

FMS의 생산계획 및 일정계획을 위한 단계적 해법에 관한 연구

장 성용 (서울산업대학 산업공학과)

박 진우 (서울대학교 산업공학과)

Hierarchical Approaches for the FMS Production Planning and Scheduling Problems

Jang, Seong Yong

Dept. of Industrial Engineering
Seoul National Polytechnic University

Park, Jin Woo

Dept. of Industrial Engineering , SNU

Abstract

Flexible Manufacturing System (FMS) is an integrated, computer controlled complex of automated material handling devices and numerically controlled machine tools that can simultaneously process medium-sized volumes of a variety of part types.

This paper discusses planning problems that can be solved for efficient use of an FMS and present an integrated decision support system for FMS production planning and scheduling problems.

FMSDS (Flexible Manufacturing Systems Decision Support System) consists of data handling modules, part selection module, loading module, load adjusting module, scheduling module and simulation module etc.

This paper presents the solution methodology of each subproblems and integrated interfaces between subproblems using hierarchical approaches and loop controls considering the relationships between subproblems.

A case study by this model is presented.

1. 서론

최근 제조업 분야에서 자동화의 진전으로 생산 방식에서의 급격한 변화를 가져왔다. NC공작 기계기술, 자동 자재 이송 장치, 컴퓨터 및 정보 기술의 조합으로 Flexible Manufacturing System (FMS)이라는 새로운 생산 시스템이 발전되어 왔다. FMS는 연간 생산량이 중소량인 한가지 이상의 부품을 효율적으로 생산할 수 있도록, 반 독립적인 (semi-independent) 작업장들과 자동 자재 이송 시스템을 컴퓨터에 의해 통합 제어하는 생산 시스템이다.

FMS의 목적은 다품종 소량 생산 시스템(job shop production)의 유연성(flexible)과 자동화된 대량 생산 시스템의 효율성(efficiency)을 동시에 추구하는 것이다.

FMS의 3가지 중요한 구성 요소는 (i) 여러 가지 기능을 수행할 수 있는 수치 제어 공작기계 (ii) 자동화된 자재 이송 시스템 (iii) 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어이다. 최근에 설치 운용되고 있는 FMS들은 실제적인 절삭 가공 작업, 부품의 이동, 공구의 교환등과 같은 대부분의 실시간(real-time) 활동들이 컴퓨터에 의해 제어된다.

FMS는 자동화와 유연성의 양측면을 대처할 수 있는 생산 시스템이지만 생산 관리 문제는 대량 생산

시스템이나 배치 생산 시스템에 비해 훨씬 복잡하다. 하나의 부품을 제조하는데 여러 공정(operation)을 거쳐야 하며, 각각의 공정에는 하나 이상의 공구를 필요로 한다. 하나의 NC 기계에서 수행될 수 있는 모든 공정을 수행할 수 있는 공구들이 제한된 용량의 공구 매거진(tool magazine)에 저장되어 있어야 한다. NC 동작 기계들은 자동 공구 교환장치(automatic tool exchanger)가 있어서 사용 완료된 공구와 다음 사용해야 할 공구를 수 초 이내에 상호 교환할 수 있다. 따라서 각 공정 간에는 준비시간(set-up time)이 거의 없이 연속적으로 수행될 수 있다.

각 기계는 아주 다양하고 많은 기능들을 수행할 수 있으며, 각 가공 부품들은 여러 개의 공정 경로(routing)를 가질 수 있고, 시스템 전체적으로는 여러 개의 부품들을 동시에 가공할 수 있다. 따라서 FMS를 효율적으로 운용하기 위한 생산 계획 문제는 대단히 복잡하고 최선의 해결책을 찾아내기가 어렵다. Stecke는 FMS의 생산계획을 효율적으로 수행하기 위해 다음의 5가지 생산 계획 문제를 제시하였다. [2,3]

- (1) 대상 부품 선정문제: 생산 계획 기간내 한 배치(batch)의 생산해야 할 부품 혹은 부품군(part family)의 종류와 생산량을 결정한다.
- (2) 기계군(machine group) 형성: 동일 기계군 내에서 동일 공정들을 수행할 수 있도록 기계군을 형성한다.
- (3) 생산 비율 문제: (1)에서 선정된 부품들이 생산될 상대적인 비율을 결정한다.
- (4) 자원 할당 문제: 보유하고 있는 자원 중에서 선정된 부품들을 가공하는데 소요되는 팔레트(pallets), 고정구(fixture)들의 소요량을 결정하여 할당한다.
- (5) 작업 부하 할당 문제(loading problem): 기술적 특성 및 FMS의 공구 매거진의 용량 한계를 고려하여 (2)에서 형성된 기계군에 선정 부품의 공정과 그 공정에 요구되는 공구들을 할당한다.

본 연구에서는 Stecke가 제시한 5가지 생산 계획 문제 중에서 핵심적인 문제인 대상 부품 선정 문제, 작업 부하 할당 문제에 생산 일정 계획 문제를 추가하여 단계적이고 일관적인 해법을 제시하게 되고 각 문제간의 유기적인 관계를 고려하여 다중 loop방식의 해법을 채택함으로써 FMS의 전체 생산 효율을 극대화할 수 있고 실시간내 의사결정을 수행할 수 있는 의사 결정 지원 시스템 (

FMSDS)을 개발하는 것을 주된 목적으로 하고 있다.

본 논문에서는 FMSDS의 구조를 설명하고 FMSDS의 각 부분문제들에 대한 해법과 부분문제들간의 유기적인 관계를 고려한 연결문제를 제시하게 된다.

2. 선행 연구 동향과 문제점 및 해결방안

2.1 선행 연구 동향

(1) 부품 선정 문제

Whitney와 Gaul은 부품의 속성과 시스템의 제약조건을 Probability Index (PI)로 표현하여 PI값이 큰 것부터 순서적으로 선택해 나가는 sequential greedy 방법을 제시하였다. [25]

Kusiak은 부품 분류 및 코드 부여 기법에 근거해서 부품-속성 행렬을 만들고 그 행렬을 이용하여 clustering함으로써 하나의 그룹이 한 배치가 되도록 하는 방법을 개발하였다. [14]

Stecke와 Kim은 배치와 기계의 가용시간과 부품별 가공 팔레트의 제약 조건을 고려하여 기계간 균형을 목적으로 하는 부품 비율을 결정하였다. 여기에서는 중요한 공구 매거진 용량 제한과 부품의 납기를 고려하지 않았다. [24]

Rajagopalan은 부품 선정 문제와 부하 할당 문제를 동시에 고려한 혼합형 정수 계획 문제로 정식화하였으며 공구 슬롯 요구량을 가중치로 하여 우선 순위에 기초한 발전적 기법을 제시하였다. [18]

Hwang은 가용시간과 공구 매거진 용량 제한을 고려하여 납기가 작은 부품을 우선적으로 선정하는 0-1 정수 계획 문제로 모형화하였으며 Lagrangian Relaxation 해법을 사용하였다. [10,11] 그러나 Hwang의 모형에서는 모든 기계가 동종의 기계로 간주되었다.

(2) 부하 할당 문제

작업 부하 할당 문제를 해결하기 위해 다양한 접근 방법이 제시되었다. Stecke는 지정된 기계들의 작업 시간들을 균형화시키기 위해 그리고 가공 부품들의 이동을 최소화하기 위한 0-1 비선형 혼합 정수 계획법으로 모형화하였다. [23] 앞의 두 가지 목적 함수 외에도 5가지 목적 함수를 고려하였다. 그러나 스케줄링, 체증 문제(congestion problem) 그리고 공구의 수명등이 고려되지 않았다.

더구나 공정이 한 번 이상 할당되는 것을 허용함으로써 많은 수의 공구와 공구 슬롯수가 필요하게 되었다. 이 때문에 기계의 가동율이 낮아지고 생산율이 저하될 수 있다. 제시된 해법 절차는 비선형 항목들을 선형화(linearization)하는 복잡성을 지니고 있다. Berrada와 Stecke는 복잡한 선형화 단계를 피하고 직접 해를 구할 수 있도록 분지 한계법(branch and bound method)에 근거한 해법을 제시하였다. [3]

Kusiak은 공구 슬롯의 용량 제한, 공구 수명등을 제약 조건으로 하고 총 작업 비용의 최소화를 목적으로 하는 작업 부하 할당 문제를 모형화하였다. 제시된 모형은 0-1 혼합 정수 선형 계획법이고 subgradient optimization에 근거한 해법이 제시되었다. 이 작업 부하 할당 모형의 장점은 선형 구조이고 공구 수명 및 공구 슬롯 용량 제한을 고려하였다는 점이다. [15]

Chakravarty와 Shtub 역시 작업 부하 할당 문제를 0-1 혼합 정수 선형 계획법으로 모형화하였다. [4] 결정 변수는 어느 기계에 어떤 공구를 할당할 것인가이다. 각 공구는 장착된 기계마다 효율이 다른 것으로 보았다. 목적함수는 총 작업 시간의 최소화이다. 이 모델에서는 하나의 공구가 한 부품의 모든 가공 공정을 수행할 수 있다는 가정하에 한 부품은 하나의 공구에 할당된다. 이 모델에서는 공구 수명 및 기계 용량 제한등을 고려하지 않았다. 주어진 공구 기계간 효율 행렬(efficiency matrix)을 고려하여 각 공구들을 가장 효율적인 기계에 할당하게 된다.

Sarin과 Chen은 보다 개선된 작업 부하 할당 모형을 제시하였다. [19] 공구 수명, 공구 슬롯 용량 제한, 체중 효과 등의 제약 조건 등이 반영되었다. 이 모형에서 목적함수는 총 작업 비용의 최소화이다. 이 모형에서 반영된 제약 조건은 상기 어느 모형보다도 작업 부하 할당 문제에 고려해야 할 사항을 잘 반영하고 있다. 그러나 목적 함수에 사용된 공구-기계 조합시의 단위 시간당 비용이 실제 작업시의 동태성이나 작업 속도, 가공물, 작업 여건 등에 따라 달라지기 때문에 구하기 어렵다. 공구들이 우선적으로 값싼 기계에 할당되게 됨으로써 값비싼 기계의 가동율이 낮아질 수 있다. 또한 작업 비용의 최소화는 달성될지라도 작업 부하가 불균형을 이루어 생산율이 감소될 수 있는 문제점이 있다.

마지막으로 장 성웅은 Stecke의 목적 함수와 Chen의 제약 조건을 적절히 조합한 새로운 모형을 제시하고 사례를 제시하였다. [29]

(3) 일정 계획 문제

FMS의 일정 계획 문제는 크게 1) 수리 계획 모형 2) 할당 규칙 (dispatching) 3) 발견적 기법 4) AI 응용 기법 등의 4가지 방향에서 연구가 진행되어 왔다.

각각의 방법들에 대한 연구를 요약하면 다음과 같다.

1) 수리 계획 모형 [5,13]

- Kimemia & Gershwin (1979) : 네트워크 모델
- Chang & Sullivan (1984) : 정수 계획법 모형화, 2단계 해법 제시

2) 할당 규칙 적용 [12,17,22]

- Nof et al. (1979)
- Stecke & Solberg (1981)
- Iwata et al. (1982)

3) 발견적 기법 [16,20,27]

- Nakamura & Singu (1985)
- Sarin et al. (1985)
- 김 종한 (1989)

4) AI 기법 응용 [2,9,21,26]

- Fox & Smith (1984) : ISIS
- Ben-Arieh (1985) : KBRs
- Shaw (1989)
- Wu (1987)

(4) 종합적인 연구

- Bastos는 배치 크기 결정 문제와 공정 순서 결정 문제를 단계적으로 해결하는 방법을 제시하였다. 이는 주간 혹은 월간 계획을 매일 혹은 shift단위의 계획으로 변환하는 것이다. [1]
- Chen은 부품 선정 문제와 부하 할당 문제를 단계적으로 해결하는 해법을 제시하였다. 부품 선정 문제의 경우 그룹 수가 주어진 clustering문제로 해결하여 하나의 그룹이 하나의 배치를 형성하게 된다. 부하 할당 문제는 0-1 정수 계획 문제로 모형화하여 발견적 해법을 제시하였다. [6]
- Escudero는 부하 할당 문제와 일정 계획 문제를 3단계로 나누어 해결하였다. [8] 이 때의 부하 할당

모듈, 공정 순서 결정 모듈, 부품의 입력 순서 결정 및 가공 route 결정 모듈로 나누어 각각을 대형의 0-1 혼합 정수 계획문제로 모형화하여 TSP를 이용한 분지 한계 기법의 해법을 제시하였다. 이 연구에서는 부품 선정 문제와의 연관관계를 다루지 않았다.

2.2 기존 연구의 문제점 및 해결 방안

일부의 종합적인 연구가 최근에 수합되고 있으나 과거의 대부분의 연구들은 부분 문제들의 모형화 및 해법 개발에 주력해 왔다.

각 부분 문제는 분리할 수 없는 하나의 일관성 있는 생산 계획 문제로 해를 구할 수 있어야 한다. 하나의 문제도 보고 생산 계획의 문제를 모형화할 경우 0-1 비선형 혼합 정수 계획문제로 모형화가 가능하다. 그러나 제약식에 부품 선정 변수와 부하 할당 변수가 곁해진 2차원 제약식이 포함됨으로써 해를 구하기가 어려워진다.

부분 문제로 나누어 모형화해서 해를 구하게 되는 경우에도 부품 선정 문제를 모형화하게 되면 부하 할당 문제에서 해결해야 할 문제가 제약 조건으로 포함되어 있음을 볼 수 있다. 따라서 이를 해결해 줄 수 있는 전략적인 해결책이 제시되어야 한다.

일정 계획의 결과로서 makespan이나 가동율등의 시스템의 수행도 값을 구하게 된다. 따라서 상위 단계에서의 생산 계획 문제의 해만으로는 시스템의 수행도 값을 알 수 없어 바람직한 해를 구하였는지를 판단하기 어렵다.

기존의 연구의 생산 계획 문제에는 FMS의 실제 운영시의 문제점으로 대기 효과(congestion effect)를 고려하지 않아 배치의 가용 시간내에 생산 불가능한 해를 구하기가 쉽다.

본 연구에서는 이상의 문제점들을 해결하기 위해서 다음과 같은 2가지 해결 전략을 수립하였다.

먼저 단계적 접근 방법에 의한 일관성 있는 부분 문제로 나누어 모형화 하였으며 각 부분 문제로 실시간내에 해를 구할 수 있는 해법을 제시한다. 각 부분 문제간에 존재하는 유기적인 관계를 고려하여 다중 loop방식으로 시스템 전체의 해를 개선해 나갔다.

해법 전략 1

- (1) 공정 경로 결정 문제 : 고려대상이 되는 모든 주문(order)에 대하여 각 주문 별로 공정 경로 선택

- 대안 1 : 가공 시간 최소화
- 대안 2 : 공정 부하 균형화
- 대안 3 : w/s간 이동 최소화

- (2) 부품 선정 문제 : 선택된 공정 경로를 사용해서 다음 배치의 생산량을 잠정적으로 결정

- 대안 1 : 동일 주문은 한 배치내에 생산
- 대안 2 : 동일 주문은 배치별로 나누어 생산 가능

- (3) 부하 할당 문제 : 잠정 결정된 주문들을 w/s에 할당하여 공구 메거진 용량을 초과하는 경우에는 장차 가능한 w/s으로 부하를 옮겨 조정한다. 만일 조정이 불가능한 경우 제외시켜야 할 주문을 결정한다.

- (4) w/s의 가동률 추정 : 선정된 부품의 생산량 및 route를 이용하여 w/s의 가동률 추정

- (5) 일정 계획 문제 : MPS(minimal part set)를 구성하여 makespan이 최소화되는 해법을 제시한다. 만일 makespan이 w/s의 가용 시간을 초과한 경우에는 가동률만큼으로 w/s의 가용 시간을 조종하고 (2)로 되돌아 간다.

해법 전략 2

- (1) 부품 선정 문제 : 각 w/s이 동종으로 이루어진 하나의 시스템으로 간주하여 주문(order)을 선정한다.

- 대안 1 : 동일 주문은 동일 배치에 생산
- 대안 2 : 동일 주문도 배치별로 분할 생산 가능

- (2) 부하 할당 문제 : 선정된 주문들의 각 공정들을 각 w/s에 할당한다.

- 대안 1 : 가공 시간 최소화
- 대안 2 : 공정 부하 균형화
- 대안 3 : w/s간 이동 최소화

- (3) 부하 조정 문제 : (2)에서 불가능해가 존재할 경우에 제거 대상의 주문을 선정하여 (2)로 돌아간다.

- (4) w/s의 가동률 추정 : 전략 1과 동일

- (5) 일정 계획 문제 : 전략 1과 동일

3. FMSDS의 개요

FMSDS는 Flexible Manufacturing Systems Decision Support System의 머리 글자로 된 것이다. FMSDS의 범위는 생산 주문 file을 입력으로 하여 매일 혹은 shift단위의 배치 생산량을 결정하고, 결정된 주문별로 각 공정(operation)을 w/s에 할당하여 구체적인 일정계획을 작성하는 것이다.

FMSDS의 주요 기능은 크게 4가지로 나누어 볼 수 있다.

1) 생산 계획 기능

- 당일의 생산 주문 종류 및 수량
- 선정된 주문의 route
- 소요 공구 및 수량
- 공구 및 공정들의 w/s에 할당

2) 일정 계획 기능

- 선정된 주문들의 시스템 내 투입 순서
- 각 부품들의 w/s별 가공 시작 시간 및 완료 시간

3) 시뮬레이션 기능

- 주문 도착 혹은 대일정계획표(master production schedule) 발생기
- 대안별 시스템 수행도 값 수집 및 비교

4) 데이터 베이스 관리 기능

- 생산 주문 file, 부품 route file, 공구 file, 작업장 file, 기타 자원 file의 유지 관리

FMSDS의 전체가 되는 대상 FMS의 구조 및 운영 방식에 대한 전체는 다음과 같다.

- FMS의 Layout은 주어져 있으며 어떤 형태의 Layout도 가능하다.
- 공구 메거진의 용량 제한이 있다.
- FMS를 구성하고 있는 w/s들은 동종의 하나 이상의 NC 혹은 CNC 기계로 구성되어 있으며 자동 공구 교환 장치(ATC)와 자동 팔레트 교환 장치(APC)가 있어서 w/s에서의 준비시간(setup time)은 없는 것으로 간주한다.

- 공구 저장소와 w/s간의 공구 자동 운반 장치는 없으며 매 배치별로 필요로 하는 모든 공구를 장착하여야 한다.
- 동일 공구가 복수개 장착 가능하다.
- 가공 작업 시간은 확정적(deterministic)이며 w/s간 이동 시간의 자재 이송 장치의 속도 및 w/s간 거리에 따라 결정된다.
- 각 공정에서는 작업 중 preemption이 허용되지 않는다.
- 작업 공정은 여러 개의 w/s에서 가능하며 w/s별로 작업 효율이 상이하다.
- 작업중 기계 고장은 없는 것으로 간주한다.

FMSDS의 전체적인 구조 및 흐름도를 그림 1에 제시하였다.

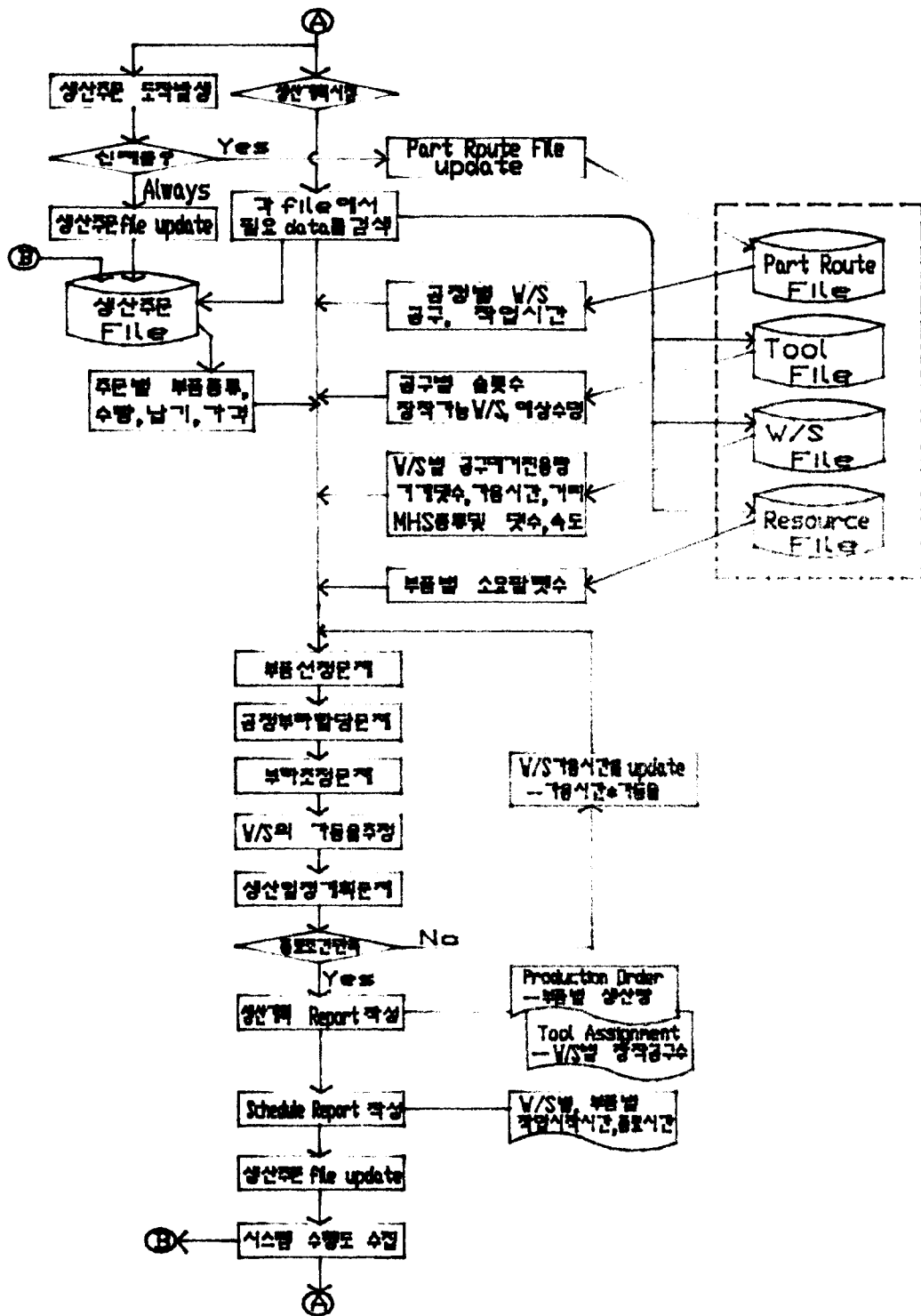
FMSDS에 기본적으로 사용되고 있는 두 가지 용어를 정의하고자 한다.

- 부품(part type) : 동일한 가공 공정 순서(route)를 갖는 가공 대상품
부품의 속성 : (부품명, 가격, 공정수, 공정별 할당 가능 w/s수, 공정별 w/s별 가공 시간, 공정별 사용 공구 번호)
- 주문(order) : 동일한 납기(due date)를 갖는 동종의 부품 집합
주문의 속성 : (부품의 종류, 수량, 납기)

(예)

주문자	부품 종류	수량	납기
A	PT001	10	10
	PT002	15	5
B	PT001	10	6
	PT002	20	5
	PT003	5	7

주문	부품 종류	수량	납기
OD001	PT001	10 10	
OD002	PT001	10	6
OD003	PT002	35	5
OD004	PT003	5	7



<그림 1> FMSDS의 구조 및 흐름도

4. 부분 문제의 모형화 및 해법

본 장에서는 전략 2에 국한시켜서 각 부분 문제를 모형화하여 각각에 대한 해법을 제시하기로 한다.

4.1 부품 선정 문제 (Part Type Selection Problem)

부품 선정 문제는 각 w/s를 개별로 보지 않고 pooling된 하나의 시스템으로 간주하여 제약 조건을 만족하는 주문별 수량 및 소요 공구 번호를 결정한다.

(1) 하나의 주문은 동일 배치에 생산해야 하는 경우

이러한 경우의 부품 선정 문제는 다음과 같이 0-1 정수 계획으로 모형화된다.

목적 함수에 사용된 가중치는 가격/납기의 함수로 표현하였다. 가격이 높은 것과 납기가 짧은 주문을 우선적으로 선정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \text{[PTSP1] Maximize } & \sum_i w_i x_i \\
 \text{s.t. } & \sum_i t_i q_i x_i \leq T & (1) \\
 & \sum_j g_j y_j \leq TS & (2) \\
 & a_{ij} x_i \leq y_j \text{ for all } i \& j & (3) \\
 & x_i, y_j = 0 \text{ or } 1 & (4)
 \end{aligned}$$

- 단, i : 주문 index
 j : 공구 index
 k : w/s index
 T : 전체 시스템의 총 가용시간 ($= \sum_k T_k$)
 TS : 전체 시스템의 공구 메거진 용량 ($= \sum_k TS_k$)
 q_i : 주문 i 의 생산 요구량
 t_i : 주문 i 의 총 가공 시간
 w_i : 주문 i 의 가중치 ($= p_i/d_i$)
 p_i : 주문 i 의 단위당 가격
 d_i : 주문 i 의 납기
 g_j : 공구 j 의 공구 슬롯 소요량
- $$x_i = \begin{cases} 1 & \text{if order } i \text{ is selected} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
- $$y_j = \begin{cases} 1 & \text{if tool } j \text{ is selected} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
- $$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if order } i \text{ needs tool } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

상기의 0-1 정수 계획 문제의 해법은 다음과 같다. 제약식 (4)를 Lagrangian Relaxation시키게 되면

$$\begin{aligned}
 \text{[LR] Minimize } & \sum_i \sum_j (\lambda_{ij}) x_i - \sum_i \sum_j \lambda_{ij} y_j \\
 \text{s.t. } & (1), (2), (4)
 \end{aligned}$$

과 같이 된다.

위의 [LR]은 2개의 독립적인 Knapsack 문제로 볼 수 있다. 따라서 효율적인 Knapsack 문제에 기초한 subgradient 해법에 의해 최적해를 구할 수 있다. 그러나 Knapsack 문제는 NP-Complete 문제로 알려져 있어 다음과 같은 발견적인 해법을 제시하였다.

단계 1 : 가용시간을 제약 조건으로 하는 Knapsack 문제를 풀어서 부품 x_i 값을 구한다.

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } & w_i x_i \\
 \text{s.t. } & \sum_i t_i q_i x_i \leq T
 \end{aligned}$$

단계 2 : 선정된 부품 ($x_i = 1$ 인 i) 별로 필요로 하는 공구 번호를 선정한다.

단계 3 : 선정된 공구들로 인하여 공구 메거진 용량을 초과하는지를 확인한다. 공구 메거진 용량을 초과하지 않으면 단계 6으로 간다. 그렇지 않으면 다음 단계로 간다.

단계 4 : 선정된 주문중에서 다음 과정을 통하여 제거해야 할 주문 i^* 를 선정한다.

$$i^* = \arg \min \left\{ w_i / AST_i \mid x_i = 1 \right\}$$

단, AST_i : 주문 i 로 인하여 추가된 공구 slot수

단계 5 : $x(i^*) = 0$ 으로 놓고 단계 2로 되돌아 간다.

단계 6 : $x(i) = 0$ 인 주문중에서 새로 포함시킬 수 있는지 확인한다. 포함시킬 수 있는 주문이 있으면 단계 6의 과정을 계속한다. 그렇지 않을 경우 끝낸다.

(2) 하나의 주문을 배치별로 나누어 생산 가능한 경우

다음과 같이 0-1 혼합 정수 계획 모형으로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\text{[PTSP2] Maximize } & \sum_i w_i x_i \\
\text{s.t. } & \sum_i t_i x_i \leq T \quad (1)' \\
& \sum_j g_j y_j \leq TS \quad (2)' \\
& x_i \leq M y_j \text{ for all } i \& j \quad (3)' \\
& y_j = 0 \text{ or } 1 \quad (4)'
\end{aligned}$$

단 M은 큰 수로서 주문 요구량 q_i 중에서 최대값이 된다.

이 경우에는 x_i 값은 0-1의 정수로 보지 않고 실수로 볼 수 있다. (1)의 경우처럼 Lagrangian Relaxation을 수행하면 하나의 IP문제와 하나의 Knapsack 문제로 나누어 볼 수 있다. 따라서 Subgradient Optimization 기법으로 해를 구할 수 있다.

실시간내에 구할 수 있는 발견적 해법을 (1)의 해법에서 단계 1을 Knapsack 문제에서 LP문제로 바꾸어 풀면 된다.

4.2 부하 할당 문제 (Loading Problem)

부하 할당 문제는 부품 선정 문제에서 선정된 주문 w_i 의 각 공정을 할당 가능한 w/s에 할당하게 된다. 하나의 공정에는 할당 가능한 w/s이 다수 존재하기 때문에 다양한 공정 경로(route)가 존재할 수 있으나 목적 함수에 따라 각 주문의 단일 공정 경로를 선정하게 된다.

다음 3가지의 부하 할당 목적으로 나누어 부하 할당 문제를 해결하고 비교하고자 한다.

- 총 가공 시간 최소화
- w/s간 부하 균형화
- w/s간 부품 이동 최소화

부하 할당 문제의 제약 조건은 w/s별 가용 시간 제약과 공구 메거진 용량 제약이다.

(1) 총 가공 시간 최소화

부하 할당 목적이 총 가공 시간 최소화의 경우에는 상기의 부품 선정 문제에서 선택된 공구별로 할당 가능한 w/s에서 작업 시간들을 계산한다. 이것을 이용하여 공구들을 각 w/s에 할당하게 되는데 이는 각 주문의 공정들을 각 w/s에 할당하는 것과 같다. 제약 조건을 만족하는 최단 경로의 문제로 볼 수도 있다.

t_{ik} 를 주문 i 의 1번째 공정이 k 라는 w/s에서의 작업 시간일 경우 공구 t 가 w/s k 에서의 가공 시간 t_{jk} 는 다음과 같다.

$$t_{jk} = \sum_i \sum_t q_i t_{ik}$$

$$\text{단, } i' = \left\{ i \mid a_{ij} = 1 \right\}$$

$$l' = \left\{ l \mid TLNO_{il} = j \right\}$$

$TLNO_{il}$ 은 주문 i 의 1번째 공정에 쓰이는 공구 번호

정수 계획 문제로 다음과 같이 모형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\text{[LDP1] Minimize } & \sum_k \sum_j t_{jk} z_{jk} \\
\text{s.t. } & \sum_j t_{jk} z_{jk} \leq T_k \text{ for all } k \quad (5) \\
& \sum_j g_j z_{jk} \leq TS_k \text{ for all } k \quad (6) \\
& \sum_k z_{jk} = 1 \text{ for all } j \quad (7) \\
& z_{jk} = 0 \text{ or } 1 \quad (8)
\end{aligned}$$

단, t_{jk} : 공구 j 가 w/s k 에서의 사용 시간

$$z_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{if tool } j \text{ is assigned w/s } k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

g_j : 공구 j 의 소요 슬롯 수

T_k : w/s k 의 가용 시간

TS_k : w/s k 의 공구 메거진 용량

상기 문제는 두 가지 속성을 갖는 generalized assignment problem(GAP)으로 볼 수 있다. 단일 속성을 갖는 generalized assignment의 문제의 경우 Lagrangian Relaxation에 기초한 효율적인 해법들이 개발되고 있으나 기본적으로 분지 한계 기법이 사용되고 있다. 더구나 두 가지 속성의 GAP문제는 단일 속성의 GAP보다 큰 Complexity 문제를 수반한다.

여기에서는 다음과 같은 발견적 해법을 사용하였다.

단계 1 : 공구에 할당된 평균 가공 시간의 nonincreasing 순서로 공구를 정렬한다.

단계 2 : 평균 가공 시간이 동일한 경우에는 공구의 소요 슬롯의 nonincreasing 순서로 정렬한다.

단계 3 : w/s의 공구 매거진의 용량이 여유가 있고 가공 시간의 여유가 있을 경우에는 가공 시간이 가장 작은 w/s에 할당한다.

단계 4 : w/s의 가용 시간을 초과하거나 공구 매거진의 용량을 초과한 경우에는 infeasible한 경우이다. 이러한 경우 가공 시간이 적은 w/s에 가할당하고 부하 조정 문제로 간다.

선행 연구들에 의하면 부하를 균형화함으로써 일정 계획에서의 makespan이나 cycle time을 최소화할 수 있음을 제시하였다.

부하 균형화는 각 w/s에 할당된 한 기계당 부하량을 균형화하는 것이다. w/s k에 할당된 부하는 다음과 같이 표현된다.

$$w_k = \sum_j t_{jk} z_{jk} / M_k$$

M_k : w/s k의 기계 대수

이를 이용하여 부하 균형을 목적으로 하는 모형화는 다음과 같다.

$$[LDP2] \quad \text{Min} \quad \sum_{l=1} \sum_{k=l+1} |w_l - w_k|$$

s.t. (5), (6), (7), (8)

위에서 본 것처럼 목적 함수 식에 비선형 항목이 들어 있어서 일반 IP code에서 해를 구하기 위해서는 목적 함수의 선형화가 선행되어야 한다.

Stecke가 제시한 방법에 의해 선형화하면 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$[LDP2] \quad \text{Min} \quad z = \sum_{l=1} \sum_{k=l+1} |w_l - w_k|$$

$$= (K-1)w_1 + (K-3)w_3 + \dots + [K-(2K-1)]w_K$$

s.t. (5), (6), (7), (8)

$$w_l > w_k \text{ for all } i \& j$$

such that $l < k$ (9)

이러한 경우 최대로 $\sum_i J_i + \frac{K(K+3)}{2}$ 의 제약식이

증가하게 되어 현실적인 문제를 해결하기 어려워진다. (단, J_i 는 주문 i 가 필요로 하는 공구 수이고 K 는 w/s 수이다.)

따라서 다음과 같은 발견적 해법을 제시하였다.

단계 1 : 공구에 할당된 평균 가동 시간의 nonincreasing 순서로 공구를 정렬한다.

단계 2 : 평균 가공 시간이 동일한 경우에는 공구의 소요 슬롯의 nonincreasing 순서로 정렬한다.

단계 3 : w/s의 공구 매거진의 용량이 여유가 있고 가공 시간의 여유가 있을 경우에는 그 w/s의 workload와 현 공구의 가공 시간의 합이 가장 작은 w/s에 할당한다.

$$k^* = \arg \min \left\{ w_k + t_{jk}, w_k + t_{jk} \leq T_k, \right. \\ \left. s_k + g_j \leq TS_k \right\}$$

단, w_k : w/s k의 현재까지 할당된 workload
 s_k : w/s k의 현재까지 할당된 공구 슬롯 수

단계 4 : w/s의 가용 시간을 초과하거나 공구 매거진의 용량을 초과한 경우에는 infeasible한 경우이다. 이러한 경우 가공 시간이 적은 w/s에 가할당하고 부하 조정 문제로 간다.

w/s간 부품 이동의 최소화를 목적으로 하는 경우에는 각 주문의 공정에 소요되는 공구가 정해져 있으므로 공구를 w/s에 할당하는 문제로 변형시키면 해를 구할 수 없다. 따라서 다음과 같이 모형화할 수 있다.

(3) w/s간 부품 이동의 최소화

$$z_{ilk} - z_{ij+1,k} = 0 : \text{부품 } i \text{의 공정 } l \text{와 공정 } l+1 \text{가}$$

동일 w/s에서 수행되는 경우

$$= 1 : \text{그렇지 않은 경우}$$

$$[LDP3] \quad \text{N} = \sum_i \sum_{l \in L_i} \sum_k |z_{ilk} - z_{ij+1,k}|$$

s.t. $\sum_k z_{ilk} = 1$ for all $i \& l$ (10)

$\in L_i$

$$\sum_i \sum_l t_{ilk} z_{ilk} \leq T_k \text{ for all } k \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_l s_{il} z_{ilk} \leq TS_k \text{ for all } k \quad (12)$$

$$z_{ilk} = 0 \text{ or } 1 \quad (13)$$

단, t_{ilk} : 부품 i 의 l 번째 공정을 w/s k 에서 가공할 경우 가공 시간

s_{il} : 부품 i 의 l 번째 공정에 소요되는 공구의

소요 슬롯 수

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{if operation } j \text{ of part } i \text{ is performed at } w/s \text{ } k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

L_i : 주문 i 의 공정들의 집합

이 문제도 부하 평균화의 경우와 마찬가지로의 Complexity를 보이고 있다. 따라서 다음과 같은 발견적 해법이 개발되었다.

단계 1 : 선택된 모든 주문들의 가공 경로 순서를 다음과 같이 결정한다.

- 1) 동일 w/s의 공구 메거진 용량을 초과하지 않는 연속적으로 수행가능한 최대의 공정수로 이루어진 maximal operation set를 구성하고 전체 공정에서 제외시킨다.
- 2) 상기의 과정을 반복하여 공정이 모두 할당될 때까지 수행한다.

단계 2 : 단계 1에서 결정된 가공 경로 순서를 이용하여 각 w/s의 가용 시간 및 공구 메거진 용량을 초과했는지를 조사한다. 초과한 경우에는 단계 3으로 간다. 그렇지 않은 경우에는 최적해이므로 끝낸다.

단계 3 : 분지 한계 기법에 의하여 생산 대상 부품을 확정한다.

상기의 부하 할당 문제는 부품 선정 문제에서의 제약 조건을 현실화 시켰기 때문에 infeasible한 경우가 발생할 수 있다. 1) 총 가공 시간 최소화 2) w/s 간 부하 균형화의 경우에 다음과 같이 부하를 조정한다.

부하 할당 문제의 2가지 제약 조건 중에서 1) 가용 시간 제약 조건을 위반한 경우와 2) 공구 메거진 용량 제약을 위반한 경우로 나누어서 각각의 주문량을 조정하게 되고 다시 부하 할당 문제로 되돌아 간다.

- (1) 가용 시간 제약 조건 위반 : 부하 할당 문제에서 가할당된 공구를 필요로 하는 부품중에서 다음의 비율 값이 가장 작은 주문을 정하여 이 부품의 생산량을 0으로 조정한다. 그리고 부하 할당 문제로 되돌아 간다.

$$i^* = \arg \min w_i / p_i$$

단, i 는 가할당된 공구를 필요로 하는 부품
 w_i : 부품 i 의 가중치
 p_i : 부품 i 에 의해 가할당된 총 작업 시간

- (2) 공구 메거진 용량 제약 : 부하 할당 문제에서 가할당된 공구를 필요로 하는 부품중에서 다음의 비율 값이 가장 작은 부품을 정하여 이 부품의 생산량을 0으로 조정한다. 그리고 부하 할당 문제로 되돌아 간다.

$$i^* = \arg \min w_i / a_i$$

단, i 는 가할당된 공구를 필요로 하는 부품
 a_i : 부품 i 에 의해 추가되는 공구 슬롯 수

5. 전략 II의 실행 예제

5.1 대상 FMS 소개

본 장에서는 4장에서 설명된 해법들을 이용하여 각각의 대안별 결과를 제시하여 비교해 보기로 한다. 본 실행 예제에서 사용된 FMS 자료들을 살펴보기로 한다.

w/s에 대한 자료는 <표1>과 같다. w/s은 5개로 이루어져 있으며 각 w/s은 1대의 머시닝 센터로 이루어져 있고 각 w/s의 공구 메거진 용량은 20개로 동일하다.

<표 1> Work Station 자료

구분 w/s	기계 대수	공구 메거 진 용량	일별 가용 시간(분)	이용율 하한값
1	1	20	1440	0.8
2	1	20	1440	0.8
3	1	20	1440	0.8
4	1	20	1440	0.8
5	1	20	1440	0.8

대상 FMS에서는 15가지의 부품 종류를 가공할 수 있으며 각 부품들은 10개의 공정으로 이루어져 있고 각 부품들의 가공 시간 평균치가 <표 2>에 주어져 있다. 각 w/s별 공정별 가공 시간 자료, 공정별 공구 자료들을 본문에 제시하지 않았다.

<표 2> FMS 가공 대상 부품 특성

구분 부품	공정수	평균가공시간 (분)	가격 (\$)
1	10	60.1	100
2	10	52.9	120
3	10	73.6	200
4	10	32.1	150
5	10	49.6	70
6	10	46.8	300
7	10	68.1	220
8	10	63.5	200
9	10	38.6	120
10	10	47.7	150
11	10	44.8	100
12	10	50.2	230
13	10	33.9	140
14	10	76.9	200
15	10	53.8	150

현재 시점에서 다음의 배치의 생산량을 결정하고 부하를 할당하고 일정 계획을 수립하기 위한 주문 자료가 <표 3>에 나타나 있다. 20개의 주문이 있으며 각각에 해당되는 부품 종류, 생산량 요구량, 납기 등이 나타나 있다.

<표 3> 주문 file 자료

주문 번호	부품 종류	생산량	납기(일)
OD001	PT001	30	10
OD002	PT001	20	15
OD003	PT002	20	5
OD004	PT002	10	10
OD005	PT003	15	5
OD006	PT004	20	11
OD007	PT005	5	3
OD008	PT006	15	25
OD009	PT007	10	30
OD010	PT008	20	7
OD011	PT009	10	1
OD012	PT009	10	10
OD013	PT009	15	20
OD014	PT010	10	3
OD015	PT011	10	6
OD016	PT012	2	2
OD017	PT013	20	10
OD018	PT014	19	5
OD019	PT014	11	12
OD020	PT015	7	16

5.2 계산 결과

(1) PTSP의 결과

본 실험 예제에서는 동일 배치에 생산해야 하는 경우와 배치별 분할 생산 가능한 경우 동일한 결과를 보여 주고 있다.

<표 4> 동일 주문은 동일 배치에 생산시의 PTSP 결과

주문	부품 종류	생산량	가격(\$)	납기
OD003	PT002	20	120	5
OD005	PT003	15	200	5
OD010	PT008	20	200	7
OD011	PT009	10	120	1
OD014	PT010	10	150	3
OD017	PT013	20	140	10
OD018	PT014	19	200	5
계			114	

<표 5> 동일 주문을 다른 배치로 분할 생산 가능시의 PTSP의 결과

주문	부품 종류	생산량	가격(\$)	납기
OD003	PT002	20	120	5
OD005	PT003	25	200	5
OD010	PT008	20	200	7
OD011	PT009	10	120	1
OD014	PT010	10	150	3
OD017	PT013	20	140	10
OD018	PT014	19	200	5
계			114	

(2) 부하 할당 및 부하 조정 결과

부하 할당 및 부하 조정 결과를 <표 6>, <표 7>에 제시하였다. 결과를 보면 부하 균형화일 경우가 가장 많은 생산량이 선택됨을 보여 주고 있다.

<표 6> 동일 배치내 생산의 경우

주문	부품 종류	총가공시간 최소화	부하 균형화	기계간이동 최소화
OD003	PT002	20	20	20
OD005	PT003	15	15	15
OD010	PT008	20	20	-
OD011	PT009	-	10	10
OD014	PT010	10	10	10
OD017	PT013	20	20	-
OD018	PT014	19	19	19
계		104	114	74

<표 7> 분할 생산의 경우 생산량

<표 7> 분할 생산의 경우 생산량

주문	부품종류	총가공시간 최소화	부하 균형화	기계간이동 최소화
OD003	PT002	20	20	20
OD005	PT003	15	15	15
OD010	PT008	20	20	-
OD011	PT009	10	10	10
OD014	PT010	-	10	10
OD017	PT013	20	20	-
OD018	PT014	19	19	19
계		104	114	74

부하 균형화의 경우 각 w/s별로 할당된 공구 번호들을 <표 8>에 나타내었으며, routing 결과를 <표 9>에 나타내었다.

<표 8> 공구 할당 결과 : 부하 균형화의 경우(분할 생산)

	할 당 된 공구	갯 수
W/S 01	16,19,20,26,29,53,55,71,78,82,84,91,100	13
W/S 02	17,18,23,25,54,73,76,77,80,89,92,94,97	13
W/S 03	13,24,30,35,44,45,64,68,72,79,81,87,96,98	14
W/S 04	14,21,22,27,33,47,65,66,67,69,74,86,95	13
W/S 05	11,12,15,28,34,46,63,75,83,85,88,90,93,99	14

<표 9> routing 결과 : 부하 균형화의 경우(분할 생산)

종류할당	공정번호	주문 번호 부품				
		W/S 01	W/S 02	W/S 03	W/S 04	W/S 05
OD003	PT002	6,9,10	7,8	3	4	1,2
OD005	PT003	6,9	3,5	4,10	1,2,7	8
OD010	PT008	1,8	3,6,7,10	2,9	4	5
OD011	PT009	2,4	9	1,7	6	3,5,8,10
OD014	PT010	1,10	2,4,7	6,8	5	3,9
OD017	PT013	4,6	5	3,8	1,9,10	2,7
OD018	PT014	9	-	1,2,5,7	4,8	3,10

6. 결론 및 추후 연구 과제

본 연구에서는 FMS의 생산 계획 및 일정 계획 문제를 계층적으로 부분 문제를 나누고 각 부분 문제간의 유기적인 관계들을 고려하여 다중 loop방식의 해결 방법을 제시하였다.

또한 크게 2가지 전략으로 나누어 해결을 시도하였다. 전략 1은 대상 주문들의 공정 순서를 결정한 다음 부품을 선정하고 부하 할당하는 순서를 채택하였다. 전략 2에서는 단순화 시스템으로 간주하여 부품 선정 문제를 풀고, 현실적인 제약 조건을 고려하여 부하 할당 문제를 해결한다.

본 연구에서는 전략 2를 중심으로 각 부분 문제들을 모형화하고 유기적 관계를 고려한 해법들이 제시되었으며 그에 따른 계산 사례를 보였다. 그러나 일정 계획의 결과는 제시되지 않았다.

비교적 짧은 시간내에 원하는 결과들을 보여주고 있다.

구상중인 FMSDS가 완전히 완성된 상태가 아니어서 부분적으로 완성된 결과를 보여준 것이다.

따라서 다음 연구는 전략 1의 부분적인 보완 작업과 각 전략과 대안별로 시뮬레이션에 의한 수행도 값들을 수집하고 비교하여 분석함으로써 보다 나은 생산 계획 및 일정 계획을 위한 의사 결정 지원 시스템이 될 수 있을 것이다.

또한 과거 일부 시도되었던 종합적인 연구들과의 결과 비교도 수행되어야 할 것이다.

각 부분 문제들의 현실적인 해법으로서 주로 발견적인 해법에 의존하였는바 최적해를 구하기 위한 알고리즘 개발과 각 부분 문제간의 interface를 용이하게 할 수 있는 방법 개발이 추후 연구 과제이다.

참 고 문 헌

(영문)

1. Bastos, J.M., "Batching and Routing : Two Functions in the Operational Planning of Flexible Manufacturing Systems.", *Erop. J. Oprl. Res.*, Vol.33, 1988, 230-244.
2. Ben-Arieh, d., Moodie, D.L., and Nof, S.Y., "Knowledge Based Control System for

Automated Production and Assembly.", *Toward the Factory of the Future*, 1985, 285-293.

3. Berrada, M. and Stecke, K.E., "A Branch and Bound Approach for Machine Load Balancing in Flexible manufacturing Systems.", *Mgmt.Sci.*, Vol.32, No.10, 1986.
4. Chakravarty, A.K. and Shtub, A., "Selecting Parts and Loading Flexible Manufacturing Systems.", *Proceedings of the 1st ORSA/TIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems*, University of Michigan, 1984.
5. Chang, Y.L., Sullivan, R.S. and Bagchi, U., "Experimental Investigation of Quasi- Realtime Scheduling in Flexible Manufacturing Systems.", *Proceedings of the 1st ORSA/TIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems*, University of Michigan, 1984.
6. Chen, F.R., *An Integrated Production Planning System for Flexible Manufacturing*. Ph.D Thesis, Univ. of Missouri-Columbia, 1988.
7. Dar-El, E.M., and Sarin, S.C., "Scheduling Parts in FMS to Achieve Maximum Machine Utilization.", *Proceedings of the 1st ORSA/TIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems*, University of Michigan, 1984.
8. Escudero, L.F., "A Production Planning Problem in FMS.", *Annals of O.R.*, Vol.17, 1989, 169-104.
9. Fox, M.S., and Smith, S.F., "ISIS - A Knowledge-based System for Factory Scheduling.", *Expert Systems*, Vol.1, No.1, 1984, 25-49.
10. Hwang, S.S., "A Constraint-Directed Method to Solve the Part Selection Problem in Flexible Manufacturing Systems Planning Stage.", *Proceedings of the 2nd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing systems*, Elsevier, 1986.
11. Hwang, S.S., and Santikumar, J.G., *An FMS Production Planning System and Evaluation of*

- Part Selection Approaches., Working Paper, Dept. of Management Science, U.C. Berkley, 1987.
12. Iwata, K., Murotsu, A., Oba, F., Yasuda, K. and Okamura, K., "Production Scheduling of Flexible Manufacturing Systems.", *Annals of CIRP*, Vol.31.No.1, 1982.
 13. Kimemia, J. and Gershin, S.B., "An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System.", *IIE Trans.*, Vol.15, No.4. 1983, 353-361.
 14. Kusiak, A., "The Part Families Problem in Flexible Manufacturing Systems.", *Proceedings of the 1st ORSA/TIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems*, University of Michigan, 1984.
 15. Kusiak, A., "Loading Models in Flexible Manufacturing Systems.", *Flexible Manufacturing Systems*. edited by A. Rouf, and S.I. Ahmad, Elsevier, 1985.
 16. Nakamura, N. and Shingu, T., "Scheduling of Flexible Manufacturing Systems.", *Toward the Factory of the Future*, 1985, 147-152.
 17. Nof, S.Y., Barash, M.M. and Solberg, J.J., "Operational Control of Item Flow in Versatile Manufacturing Systems.", *Int. J. Prod. Res.*, Vol.17, No.5, 1979, 479-489.
 18. Rajagopalan, S., "Formulation and Heuristic Solutions for Parts Grouping and Tool Loading in Flexible Manufacturing Systems.", *Proceedings of the 2nd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing systems*, Elsevier, 1986.
 19. Sarin, S.C., and Chen, C.S., "The Machine Loading and Allocation Problem in a Flexible Manufacturing System.", *Int. J. Prod. Res.*, Vol.25, No.7, 1987, 1087-1094.
 20. Sarin, S.C. and Dar-El, E.M., "Approaches to the Scheduling Problem in FMS.", *Industrial Engineering Conference Proceeding*, 1984.
 21. Shaw, M.J., and Winston, A.B., "An Artificial Intelligence Approach to the Scheduling of Flexible Manufacturing Systems.", *IIE Trans.*, Vol.21, No.2, 1989, 170-183.
 22. Stecke, K.E. and Solberg, J.J., "Loading and Control Policies for a Flexible Manufacturing System.", *Int. J. Prod. Res.*, Vol.19, No.5, 1981, 481-490.
 23. Stecke, K.E., "Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problem for Flexible Manufacturing Systems.", *Mgmt. Sci.*, Vol.29, No.3, 1983.
 24. Stecke, K.E. and Kim, I., "A Flexible Approach to Implementing the Short-term FMS Planning.", *Proceedings of the 2nd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing systems*, Elsevier, 1986.
 25. Whitney, C.K. and Gaul, T.S., "Sequential Decision Procedures for Batching and Balancing in FMS.", *Proceedings of the 1st ORSA/TIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems*, University of Michigan, 1984.
 26. Wu, S.D., "A Expert System Approach for the Control and Scheduling of Flexible Manufacturing Cells.", Ph.D Thesis, The Pennsylvania State Univ., 1987.
- (국 문)
27. 김 중한, FMS의 실제시간 일정계획을 위한 수리적 의사결정에 관한 연구., 서울대학교 석사학위 논문, 1988.
 28. 박 찬권, 공구장착제약과 대체공정을 고려한 FMS 생산계획기법에 관한 연구., 서울대학교 석사학위 논문, 1988.
 29. 장 성용, FMS의 생산계획에 관한 연구., 서울산업대학 논문집 제28집, 1988.