합적 접근법에 대한 해법절차를 개발하고 실시간 내에 현실적인 문제를 풀 수 있는 발견적 해법을 제시함으로써 기존의 단계적 접근법과 비교하였다. 다음의 2장에서는 제안된 통합

적 접근법의 수리모형(mathematical model)과 해법 절차에 대해서 설명한다. 3장에서는 통합적 접근법의 공구할당 검증모듈에 대해서, 4장에서는 통합적 접근법의 일정계획 생성모듈에 대해서 설명한다. 5장에서는 단계적 접근법과 통합적 접근법의 비교를 위한 실험결과를, 6장에서는 결론이 제시된다.

2. 제안된 통합적 접근법

2.1 수리모형(mathematical model)

본 연구에서 다루고 있는 문제상황은 다음과 같다.

- 다품종 소량생산 환경의 FMS를 대상으로 한다.
- 가공할 부품의 종류와 수량은 정해져 있다.
- 부품종류별 공정순서는 정해져 있다.
- 부품의 공정별 대체기계가 존재한다.
- 부품의 공정별 사용공구 정보가 알려져 있다.
- 공구매거진 용량제약이 존재한다.
- 다수의 동일부품(multiple identical parts)을 독립적으로 생산한다.
- 총가공완료시각(makespan)을 최소화하는 일정계획을 구한다.
- 준비시간, 이동시간은 별도로 고려하지 않는다.

FMS 부하할당과 일정계획 문제에 대한 통합적 접근법의 수리모형은 다음과 같다.

사용기호

(i, n, j)	부품종류 i의 n번째 제품의 공정 j
J_i	부품종류 i의 마지막 공정
t_{ijk}	부품종류 i의 공정 j가 기계 k에서 수행 될 때의 가공시간
s_l	공구 l의 소요 슬롯수
TS_k	기계 k의 공구매거진 용량
Γ_{kl}	기계 k에서 공구 l을 사용하는 (i, n, j) 의집합
Φ_{ij}	부품종류 i의 공정 j를 가공할 수 있는 대체 기계의 집합
M	임의의 큰 수

결정변수

x_{inj}	부품종류 i의 n번째 제품의 공정 j의 완료시각
$t_{\max}$	총가공완료시각 (makespan)
y_{injpmq}	$\begin{cases} 1, & (i, n, j)\text{가 } (p, m, q)\text{에 선행하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$
v_{injk}	$\begin{cases} 1, & (i, n, j)\text{가 기계 k에서 가공되는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$
w_{kl}	$\begin{cases} 1, & \text{기계 k에 공구 l을 할당하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

[IM] 통합 수리모형

$$\textit{Minimize} \quad t_{\max}$$

$$\textit{subject to}$$

$$x_{in1} \geq \sum_{k \in \Phi_{i1}} t_{i1k} \, v_{in1k} , \quad \forall i, \ \forall n \tag{1}$$

$$x_{in,j+1} - x_{inj} \geq \sum_{k \in \Phi_{i,j+1}} t_{i,j+1,k} \, v_{in,j+1,k} , \forall i, \forall n, \forall j \tag{2}$$

$$x_{inJ_i} \leq t_{\max} , \quad \forall i, \ \forall n \tag{3}$$

$$\begin{aligned} x_{pmq} - x_{inj} + M \cdot (3 - y_{injpmq} - v_{injk} - v_{pmqk}) \geq t_{pqk} , \\ \forall k \in \Phi_{ij} \cap \Phi_{pq} , \ \forall (i, n, j), (p, m, q) \\ s.t. \ (i \neq p) \text{ or } (n \neq m) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} x_{inj} - x_{pmq} + M \cdot (2 + y_{injpmq} - v_{injk} - v_{pmqk}) \geq t_{ijk} , \\ \forall k \in \Phi_{ij} \cap \Phi_{pq} , \ \forall (i, n, j), (p, m, q) \\ s.t. \ (i \neq p) \text{ or } (n \neq m) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\sum_{k \in \Phi_{ij}} v_{injk} = 1 , \quad \forall i, \ \forall n, \ \forall j \tag{6}$$

$$\sum_{(i,n,j) \in \Gamma_{kl}} v_{injk} \leq M \cdot w_{kl} , \quad \forall k, \ \forall l \tag{7}$$

$$\sum_l s_l w_{kl} \leq TS_k , \quad \forall k \tag{8}$$

$$x_{inj} , \ t_{\max} \geq 0 \tag{9}$$

$$y_{injpmq} , \ v_{injk} , \ w_{kl} \in \{0, 1\} \tag{10}$$

목적식은 총가공완료시각을 최소화하는 것이다. 제약식 (1)~(6)은 일정계획과 관련된 제약식이고, 제약식 (6)~(8)은 공구할당과 관련된 제약식이며, (9),(10)은 변수관련 제약식이다. 제약식 (1)은 각 제품의 첫번째 공정의 가공완료시각에 관한 제약이다. 제약식 (2)는 각 제품의 공정간의 선행관계를 규정한다. 제약식 (3)은 각 제품의 마지막 공정과 총가공완료시각과의 관계를 설정한다. 제약식 (4)와 (5)는 동일부품과 대체기

계가 존재하는 job shop 일정계획을 수행할 때, 같은 기계에서 수행할 수 있는 작업간의 선행관계를 규정하는 disjunctive 제약식이다. 이 제약식은 같은 기계에서 작업이 가능한 모든 공정간에 필요하게 된다. 단, 동일제품의 공정간에는 명확한 선행관계가 제약식 (2)에서 표시되므로 제약식 (4)와 (5)가 불필요하며, 이러한 사실이 제약식에서 조건으로 표시되었다. 제약식 (6)은 각 공정이 대체기계 중 반드시 한 곳에서 가공된다는 것을 말한다. 제약식 (7)은 공정과 공구와의 관계를 규정하는 제약식으로써, 공정이 할당되는 기계에 필요한 공구를 할당해야 한다는 것을 말하며, 반대로 생각하면 필요한 모든 공구가 기계에 갖춰져 있으면 그 기계에서 공정이 가공 가능함을 말한다. 제약식 (8)은 기계별로 할당된 공구 슬롯수의 합이 공구매거진 용량을 초과할 수 없음을 규정한다.

통합 수리 모형 [IM]은 NP-hard 문제로서, 수리모형 패키지인 CPLEX를 이용하여 작은 규모의 문제들에 대하여 최적해를 직접 구할 수 있다(우상복, 1997). 그러나 실시간 내에 현실적인 문제를 풀 수 있기 위해서는 새로운 통합적 접근법에 대한 해법절차와 이에 따른 발견적 해법이 필요하다. 통합적 접근법의 전체 해법절차는 다음과 같다.

2.2 전체 해법절차

통합적 접근법은 크게 일정계획 생성모듈과 공구할당 검증 모듈로 구성된다. 일정계획 생성모듈은 일정계획 수행도를 기준으로 부분일정계획을 생성하는 모듈이며, 공구할당 검증 모듈은 생성된 부분일정계획 이후의 일정계획에서 공구할당이 가능한지를 미리 검증하는 모듈이다.

전체 해법절차는, 일정계획 생성모듈을 기본으로 공구할당 검증모듈과 상호연계하여 문제를 해결하는 구조로써 그림 1과 같다. 그림을 보면, 일정계획 생성 모듈에 의해 부분일정계획을 수립해가면서, 새로운 부분일정계획에서의 잔여공정의 공구할당에 문제가 없는지를 공구할당 검증 모듈을 통해 확인하게 된다. 잔여공정의 공구할당이 가능한 경우는 부분일정계획을 계속 진행시켜 나간다. 잔여공정의 공구할당이 불가능한 경우는 선택된 부분일정계획을 제거하고, 새로운 부분일정계획을 선택하여 이 과정을 반복하게 된다. 이 때, 새로운 부분일정계획의 선택은 일정계획 생성 모듈의 해법을 따른다. 이러한 공구할당 검증 과정을 거쳐서 수립된 전체 일정계획 중에서 가장 좋은 일정계획을 최선의 일정계획으로 선택하게 된다. 그러나 가능한 모든 일정계획을 구하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 비교적 우수하다고 판단되는 몇 개의 해법을 사용하여 일정계획을 구하고, 이 중에서 가장 좋은 일정계획을 최선의 일정계획으로 선택하게 된다. 본 연구에서는 대체기계가 있는 일정계획을 위한 발견적 해법을 제안하고 이를 기존의 작업할당 규칙과 함께 사용하였다.

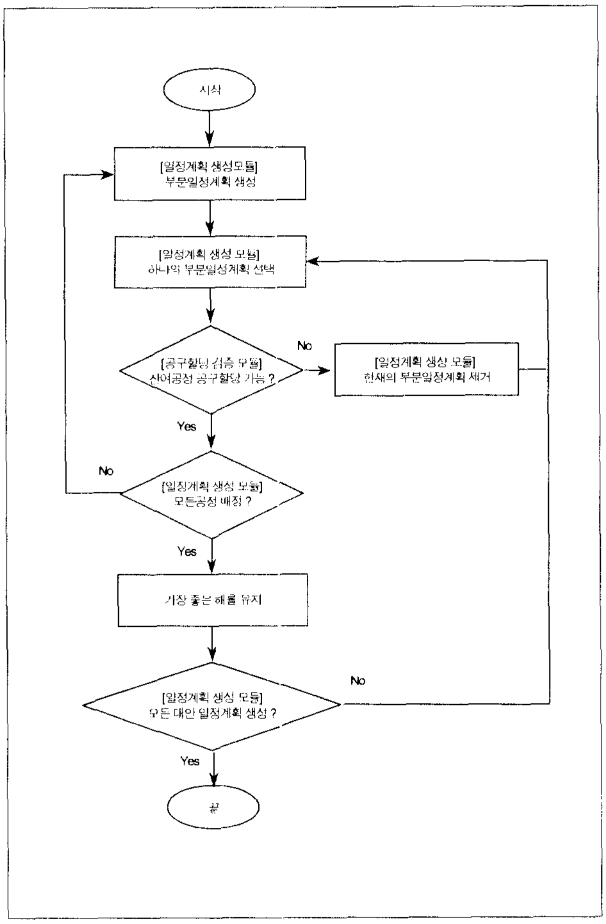

그림 1. 통합적 접근법의 전체 해법절차

3. 공구할당 검증모듈

본 장에서는 전체 작업의 부분일정계획이 작성된 상태에서 잔여 공정을 수행하기 위해 필요한 공구의 할당이 가능한지를 검증하는 방법을 제시한다. 즉, 일정계획 방법론을 따라 부분일정계획을 작성해 가는 과정에서 잔여공정의 공구할당이 가능한지를 본 모듈에 의해 확인하면서 전체 문제를 해결하게 된다.

3.1 수리모형(mathemetical model)

현재의 부분일정계획에서 한 번이라도 일정배정된 '부품종류, 공정'의 집합을 제외하고, 아직 한 번도 일정배정되지 않은 '부품종류, 공정'의 집합만을 대상으로 잔여공정의 공구할당이 가능한지를 검증한다. 따라서, 전체 문제의 크기는 부품종류수, 공구수, 기계수에 따라 결정된다. 대체기계가 존재하지 않는 공정, 즉 기계가 고정된 공정은 필요한 공구를 기계에 반드시 할당해야 하므로 미리 할당하여 기계의 공구매거진 용량을 수정하며, 이후에 이 공정은 고려하지 않는다. 따라서, 공구

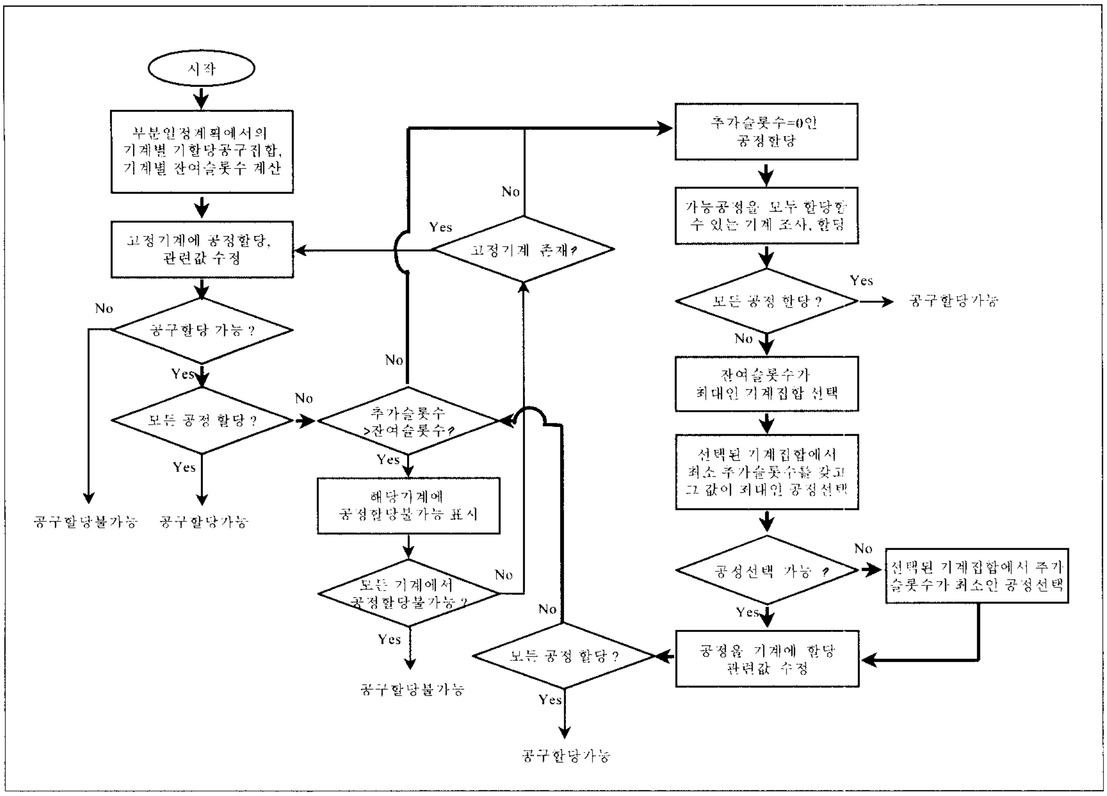

그림 2. 공구할당 검증 모듈의 발견적 해법 절차.

할당 검증은 대체기계가 존재하며 아직 한 번도 일정배정되지 않은 '부품종류, 공정'의 집합만을 대상으로 한다. 본 절에서 사용하는 기호와 공구할당 검증 모형은 다음과 같다.

<u>사용기호</u>

(i, j) 부품종류 i의 공정 j

PS_t t개의 공정이 일정배정된 부분일정계획

NS_t 전체 공정 중에서 PS_t에 속하지 않은 공정 (i, j)의 집합 즉, 한 번도 일정배정되지 않은 공정 (i, j)의 집합

Γ'_{kl} 기계 k에서 공구 l을 사용하는 (i, j)의 집합

LT_k 기계 k에 기할당된 공구의 집합

LS_k 기계 k에 기할당된 슬롯수

RS_k 기계 k의 공구매거진의 잔여 슬롯수 $(= TS_k - LS_k)$

<u>결정변수</u>

$$v_{ijk} = \begin{cases} 1, & (i, j)\text{가 기계 } k\text{에서 가공되는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

$$w_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{기계 } k\text{에 공구 } l\text{을 할당하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

$$z = \begin{cases} 1, & \text{잔여공정의 공구할당이 불가능한 경우} \\ 0, & \text{잔여공정의 공구할당이 가능한 경우} \end{cases}$$

<u>[TM] 공구할당 검증을 위한 feasibility 모형</u>

Find v_{ijk} , w_{kl}

subject to

$$\sum_{k\in\Phi_{ij}} v_{ijk} = 1 \quad , \quad \forall(i, j) \in NS_t \tag{11}$$

$$\sum_{(i,j)\in\Gamma'_{kl}\cap NS_t} v_{ijk} \le M\cdot w_{kl} \ , \quad \forall k \ , \ \forall l \notin LT_k \tag{12}$$

$$\sum_{l\notin LT_k} s_l w_{kl} \le RS_k \ , \quad \forall k \tag{13}$$

$$v_{ijk} \ , \ w_{kl} \in \{0, 1\} \tag{14}$$

제약식 (11)은 현재까지 한 번도 일정배정되지 않은 공정은 대체기계 중 반드시 한 곳에서 가공된다는 것을 말한다. 제약식 (12)는 기계에 아직 할당되지 않은 공구와 공정과의 관계를 규정하는 제약식이다. 제약식 (13)은 추가로 할당하는 기계별

공구 슬롯수의 합이 공구매거진의 잔여 슬롯수를 초과할 수 없음을 규정한다. 제약식 (14)는 변수관련 제약식이다. 모형의 목적은 제약식 (11)-(14)를 모두 만족하는 해가 존재하는지를 파악하는 것이다. 만약, 해가 존재하면, 현재의 부분일정계획은 이후의 공정에 대하여 공구할당이 가능하다는 것을 알려주며, 해가 존재하지 않는 경우, 현재의 부분일정계획은 고려대상에서 제외된다.

feasibility 모형 [TM]은 다음과 같이 최적해 모형 [TM']로 변환된다.

[TM'] 공구할당 검증을 위한 최적해 모형

Minimize z

subject to

$$z + \sum_{k \in \Phi_{ij}} v_{ijk} = 1 \quad , \quad \forall (i,j) \in NS_t \tag{11'}$$

$$\sum_{(i,j) \in \Gamma_{kl} \cap NS_t} v_{ijk} \le M \cdot w_{kl} \ , \quad \forall k \ , \ \forall l \notin LT_k \tag{12}$$

$$\sum_{l \notin LT_k} s_l w_{kl} \le RS_k \ , \quad \forall k \tag{13}$$

$$v_{ijk} \ , \ w_{kl} \ , \ z \in \{ 0,1 \} \tag{14}$$

수리 모형 [TM]의 해가 존재하면 즉, 잔여공정의 공구할당이 가능하면, [TM']에서 최적값이 0(즉, $z=0$)인 해가 존재하며 이 때의 해가 [TM]의 해가 된다. [TM]의 해가 존재하지 않으면 즉, 공구할당이 불가능하면, [TM']의 최적값은 1이 된다.

[TM']에서 v_{ijk}와 z는 문제의 특성상 0/1 정수제약을 없애도 무방하다. 그 이유는 다음과 같다. [TM']에서 $z=1$이 최적값인 경우, v_{ijk}는 모두 0이 된다. 만일 [TM']이 $0 \le z < 1$인 최적해를 갖는다면, (11)'에서 모든 공정에 대하여 v_{ijk}는 적어도 하나의 대체기계에서 陽의 값을 갖게 된다. 그 중 임의의 하나만을 1이라 하고 나머지 기계에서의 v_{ijk}를 0이라 하면 v_{ijk}는 0/1만의 값을 갖게 되고, (12)와 (13)의 제약식을 만족하면서 z가 0인 최적해를 반드시 찾을 수 있게 되므로, z는 0/1 값만을 가지게 된다($0<z<1$의 값을 갖는 것은 불가능). 따라서 모형 [TM']에서는 w_{kl} 만을 0/1 변수로 고려하면 된다.

3.2 발견적 해법

앞에서 제시한 공구할당 검증을 위한 최적해 모형 [TM']은 일정계획 문제에 비하여 쉬운 형태이고 문제 크기도 훨씬 작게 된다. 부품종류의 수가 m개, 공정의 수가 n개, 기계의 수가 k개, 공구종류가 l개일 때, 모형 [TM']의 0/1 정수 변수의 최대 개수는 kl개이며, 제약식의 최대 개수는 $mn + kl + k$개이다. 실제로, 모든 기계가 대체기계가 되는 것이 아니며 부분일정계획이 진행되면서 문제의 크기는 더욱 작게 되므로, 대부분의 문제는 분지한계법을 이용하여 현실적인 시간 내에 풀게 된다. 그러나 공구관련 제약이 중대한 경우에는 문제의 크기가 커짐에 따라 풀이 시간이 기하급수적으로 증가하며, 공구할당을 고려한 일정계획을 수립하기 위해서는 이러한 모형을 여러 번 반복하여 사용해야 하므로, 보다 실용적인 해법의 개발이 필요하다. 우상복(1997)은 라그랑지안 완화법을 사용하여 공구할당 검증을 할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 절에서는 공구할당 검증을 위한 발견적 해법을 제시한다. 발견적 해법의 기본적인 개념은 잔여 슬롯수가 최대인 기계에 '최소 추가 슬롯수'가 최대인 공정을 할당하는 것이다. 전체적인 해법 절차는 그림 2와 같다. 발견적 해법에서 추가로 사용하는 기호와 세부 해법절차는 다음과 같다.

사용기호

AS_{ijk} (i,j)가 기계 k에 배정될 때 추가되는 슬롯수

AT_{ijk} (i,j)가 기계 k에 배정될 때 추가되는 공구집합

OT_{ijk} (i,j)가 기계 k에 배정될 때 사용되는 공구집합

해법절차

단계 1 : 초기화

- 부분일정계획에서의 기계별 기할당 공구집합 LT_k와 기계별 잔여 슬롯수 RS_k를 계산한다.
  $RS_k = TS_k - LS_k \ , \ \forall k$
- 할당 가능한 기계가 1대뿐인 공정은 고정기계에 공구를 할당하고, LT_k와 RS_k를 수정한다.
- 고정기계에 할당이 불가능하면
  (즉, $\exists k \quad s.t. \quad RS_k < 0$),
  공구할당 불가능, 종료.
- 추가 공구집합 AT_{ijk}과 추가 슬롯수 AS_{ijk}를 계산한다.
  $AT_{ijk} = OT_{ijk} - LT_k \ , \ \forall (i,j), \ \forall k$
  $AS_{ijk} = \sum_{l \in AT_{ijk}} s_l \ , \ \forall (i,j), \ \forall k$
  할당 불가능한 기계, AS_{ijk} = ' − ' 로 표시.

단계 2 : 공구할당 불가능/가능 확인

- 추가 슬롯수가 잔여 슬롯수보다 크면
  (즉, $AS_{ijk} > RS_k$),
  공정 $(i, 1)$는 기계 k에 할당 불가능이므로,
  AS_{ijk} = ' − ' 로 표시.
- 공정 (i,j)가 어느 기계도 할당 불가능하면,
  공구할당 불가능, 종료.
  할당 가능한 기계가 1대뿐이면,
  공정 (i,j)를 기계에 할당하고,

LT_k, RS_k, AT_{ijk}, AS_{ijk}를 단계 1과 같은 방식으로 수정하고, 단계 2를 반복.
- 모든 공정을 기계에 할당하였으면, 공구할당 가능, 종료.

단계 3 : 할당이 자명한 공정과 기계의 결정
- 추가되는 공구가 없으면 ($AS_{ijk'}=0$), 공정 (i,j)를 기계 k'에 할당한다.
- 기계 k'에 가능 잔여공정을 모두 할당가능하면 (즉, $\sum_{l\in \bigcup_{(i,j)|k'\in\phi_{ij}} AT_{ijk'}} s_l \le RS_{k'}$), 가능한 잔여 공정은 모두 이 기계에 할당하고, 기계를 제거한다.
- 모든 공정을 기계에 할당하였으면, 공구할당 가능, 종료.

단계 4. 할당 기계와 할당 공정의 선택

잔여 슬롯수가 가장 큰 기계에 'max { min 추가 슬롯수 }'를 갖는 공정을 할당하며, 이런 공정이 없는 경우, 'min 추가 슬롯수' 공정을 할당한다.
- 할당 기계 k'의 결정 : 잔여 슬롯수가 가장 큰
  기계 $k' = \arg\ \max\ \{\ RS_k\ \}$
  동일한 것이 여러 개인 경우는 모두 선택한다.
- 할당 공정 (i',j')의 결정
  - 각 공정 (i,j)마다 추가 슬롯수가 최소인 기계집합 K_{ij}를 구한다.
    $K_{ij}=\{\hat{k}\mid \hat{k}=\arg\min[AS_{ijk}]\},\ \forall(i,j)$
  - 추가 슬롯수가 기계 k'에서 최소인 공정 중에서, 추가 슬롯수가 최대인 공정 (i',j')를 선택한다.
    $(i',j')=\arg\max\{AS_{ijk'}\ s.t.\ (i,j)\in K_{ij}\}$
  - 동일한 것이 여러 개인 경우는 평균 추가 슬롯수가 큰 공정, 대체기계 수가 적은 공정, 추가 슬롯수가 적은 공정 순으로 선택한다.
    평균 추가 슬롯수 = $\sum_k AS_{ijk}$ / 대체기계수
  - 이러한 (i',j')가 없으면, 추가 슬롯수가 최소인 공정 (i',j')를 선택한다.
    $(i',j')=\arg\ \min\ \{\ AS_{ijk'}\ \}$

단계 5. 공정 할당과 관련값 수정
- 공정 (i',j')를 기계 k'에 할당한다.
- 관련값을 수정한다.
  $RS_{k'}$ 수정 : $RS_{k'}=RS_{k'}-AS_{i'j'k'}$
  $LT_{k'}$ 수정 : $LT_{k'}=LT_{k'}\cup AT_{i'j'k'}$
  $AS_{ijk'}$ 수정 :
  $$AS_{ijk'}=AS_{ijk'}-\sum_{l\in OT_{ij}\cap AT_{ijk'}} s_l,\ \forall(i,j)$$
- 단계 2로 간다.

4. 일정계획 생성 모듈

본 장에서는 부품종류별로 공정순서가 주어진 다수의 동일부품과 공정별 대체기계가 존재하는 다품종 소량생산 환경에서, 대체기계의 가공시간이 다를 수 있는 경우의 일정계획 문제를 해결하는 해법을 제시한다. 이 문제는 Hutchison(1991)이 제시한 'modified active 일정계획 생성기'를 이용하여 최적해를 구할 수 있다. Hutchison은 'modified active 일정계획 생성기'를 이용하여, 최대 1개의 대체기계, 공정 5개, 부품 8개, 기계 7대의 FMS 일정계획 문제에 대하여 최적해를 구하였다. 그러나 다수의 동일부품과 대체기계를 갖는 일반적인 FMS의 경우에 Hutchison의 방법을 사용하여 실시간 내에 최적해를 구하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 현실적인 문제를 실시간에 해결하기 위해서는 active dispatching, nondelay dispatching 등 발견적 해법의 적용이 요구된다. Iwata(1980)는 이와 유사한 문제의 상황에서 일정계획을 수행하기 위하여 EFTA(Earliest Finishing Time with Alternative operations considered)라는 알고리즘을 제안하였으며, Nasr(1990)는 'bound 알고리즘'을 제안하였다. 이 밖에도 일반적인 job shop 일정계획에 적용하는 많은 작업할당 규칙이 존재한다. 본 연구에서는 기존의 작업할당규칙과 함께, 다음과 같은 새로운 작업할당 규칙을 제안하여 사용한다.

- STRA(Shortest Time Ratio of Alternatives)
  : 대체기계간 최소가공시간에 대한 가공시간 비율이 작은 공정을 할당
- LMPC(Longest Minimum Part Completion time)
  : 현재의 부분일정계획 하에서 잔여작업의 최소 가능 완료시각이 가장 큰 공정을 할당
- STRA* : STRA의 tie breaking rule로써 LMPC를 사용한 규칙

STRA와 STRA* 규칙에서, 공정 (i,j)의 최소가공시간 $t_{ij}^{\min}=\min_{k\in\Phi_{ij}}\{\ t_{ijk}\}$로 정의되며, 일정배정이 가능한 전체 공정 중에서 $\frac{t_{ijk}}{t_{ij}^{\min}}$ 값이 가장 작은 공정 (i,j)을 기계 k에 할당하게 된다.

LMPC 규칙은 일정배정이 가능한 공정을 대상으로, 해당 공정의 잔여작업을 현재의 부분일정계획 하에서 할당할 때 최소 가능 완료시각이 가장 큰 공정을 선택하게 된다(우상복, 1997).

표 1. 통합적 접근법과 단계적 접근법의 비교결과

공구밀도 / (부품종류수,기계수)	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
(5, 3)	1.007	1.007	1.007	1.011	1.017	1.061	1.110	1.077	1.173	1.028
(5, 5)	0.955	0.991	0.985	0.952	0.978	0.922	1.066	-	-	-
(10, 3)	0.992	0.992	0.992	0.995	0.995	1.032	1.045	1.030	1.054	1.061
(10, 5)	0.996	0.991	0.914	0.918	0.916	0.903	0.832	1.011	0.786	-
(10, 7)	0.900	0.902	0.796	0.712	0.982	0.539	-	-	-	-
(10, 9)	0.888	0766	0.686	0.785	-	-	-	-	-	-
(15, 3)	1.001	1.001	1.001	1.002	0.998	1.005	1.033	1.027	1.071	-
(15, 5)	0.989	0.955	0.948	0.932	0.790	0.743	-	-	-	-
(15, 7)	0.967	0.896	0.823	0.780	-	-	-	-	-	-
(15, 9)	0.954	0.813	0.632	-	-	-	-	-	-	-
(20, 3)	1.002	1.002	1.002	1.002	1.003	1.019	1.024	1.005	0.992	-
(20, 5)	0.922	0.985	0.983	0.915	0.869	0.803	-	-	-	-
(20, 7)	0.946	0.896	0.839	0.778	-	-	-	-	-	-
(20, 9)	0.899	0.759	0.635	-	-	-	-	-	-	-

또한 본 연구에서는 새로운 일정계획 방법으로서, 다음의 'EW(Estimated Workload) 알고리즘'을 제안한다. 이 알고리즘에서는 대체기계를 고려한 기계별 작업부하의 추정치를 기본으로 하여 추정 작업부하를 균형화하는 방식으로 공정을 할당한다. 또한 작업할당 규칙에 의해 공정을 배정한 후의 추정 작업부하를 배정 전에 미리 검토함으로써 선택된 공정의 일정배정이 적합한지를 조사한다. 동일한 경우의 효과적인 처리를 위한 몇 가지 규칙이 사용되었으며, 최종 결과로 하나의 nondelay 일정을 생성하게 된다. 구체적 알고리즘은 다음과 같다.

사용 기호

(i, n, j)	부품종류 i의 n번째 제품의 공정 j
PS_t	t개의 공정이 일정배정된 부분일정계획
$\overline{PS_t}$	전체 공정 중에서 PS_t에 속하지 않은 공정
Θ_k	기계 k에서 가공이 가능한 (i, n, j)의 집합
S_t	PS_t에서 일정배정이 가능한 (i, n, j)의 집합
W_k	기계 k의 총작업부하
$E[W_k^t]$	부분일정계획 PS_t에서 추정되는 기계 k의 총작업부하
fm_k^t	부분일정계획 PS_t에서 기계 k의 가공 완료시각
AM_{ij}	부품종류 i, 공정 j의 대체기계 집합, $\mid AM_{ij} \mid$는 대체기계의 수
α_{ijk}	부품종류 i, 공정 j가 기계 k에 선택될 가능성
so_{inj}^t	PS_t에서 공정 (i, n, j)의 최소 가능 시작시각
fo_{inj}^t	PS_t에서 공정 (i, n, j)의 최소 가능 완료시각

EW 알고리즘

단계 1 : 후보 기계 선택

- 총작업부하의 추정치 $E[W_k^t]$가 가장 작은 기계를 선택한다.

$$E[W_k^t] = fm_k^t + \sum_{(i,n,j) \in \Theta_k \cap \overline{PS^t}} t_{ijk}\, \alpha_{ijk},$$

$$\text{where } \alpha_{ijk} = \frac{1}{\mid AM_{ij} \mid}$$

$$k^* = \arg\min \{ E[W_k^t] \}$$

- 기계 k^*를 선택한다.
- 선택된 기계에서 일정배정 가능 공정이 없으면, 다음 순서의 기계를 선택한다.
- 모든 기계에서 일정배정 가능 공정이 없으면, 종료한다.

단계 2. 공정 선택

- 기계 k^* 에 일정배정이 가능한 nondelay 공정 중에서, 작업할당 규칙에 의해 공정 $(i, n, j)^*$을 선택한다.
- 동일한 공정이 여러 개인 경우는, 공정수가 많이 남은 것으로 선택한다.

단계 3. 기계 변경 가능성 검토

- 단계 2에서 선택된 공정의 대체기계 중에서 선택된 공정을 할당한 후의 총작업부하를 균형화시키는 기계에 공정을 할당한다.

기계 k' 에 공정 (i, n, j)가 할당된 경우,

기계 k' 의 총작업부하의 변화는

$$E[W_{k'}^{t+1}] - E[W_{k'}^{t}]$$
$$= so^{t}_{inj} + t_{ijk'} - fm^{t}_{k'} - t_{ijk'}\ \alpha_{ijk'}$$
$$= (so^{t}_{inj} - fm^{t}_{k'}) + t_{ijk'}\ (1 - \alpha_{ijk}) > 0$$

로 증가하며, 할당되지 않은 기계 $\overline{k'}$ 는

$$E[W_{\overline{k'}}^{t+1}] - E[W_{\overline{k'}}^{t}] = -t_{ij\overline{k'}}\ \alpha_{ij\overline{k'}} < 0$$

로 감소한다.

- 기계 k' 에 할당한 경우의 $\max_{k} \{E[W_{k}^{t}]\}$를 구한다.
- 대체기계 모두에 대하여 이 값을 계산한 후에, $\min \max_{k} \{E[W_{k}^{t}]\}$ 가 되는 기계 k를 선택한다.
- 선택된 기계에 단계 2의 공정을 할당한다. 단, nondelay 일정계획이 아닌 경우에는 단계 1의 기계를 선택한다.
- 단계 1로 간다.

5. 제안된 해법의 수행도 분석

본 절에서는 앞에서 소개한 통합적 접근법의 수행도를 평가하기 위한 실험을 실시하였다. 실험의 주 내용은 본 연구에서 제안한 통합적 접근법과 기존의 단계적 접근법을 FMS의 부하할당과 일정계획 문제에 적용하여 총가공완료시각(makespan)을 비교하는 것이다. 대상 시스템은 기계간 가공시간이 다른 비동일 대체기계로 구성되며 기본적인 공구매거진 제약이 존재하는 경우이다.

통합적 접근법의 일정계획 생성모듈은 4개의 새로운 방법과 기존의 5개의 방법 등 총 9개의 일정계획 방법을 사용한다. 여기서 사용하는 9개의 일정계획 방법은 대체기계가 존재하는 job shop 일정계획 문제에 대하여 사전 실험해 본 결과 비교적 우수한 방법으로 선택된 것들로서 다음과 같다.

- STRA-EW : STRA, EW 알고리즘
- STRA*-EW : STRA*, EW 알고리즘
- STRA : STRA, nondelay dispatching
- STRA* : STRA*, nondelay dispatching
- SPT : SPT, nondelay dispatching
- MWKR : MWKR, nondelay dispatching
- MOPNR: MOPNR, nondelay dispatching
- LPT : LPT, nondelay dispatching
- EFTA : EFTA 알고리즘(Iwata, 1980)

통합적 접근법의 공구할당 검증 모듈은 3.2절에서 제시한 발견적 해법을 사용하며, 통합적 접근법은 2.2절의 전체 해법절차를 이용하여 최종결과를 얻는다.

단계적 접근법에서는 기계의 공구매거진 용량 제약을 만족하면서 최대부하량(maximum workload)을 최소화하도록 공정비율(routing mix)을 결정하는 부하할당 문제[부록참고]를 먼저 풀게 된다. 부하할당 문제는 수리모형 패키지인 CPLEX의 CPU time limit를 1800초로 하여 해를 구한다. 이 결과로 얻은 공정비율로부터 대체기계 집합을 재정의함으로써, 공구할당이 가능한 일정계획 문제로 넘어가게 된다. 일정계획 문제에서는 통합적 접근법의 일정계획 생성모듈과 동일한 방법으로 일정계획을 수행하여 최종결과를 얻는다.

통합적 접근법과 단계적 접근법은 각각 9개의 일정계획 방법으로 구한 해 중에서 가장 좋은 해를 두 접근법간의 비교에 사용하도록 한다. 모든 실험은 SUN Ultra Workstation에서 수행되었으며, 실험에 사용된 parameter는 다음과 같다.

각 부품별 생산량은 1에서 20개, 부품의 공정수는 2에서 9개, 공정별 가공 가능한 기계의 수는 최소 1대에서 최대 모든 기계가 가능하도록 하며, 공정별 가공시간은 5에서 20까지의 값 중 하나를 기준가공시간으로 하여 기준가공시간의 0.5배에서 1.5배 사이에서 대체기계별 가공시간을 갖도록 난수를 발생시킨다. 공정별 사용하는 공구수는 1에서 10개이며 공정별 공구번호가 중복되지 않도록 난수를 발생하여 사용하였으며, 공구별 소요 슬롯수는 1에서 3개이다. 총 공구수는 문제에서 사용하는 공구의 중복 수준이 5 ~ 50% 사이가 되도록 난수를 발생시킨다. 기계별 공구매거진 용량은 기계별로 동일한 것으로 하며 공구매거진 용량의 공구밀도(tool density)에 의하여 결정된다. 공구밀도(tool density)는 공구매거진 용량 제약의 tightness를 규정하는 척도로서 다음과 같이 정의한다.

$$\text{공구밀도} = \frac{(\text{모든 공구 슬롯수의 합})}{(\text{총기계수}) * (\text{공구매거진 용량})}$$

공구밀도는 공구매거진 용량에 대하여 최소한으로 할당해야 하는 공구슬롯수의 이론적인 값이므로, 그 값이 1 이상이면 현재의 공구매거진 용량의 제약 하에서는 이론적으로 공구할당이 불가능함을 말하며, 값이 클수록 공구 매거진 용량 제약이 tight함을 나타낸다. 일반적으로 0과 1 사이의 값이 의미를 갖는다.

동시에 생산하는 부품의 종류수는 5, 10, 15, 20의 4가지, 기계수는 3, 5, 7, 9의 4가지를 사용하고, 공구밀도는 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75의 10가지에 대하여 각각 10번씩의 반복실험을 한 결과가 표 1과 그림 3, 그림 4에 정리되어 있다. 표의 값은 단계적 접근법의 최선해에 대한 통합적 접근법의 최선해의 비율을 나타낸다. 따라서 이 값이 1보다 작으면 통합적 접근법이 단계적 접근법보다 우수하다는 것을 말한다. 이 값은 그림 3, 그림 4의 세로축에도 나타나 있다. 그림 3에서 xy 평면의 한 축은 공구밀도를, 다른 한 축은 (부품종류수, 기계수)를 나타낸다. 그림 3과 그림 4의 결과를 보면 통합적 접근법이 단계적 접근법보다 전반적으로 우수하며, 기계수가 커질수록 그 차이가 뚜렷해짐을 알 수 있다. 이것은 대체

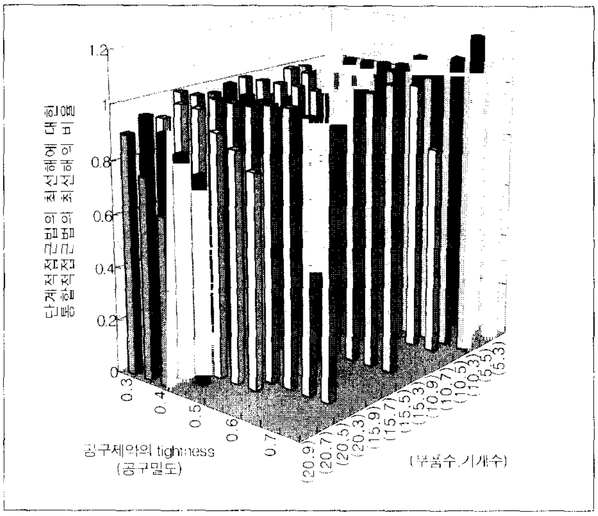

그림 3. 접근법간의 비교결과.

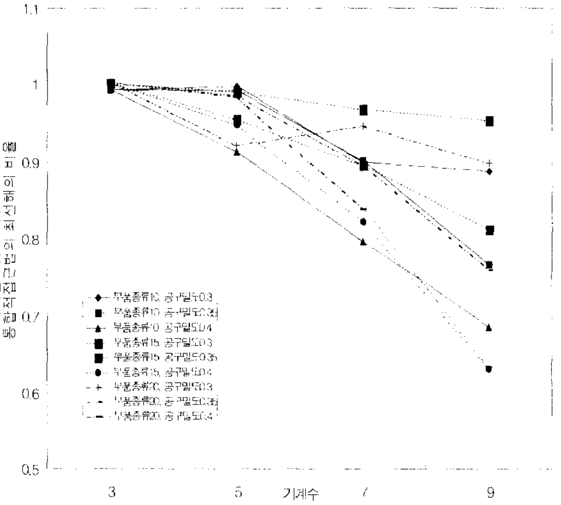

그림 4. 기계수 변화에 따른 접근법간의 차이

기계수가 커질수록 단계적 접근법에서 부하할당 목적에 부합하는 좋은 해를 찾기가 점점 힘들어지기 때문인 것으로 여겨진다.

통합적 접근법으로 문제를 해결하는 데 소요된 평균 CPU time은 부품종류수, 기계수에 따라 선형적으로 증가하였으며, 대부분의 문제에서 수초 내지 수십 초 이내이며 최대 450초를 넘지 않았다. 단계적 접근법의 경우에는 많은 문제에서 부하할당 문제의 풀이에 상당한 시간을 소비하여 정해진 CPU time limit인 1800초 이상이 소요되었으며, 몇몇 작은 문제를 제외하고는 통합적 접근법에 비해 수십 배의 평균 CPU time이 소요되었다. 표에서 비교결과가 없는 부분은 제한된 시간 내에 단계적 접근법의 해를 모두 구하지 못했거나, 공구할당이 모두 불가능한 것으로 판명된 경우이다.

일정계획 방법들 중에서는 통합적 접근법의 STRA*가 전체적으로 가장 좋은 결과를 보여주었으며, STRA*-EW, STRA* 방법은 통합적 접근법 뿐만 아니라 단계적 접근법에서도 기존의 방법에 비하여 전반적으로 우수한 결과를 보여주었다(우상복, 1997).

6. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 FMS의 부하할당과 일정계획 문제를 통합하여 해결함으로써, FMS가 제공하는 유연성을 효율적으로 활용하면서 공구할당, 기계선택, 가공순서에 관한 결정을 동시에 수립할 수 있는 통합적 접근법의 해법을 제안하였다. 제안된 통합적 접근법은 부분일정계획을 만들어 가는 '일정계획 생성 모듈'과, 부분일정계획 이후의 공구할당이 가능한 지를 미리 조사하는 '공구할당 검증 모듈'의 두 모듈이 상호 연계되어 구성되어 있다.

일정계획 생성 모듈에서는 추정 작업부하에 기초한 일정계획 생성 알고리즘과 STRA(Shortest Time Ratio of Alternatives) 기반 작업할당 규칙 등을 새로 제시하였다. 이러한 일정계획 생성 모듈은 공구할당 검증모듈과는 독립적으로 사용하는 것이 가능하므로 자동 공구 운반장치의 운용, 충분한 용량의 공구매거진 도입 등으로 공구 관련 제약이 무의미해진 경우에도 공구할당을 고려하지 않은 부하할당과 일정계획의 통합 모듈로서 유익하게 사용될 수 있다. 공구할당 검증 모듈에서는 최적해 모형뿐만 아니라 발견적 해법을 제시함으로서 실시간에 현실적인 문제를 해결할 수 있도록 하였다. 공구할당 검증 모듈은 통합 모형을 푸는 과정의 일부로써 필요할 뿐만 아니라, 부품선택 문제에서 선택된 부품종류의 집합을 시스템에서 동시에 생산하는 것이 가능한지를 파악하거나, 일부 공구가 할당된 상태에서 현재의 공구상태를 변경하지 않고 부품집합을 추가하는 것이 가능한지 등을 파악하는 데 활용할 수 있게 된다.

실험결과, 통합적 접근법은 문제의 크기가 커질수록 단계적 접근법보다 수행도나 시간 면에서 모두 우수함을 보였다. 통합적 접근법이 더 좋은 결과를 얻기 위해서는 수행도에 부합하며 대체기계를 효율적으로 활용하는 일정계획 방법론의 개발이 필수적이다. 따라서 본 연구에서 다룬 총가공 완료시각 뿐만 아니라 다른 수행도를 위한 일정계획 방법론의 개발이 필요할 것으로 생각된다. 또한 FMS의 생산계획과 통제를 위한 전체 시스템과의 효율적인 연계를 통해 시스템 운영 차원에서의 실용적인 해를 제공하는 것이 요구된다.

참고문헌

우상복(1997), FMS의 부하할당과 일정계획의 통합에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교 산업공학과.

Greene, T. J. and Sadowski, R. P.(1986), A mixed integer program for loading and scheduling multiple flexible manufacturing cells, *European Journal of Operations Research*, 24, 379-386.

Gupta, M. C., Gupta, Y. P. and Evans, G. W.(1993), Operations planning and scheduling problems in advanced manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 31(4), 869-900.

Hutchison, J., Leong, K., D. Snyder, D. and Ward, P.(1991), Scheduling approaches for random job shop flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 29(5), 1053-1067.

Iwata, K., Murotsu, Y. and Oba, F.(1980), Solution of large-scale scheduling problems for job-shop type machining system with alternative machine tools, *Annals of the CIRP*, 29(1), 335-338.

Kim, Y-D.(1993), A study on surrogate objectives for loading a certain type of flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 31(2), 381-392.

Maheshwari, S. K. and Khator, S. K.(1995), Simultaneous evaluation and selection of strategies for loading and controlling machines and material handling system in FMS, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 8(5), 340-356.

Nasr, N. and Elsayed, E. A.(1990), Job shop scheduling with alternative machines, *International Journal of Production Research*, 28(9), 1595-1609.

Rachamadugu, R. and Stecke, K. E.(1994), Classification and review of FMS scheduling procedures, *Production Planning and Control*, 5(1), 2-20.

Sawik, T.(1990), Modelling and scheduling of a Flexible Manufacturing System, *European Journal of Operational Research*, 45, 177-190.

Shanker, K. and Tzen, Y. J. J.(1985), A loading and dispatching problem in a random flexible manufacturing system, *International Journal of Production Research*, 23(3), 579-595.

Sherali, H. D., Sarin, S. C. and Desai, R.(1990), Models and algorithms for job selection, routing, and scheduling in a flexible manufacturing system, *Annals of Operations Research*, 26, 433-453.

Stecke, K. E. and Solberg, J. J.(1981), Loading and control policies for a flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 19(5), 481-490.

Stecke, K. E. and Raman, N.(1995), FMS planning decisions, operating flexibilities, and system performance, *IEEE Transactions on engineering management*, 42(1), 82-90.

Wilhelm, W. E. and Shin, H. -M.(1985), Effectiveness of alternate operations in a flexible manufacturing system, *International Journal of Production Research*, 23(1), 65-79.

부 록

최대부하량을 최소화하기 위한 부하할당 수리모형

<u>사용 기호</u>

- (i, j) 부품종류 i의 공정 j
- q_i 부품종류 i의 생산량
- t_{ijk} 공정 (i, j) 가 기계 k에서 수행될 때의 가공시간
- $\overline{t_{ij}}$ 공정 (i, j) 의 평균 가공시간
- s_l 공구 l의 소요 슬롯수
- TS_k 기계 k의 공구매거진 용량
- Γ_k 기계 k에서 가공이 가능한 공정 (i, j) 의 집합
- Γ_{kl} 기계 k에서 공구 l을 사용하는 공정 (i, j) 의 집합
- Φ_{ij} 공정 (i, j) 를 가공할 수 있는 대체기계의 집합
- M 임의의 큰 수

<u>결정변수</u>

- $l_{\max}$ 최대부하량(maximum workload)
- r_{ijk} 공정 (i, j) 가 기계 k에서 가공되는 비율, 공정비율(routing mix) 단, $q_i = 1$ 인 경우, $r_{ijk} \in \{0, 1\}$

$$v_{ijk} \begin{cases} 1, & (i, j) \text{ 가 기계 } k\text{에서 가공되는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

$$w_{kl} \begin{cases} 1, & \text{기계 } k\text{에 공구 } l\text{을 할당하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

<u>수리 모형</u>

$$\textit{Minimize} \quad l_{\max}$$

$$\textit{subject to}$$

$$\sum_{(i,j)\in\Gamma_k} (q_i t_{ijk}) r_{ijk} \le l_{\max}, \quad \forall k \tag{1}$$

$$\sum_{k\in\Phi_{ij}} r_{ijk} = 1, \quad \forall i, \ \forall j \tag{2}$$

$$\sum_{(i,j)\in\Gamma_{kl}} r_{ijk} \le M \cdot w_{kl}, \quad \forall k, \ \forall l \tag{3}$$

$$\sum_l s_l w_{kl} \le TS_k, \quad \forall k \tag{4}$$

$$l_{\max}, \ r_{ijk} \ge 0 \tag{5}$$

$$w_{kl} \in \{0, 1\} \tag{6}$$

목적식은 최대부하량(maximum workload)을 최소화하는 것이다. 제약식 (1)은 할당된 부하와 최대부하량 사이의 관계를 규정한다. 제약식 (2)는 각 공정이 대체기계에서 공정비율(routing mix)만큼 가공된다는 것을 말한다. 제약식 (3)은 공정과 공구와의 관계를 규정하는 제약식으로서 非陰(nonnegative)의 공정비율을 갖는 기계에 필요한 공구가 할당되어야 한다는 것을 말한다. 제약식 (4)는 기계별로 할당된 공구 슬롯수의 합이 공

구매거진 용량을 초과할 수 없음을 규정한다. 제약식 (5)와 (6)
은 변수와 관련된 제약식이다.