

FMC 시스템의 스케줄링 및 시뮬레이션

서기성, 이노성, 안인석, 박승규, 이규호, 우광방
연세대학교 전기공학과

Scheduling and Simulation for FMC Systems

Ki Sung Seo, Noh Sung Lee, Ihn Seok Ahn,
Seung Kyu Park, Kyu Ho Lee, Kwang Bang Woo
Department of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract

This paper deals with the scheduling and simulation for FMC(Flexible Manufacturing Cells). In order to achieve CIM, there is a critical need to link factory level and machine level. The primary functions performed by this link for all jobs issued to the shop floor and cell include short-term scheduling and dynamic operational scheduling. Here, hierarchical control structure is introduced to define these functions. And Intelligent scheduling through expert module is adopted for efficiency of FMC operation. Computer Simulation reveals that expert scheduling method is better than heuristics in various performance index.

1. 서론

국내외서 CIM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, factory 레벨에서 CAD(Computer Aided Design), CAPP(Computer Aided Process Planning), MRP (Manufacturing Resource Planning), 그리고 오퍼레이션 레벨에서의 컨트롤러등의 각기 다른 기능을 통합시키는 시도가 행해지고 있다. 더 나아가서 생산시스템의 완전한 통합을 위하여 factory level과 manufacturing level을 연결시켜주는 shop floor와 cell 레벨의 기능 정의 및 구현이 중요한 과제로 대두되고 있다. 이에 따라 shop floor 레벨과 cell 레벨을 스케줄하고 제어하는 FMC(Flexible Manufacturing Cell)의 효율적인 운영 기법에 대한 연구가 시도되고 있다. [1]

그러나 지금까지의 연구는 [2-6] 대부분이 cell 레벨에 대해서는 일부분만 언급하였을뿐, 주로 FMS이상의 상위 레벨을 대상으로 한 것이거나 로봇트 자체 동작만을 고려한것이다. 이 두 레벨을 연결시켜주는 셀 레벨과 셀 레벨을 포함하는 FMC에 대해서는 모델링등의 몇몇 연구를 제외하고는 중요성에 비해 많이 다루어지지 않은 편이었다.

유연한 생산 셀(Flexible Manufacturing Cell)의 운영과 제어는 다중 작업의 특성과 동적으로 변화하는 상태에서 연유되는 수많은 대안들로 인해 매우 복잡한 문제이다. 시스템의 특성상 동적인 실시간 제어가 요구되고 작업의 할당과 경로 설정에 대한 상태공간이 많이 존재하며, 각각에 대해 계층적으로 하위 레벨인 머신 동작 시퀀스의 상태 공간이 변하므로 제어 이론 및 분석적인 방법으로는 이의 스케줄링 및 제어가 매우 힘들다. 또한 돌발 상황과 모델링의 부정확에 따른 문제점, 빈번하게 일어나는 재계획등의 문제가 가로 놓여 있다. 따라서 실제 시스템의 구현에 앞서 이러한 문제점을 분석하고 해결하기 위해서는 지식 베이스형 FMC 운영 기법의 도입이 필요하다. [7-9]

본 연구는 유연한 생산 셀(FMC)에 대한 지식베이스형 스케줄러를 구현하여 FMC의 효율적 운영을 목적으로 한다. 전체 FMC 운영 프로그램은 생산 시스템에 관한 정보의 효과적인 수집 및 관리 기능을 가지며, expert 결정 모듈을 통한 최적 대안 선정, 그리고 다양한 성능 평가 기능을 포함한다. 사례연구로서 유연한 조립 시스템 모델에 대해 지능형 스케줄러와 경험적 규칙에 의한 스케줄링 적용 결과를 비교하였다.

2. FMC 특성 및 모델링

2.1 FMC 정의 및 특성

일반적으로 FMC(Flexible Manufacturing Cells)는 어떤 제조 또는 공정 작업을 수행하기 위하여 집합된 장비들의 그룹인 셀(cell)에 유연성(flexibility)을 부여한 것이다. 즉, FMC는 유연성을 가진 셀 또는 셀의 그룹을 컴퓨터로 제어하여 다품종 소량생산이 효율적으로 수행되도록 하는 일종의 통합 시스템 형태이다.

FMC는 계층화된 생산 시스템 모델에서 shop floor 와 cell 레벨에 해당하며, 그림 1에 각 레벨 기능의 계층적인 관계가 나와 있다.

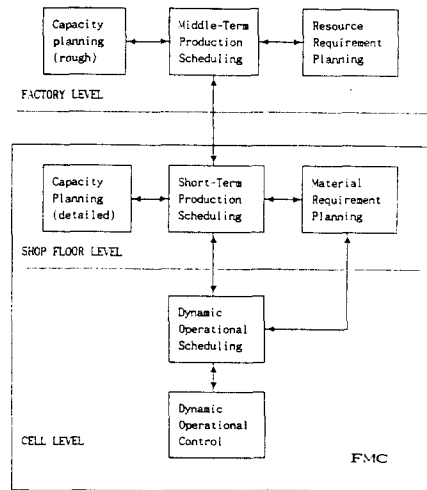


그림 1 생산 시스템의 계층 구조

대상 시스템인 FMC(Flexible Manufacturing Cells)는 다음의 특성을 갖추어야 한다. 시스템은 일반적으로 복수개의 셀로 구성되는데, 셀의 수 및 종류는 생산작업에 따라 확장내지 축소

될 수 있다. 각 셀은 복수개의 기계와 물류 시스템을 갖는 군으로 구성되며, 이것 역시 생산작업의 종류 및 생산량에 따라 가변이다. 각 셀 내에서 수행할 수 있는 작업은 가공 조립 및 검사작업을 포함 한다. 유연성을 위해서 시스템은 n개의 서로 다른 모델(가공품)을 생산할 수 있고 가공품의 유입순서, 머신의 routing, tool과 resource의 할당, 오퍼레이션의 순서등에 따라 계층별로 대안이 존재한다.

2.2 FMC 모델링

FMC의 계층적 관계를 표현하는 기능적인(functional) 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 하나의 FU(function unit)에는 CP(control part)와 OP(operation part)가 존재 한다. CP는 OP에게 지시를 내려주는 supervisor 기능을 담당하며 OP는 CP로부터 명령을 받아 수행하고 작업 결과를 CP에게 보고하는 역할을 맡는다. 그림 2 - 3 에 FMC에 대한 기능적인 측면에서 본 객체 지향 모델링의 예가 나와 있다. 그림 2 는 계층적으로 최상위에 존재하는 복수개의 셀로 구성된 FMC의 기능적 모델이다. CP에 해당하는 셀 코디네이터(coordinator)가 상위 레벨로부터 생산지시(MO: manufacturing order)를 받아 OP에 해당하는 셀 1 과 셀 2 에 작업 지시(JO: operation order)를 전해준다. 셀 1 과 셀 2 는 작업 지시에 따라 정해진 작업을 끝내고 그 결과를 셀 코디네이터에게 보고한다.

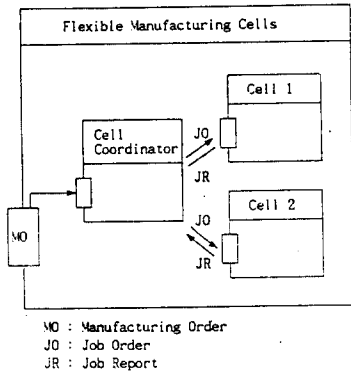


그림 2 FMC의 기능적 모델링

그림 2에는 각 셀에 대한 기능적 모델이 나와 있다. 그림 3 과 마찬가지로 CP에 해당하는 셀 컨트롤러와 OP인 머신과 컨베이어가 존재한다. 셀 컨트롤러는 셀에 내려진 작업 지시를 머신과 컨베이어에 전달하고 이들로부터 작업 결과를 보고 받는다.

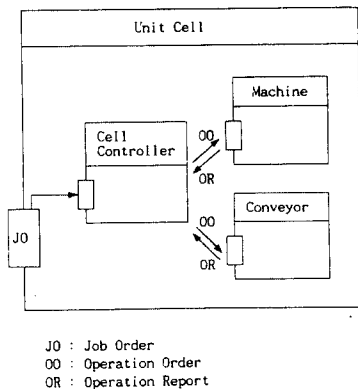


그림 3 셀의 기능적 모델링

3. FMC 운영 구조

3.1 계층적 제어 구조

대상 시스템인 FMC의 효율적인 운영을 위하여 다음과 같은 계층적인 제어 구조를 도입한다. 셀 코디네이터는 FMC의 상위레벨로서 복수개의 셀에 대해 중기 내지는 단기의 생산계획을 수립하고, 가공품의 투입 순서 및 시점을 결정한다.

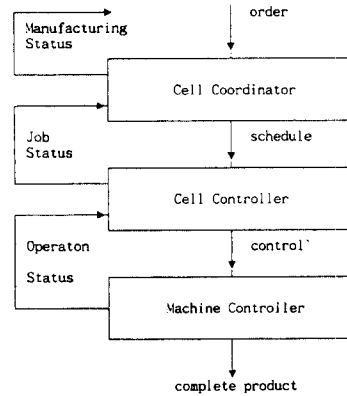


그림 4 계층적 제어

셀 컨트롤러는 상위레벨인 셀 코디네이터로부터 명령을 받아 현재 셀의 상태를 참조하여, 각 머신(로봇)에 대해 가공품을 할당하고 routing 경로를 결정한다. 그리고 가공품이 할당된 머신에 대해서 구체적인 로봇 작업 시퀀스를 발생시킨다. 계층적 제어의 전체 흐름도는 그림 4 와 같다.

3.2 셀 코디네이터

셀 코디네이터는 shop floor 레벨의 스케줄러와 유사한 기능으로서 계층적 제어의 상위구조로서 중기 내지는, 단기의 생산계획을 담당한다. 즉, 데이터베이스의 여러 정보를 참조하고 셀들의 상태를 고려하여 가공품(part)의 유입 시점(introduce time)과 종류를 결정한다.

3.2.1 가공 용량 결정

N 개의 셀이 있는 경우, 셀 i가 가공품 j를 가공(조립)하는 시간을 τ_{ij} 라 하고, w_j 를 주기 T 동안 생산품 j의 누적 생산 요구량이라고 하면, 셀 i가 모든 요구량을 생산하는데 필요한 시간은 주기 T 동안 셀 i가 동작 가능한 시간 T_i 보다 작거나 같다.

$$\tau_{i1}w_1 + \tau_{i2}w_2 + \dots + \tau_{iN}w_N \leq T_i \quad (1)$$

3.2.2 생산율 결정

생산 요구량과 재고량을 고려하여 가공(조립)용량을 만족하는 범위내에서 구간 생산율을 결정한다. 생산계획 수립에 필요한 상태변수를 재고수준과 요구량에 관해 선정하고 생산, 재고, 요구량과의 관계를 나타내기 위한 이산 모델을 식 (2)와 같이 정의하자. 모델은 시스템의 최적 생산계획을 찾기 위한 목적 함수와 상태변수로 나타내진다.

$$x_{k+1} = Ax_k + Buk - Cdk \quad (2)$$

$$Duk \leq ek \quad (3)$$

$$uk \geq 0 \quad (4)$$

여기서, x_k : k번째 주기 시작에서의 재고벡터, u_k : k번째

주기동안의 생산수준, dk : k 번째 주기동안의 생산 요구량 벡터, D : 생산제한 행렬, ek : 생산 capacity 벡터.

최적 제어입력 uk 를 계산하기 위한 목적 함수가 정의되어야 한다. 본 연구에서는 식 (5)와 같이 생산량이 요구량을 초과함으로써 발생하는 생산재고(inventory)와 생산량이 요구량에 미달함으로써 발생하는 주문잔고(backlog)에 의해 유발되는 비용을 목적 함수에 반영한다.

$$J(uk) = [f(x_k) + g(uk)] \quad (5)$$

여기서

$f(.)$: 생산재고 비용

$g(.)$: 주문잔고 비용

결국 증기 내지는, 단기의 생산 계획 수립은 생산 시스템의 어떠한 제약 조건도 위반하지 않는 상황에서 목적 함수 $J(uk)$ 를 최소화 시키는 최적 생산을 uk 를 계산하는 문제로 귀결된다. 그림 5는 총 4주간의 요구량 중 2주간의 요구량이 가공 용량을 초과하도록 데이터를 입력한 경우에 대한 최적 생산을 결과이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 요구량이 가공 용량을 초과하는 2주째 및 4주째의 높은 작업 부하율을 예측하고 이를 경감하기 위해서 1주 및 3주에서의 생산율이 요구율보다 높게 계산되었으며, 이에 따라 2주 및 4주의 생산율도 가공 용량을 만족하고 있다.

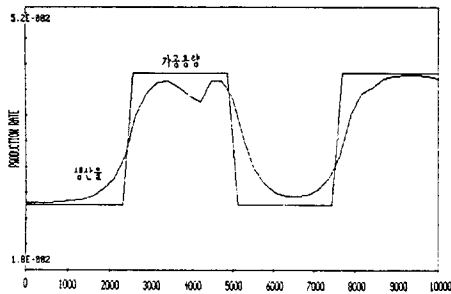


그림 5 계산된 구간별 생산율의 예

3.3 셀 컨트롤러

셀 컨트롤러는 셀 코디네이터에서 작업 지시를 받아 셀을 효율적으로 운영할 수 있는 결정을 수립한다. 제한 조건과 상태 정보를 고려하여, 셀 내에서의 머신의 선택과 머신에서의 tool과 resource의 선정, 그리고 로봇 오퍼레이션 시퀀스 결정을 수행한다.

1) 머신 선택

상위 레벨에서 지시 받은 가공품을 처리하기 위하여, 현재 셀의 상태와 제한 조건등을 고려하여 셀내의 머신을 선택한다.

- 가공 제한 조건 : 머신이 현재 포함하고 있는 tool과 resource에 따른 가공 가능 여부.
- 평균 버퍼 수준 : 현재 버퍼 상태 즉, 가공품의 갯수, 가공품의 남은 가공 시간등을 참조.
- 머신의 고장 : 한 머신이 고장 상태에 있을때 제한 조건을 만족하는 범위내에서 대체 머신의 선택

2) tool과 resource의 선정

각 머신에 가공품이 할당되면, 가공품의 종류에 따라 작업에 필요한 tool과 resource 리스트가 구성된다. 즉, 생산품의 가공(조립)에 필요한 tool(gripper set)을 선택하고 할당된 작업에 대한 resource(washer, nut, screw등)를 선택한다.

3) 오퍼레이션 리스트 결정

가공품의 작업에 필요한 tool과 resource가 결정되면, 가공품의 조립 순서등의 제한 조건과 머신의 상태 정보를 고려하여 머신에서의 작업 시간을 최소화 하는 로봇 오퍼레이션 리스트를 결정한다.

셀 컨트롤러 모듈은 시스템 상태가 변할 때 마다 시스템 상태 화일을 변경한다. 이 화일에는 부품 데이터, 가공품 데이터, 그리고 셀의 상태등과 같은 내용이 저장된다. 시스템 상태 화일을 통해 상위 레벨에 작업 결과와 상태 정보를 보고한다.

4. FMC 를 위한 지능형 스케줄링 시스템

4.1 전체 시스템의 구성

본 연구에서 도입한 계층적 제어 구조에 따른 FMC의 효율적 운영을 위한 지능형 스케줄링 시스템의 전체 구성도가 그림 6에 나와 있다.

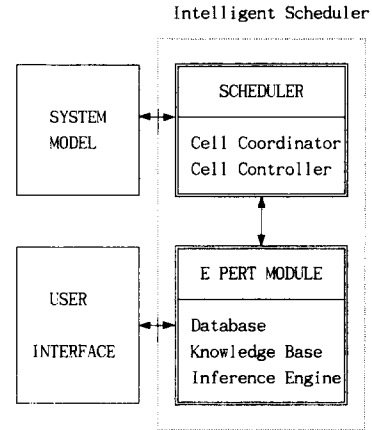


그림 6 FMC를 위한 지능형 스케줄링 시스템

시스템 모델은 전형적인 FMC 모델의 자료구조를 가지고 있으며 cell, workstation, 버퍼, MHS, 컨베이어, tool magazine, 그리고 part, resource등에 대한 정보를 포함한다.

스케줄러는 주어진 시스템 모델에 대해 전문가 모듈에서 데이터베이스와 지식베이스를 추론하여 얻어진 결정 사항을 기반으로 전체 생산 계획을 수립한다. 사용자 인터페이스부분은 입력 및 수정 기능을 제공하고 생산 시스템의 상태 변화와 다양한 정보를 그래픽으로 처리하여 보여주는 역할을 담당한다.

특히 스케줄러와 전문가 모듈을 묶어 지능형 스케줄러(Intelligent Scheduler)라고 칭한다. 지능형 스케줄러는 스케줄러와 전문가 모듈로 구성되며, FMC 시스템의 생산계획을 결정하는 핵심 부분이다. 스케줄러 모듈은 다시 cell coordinator와 cell controller를 포함한다. 또한 expert 모듈은 데이터베이스, 지식베이스, 그리고 추론기관으로 나누어 진다. FMC 제어를 위한 각종 결정과정이 전문가 모듈에서 결정되며 이와같은 결정은 데이터 베이스와 선연 지식 베이스내의 각종정보와 절차 지식베이스내의 관련 규칙들을 바탕으로 이루어진다.

4.2 전문가 모듈

FMC의 스케줄링 및 운영에 핵심 기능을 담당하는 전문가 모듈은 데이터베이스, 지식베이스, 그리고 추론 기관으로 구성되어 있다.

데이터베이스는 생산공정에 필요한 모든 정보를 저장하고 있

으며, 크게 정적 데이터베이스(static database)와 동적 데이터베이스(dynamic database)로 나누어진다. 정적 데이터베이스는 FMC 시스템에서 시간에 따라 변하지 않는 미리 결정된 정보를 저장하고 있다. 예로서, cell의 구조, 머신의 수, 생산 모델의 형태, part 종류, 가공 시간등이 있다. 동적 데이터베이스는 가공 상태, 버퍼 수준, 대기 시간 및 머신의 상태등 생산시스템의 동적인 상태 변화 정보를 저장하고 있다.

지식베이스는 크게 선언 지식베이스(declarative knowledge base)와 절차 지식베이스(Procedural Knowledge Base)로 나누어진다.

선언 지식베이스는 시스템의 상태등을 기술하는 지식으로서, knowledge(또는 fact) 형태로 저장되는 시스템 상태 정보, 전통적인 규칙들을 상황에 맞게 선택하여 사용하는 동적인 dispatching 규칙, 그리고 대상 시스템의 제한 조건을 만족시키고, 특정한 상황에 적용되는 스케줄링 휴리스틱스를 포함한다.

절차 지식베이스는 공정 조건에 따라 스케줄링 및 제어 규칙을 적용시키는데 사용되며 다음과 같은 요소들로 구성된다. 규칙의 특성상 절차 지식은 Meta 규칙과 Primary 규칙으로 나눌수 있다. Meta 규칙은 Primary 규칙이나 다른 Meta 규칙을 제어하는데 쓰이고, Primary 규칙은 직접 문제를 푸는데 사용된다. 본 연구에서 사용한 FMC에 대한 몇가지 규칙의 예가 아래에 나와 있다.

Rule-MS4:

```
IF ((select_machine ?part)(is common ?machines)
    (next_is private ?machine)(is ?othermachine
    available))
THEN (fn_insert ?part ?machine)
```

Rule-OL2:

```
IF ((determine_resource_list ?current_resource
    ?current_tool) (First_task_completed))
THEN (fn_find_job_canbe_done_with_other_tool
    ?current_resource ?current_tool)
```

추론 기관은 매칭 모듈과 실행 모듈로 구성되어 있다. 어떤 주장(assertion)이나 질문이 전문가 시스템에 입력되면 매칭 모듈에 의해 들어온 입력과 매칭되는 전체나 결론을 가진 규칙들이 탐색된다. 선택된 규칙은 실행모듈에 의해서 실행된다. 추론 메카니즘은 전향추론(forward chaining)과 후향추론(backward chaining)을 혼합한 구조이며, 깊이우선 탐색을 행한다.

5. FMC 응용

5.1 단위 셀 구성

FMC에 대한 지능형 스케줄링 시스템을 생산 시스템에 응용하기 위하여 다음과 같은 모형 시스템인 단위 머신 셀과 다중셀 시스템인 유연 조립 생산라인을 검토하였다. 먼저, 단위셀에 대한 구성도가 그림 7에 나와있다.

각 머신 셀은 2 대의 머신(또는 Robot), 부품 공급기, central tool magazine, conveyor 로 구성되며, 가공품(part)인 baseframe 에 resource (Washer, Nut 등)를 insert 또는 screw 하는 작업을 수행한다. 조립될 가공품이 머신 셀에 유입되면, 가공품의 종류 및 현재의 머신들의 상태에 따라 작업할 머신이 선택된다. 가공품의 작업에 필요한 구성 요소 resource 들은 resource supplier 를 통해 공급되며, 머신내의 로봇트는 resource tray 에 있는 resource 를 집어 part 상에 필요한 오퍼레이션을 수행한다.

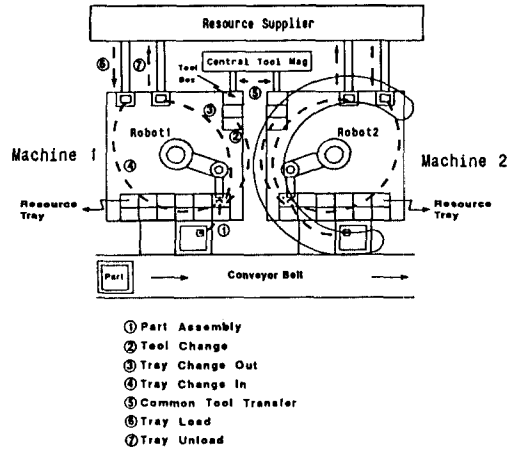


그림 7 FMC의 단위 Cell

그림 8에는 단위셀내의 한 머신에 속한 로봇트의 동작 시퀀스가 표현되어 있다. 각 머신은 거의 동일한 기능을 수행할 수 있으며 현재 가지고 있는 tool 과 resource 의 종류에 따라 같은 part, 또는 서로 다른 part 를 작업할 수 있다. 또한 각 머신 셀은 유입되는 가공품들을 2 대의 머신중 상황에 맞추어 적합한 머신에 할당하기 때문에, 변화하는 상황들에 유연하게 대처할 수 있다.

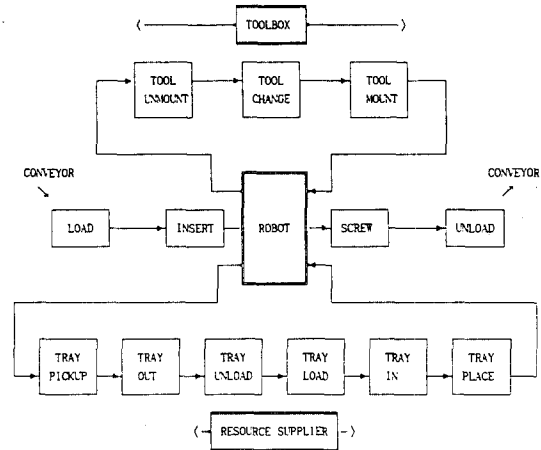


그림 8 로봇트 작업의 시퀀스 표현

5.2 시뮬레이션을 통한 단위셀의 성능 평가

C++를 이용하여 대상 단위셀의 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다. C++는 이산 사건 시뮬레이션에 적합한 특징을 가지고 있다. 대상 셀을 대상으로 본 연구에서 사용한 전문가 시스템에 의한 스케줄링 방법과 경험적 규칙을 사용한 방법을 비교하였다. 그림 9와 10은 가공 용량을 약간 초과하는 시점에서 가공품(part)의 도착 간격을 변화시키면서 생산량과 평균대기시간에 대해 두가지 방법을 비교한 결과이다. 두가지의 지수 모두 전문가에 의한 스케줄링 방법이 우수함을 알 수 있다.

Total Number of Production(Unit Cell)

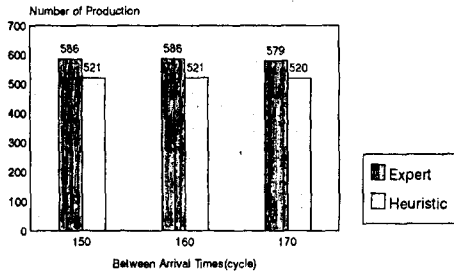


그림 9 생산량에 대한 비교 결과(단위셀)

Average Wait Time(Unit Cell)

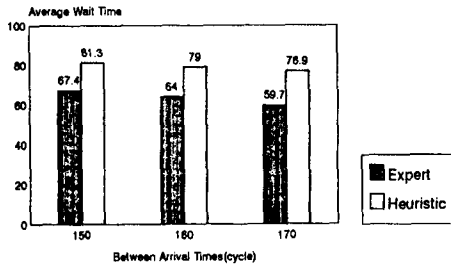


그림 10 평균대기시간에 대한 비교 결과(단위셀)

5.3 다중셀 시스템의 구성 및 성능 평가

FMC 시스템은 복수개의 셀과 컨베이어로 구성된다. 즉, 단위 셀이 모여 통합된 FMC 생산 시스템을 이룬다. 대상 시스템은 3대의 조립 셀(unit cell 1 - 3)과 1대의 검사 셀(unit cell 4), 그리고 컨베이어로 구성된다. 그림 11은 다중셀 생산 시스템의 구조를 나타낸다.

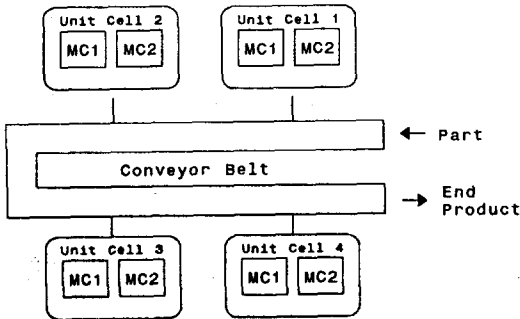


그림 11 다중셀 생산 시스템의 구조

단위 셀과 마찬가지로 다중셀 시스템에 대해서 두가지의 스케줄링 결과를 비교하였다. 그림 12에 하루 생산량에 대한 수치 그래프가 나와 있다. 경험적 방법보다 전문가에 의한 스케줄링 방법이 더 우수함을 알 수 있으며, 부품의 도착 간격이 증가할수록 두 방법간의 차이가 줄어들는데, 이것은 가공 용량에 미달

하게 부품이 투입되는 경우에는 스케줄링의 영향이 적음을 나타낸다.

Total Number of Production(Multi Cell)

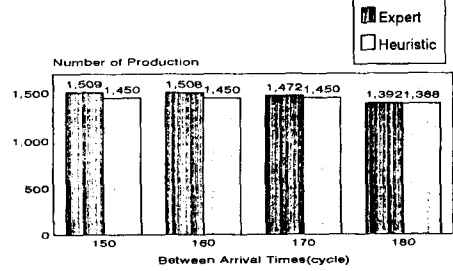


그림 12 생산량에 대한 비교 결과(다중셀)

그림 13과 그림14에는 다중셀 시스템에서의 평균대기시간과 8가지 가공품에 대한 평균체류시간(mean flow time)의 비교 결과가 나와 있다.

Average Wait Time(Multi Cell)

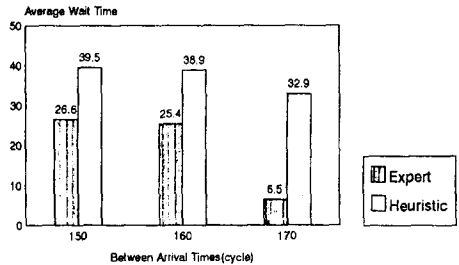


그림 13 평균대기시간에 대한 비교 결과(다중셀)

Mean Flow Time(Multi Cell)

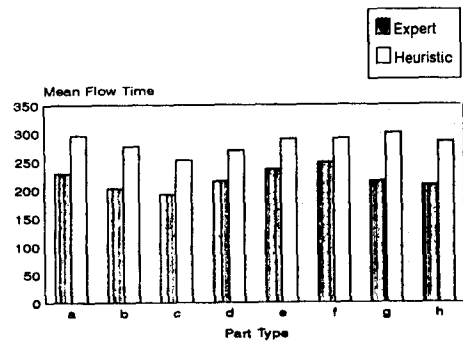


그림 14 평균체류시간에 대한 비교 결과(다중셀)

6. 결론

단위셀 또는 다중셀로 구성된 FMC 시스템은 여러 모델의 혼류 생산 및 머신의 유연성으로 인해 향상된 생산 능력을 갖추고

있지만 다중 작업의 특성과 동적으로 변화하는 상태에서 발생될 수 있는 수 많은 대안들로 인해 전체 운영이 매우 복잡하다. 본 연구에서는 FMC의 효율적 운영을 위해 1) 생산시스템의 계층적 제어구조의 도입, 2) 수요 예측을 통해 결정된 생산품의 종류 및 생산 요구량 만족을 위한 단기 생산 계획, 3) 단위 셀 및 다중 셀의 효율적 스케줄링, 4) 셀 운용의 지능화를 위한 전문가 모듈 구현, 그리고 5) 성능 평가등을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 개발된 지능형 스케줄러와 경험적 규칙에 의한 성능 평가를 비교하였으며, 본 연구에서 사용한 기법의 우수함을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 FMC 운영 기법은 향후 활성화 될 것으로 예상되는 CIM을 위한 효율적인 기본 구조가 될 것이다.

참고 문헌

- [1] B. Boulet et. al., "Cell controllers: Analysis and comparison of three major projects" *Computers in Industry* Vol. 16, pp. 239-254, 1991
- [2] R. Akella, B. H. Krogh, and M. R. Singh, "Efficient Computation of Coordinating Controls in Hierarchical Structures for Failure-Prone Multi-Cell Flexible Assembly Systems", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.6, Num.6, 1990
- [3] R. Y. Al-Jaar & A. A. Desrochers, "Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri-Nets", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.6, No.6, 1990
- [4] Szu-Yung David Wu, Richard A. Wysk, "Multi-pass Expert Control System - A Control/Scheduling Structure for Flexible Manufacturing Cells", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.7, No.2, 1988
- [5] O. Maimon, "The Robot Task-Sequencing Planning Problem", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.6, No.6, 1990
- [6] A. Kusiak, A. Villa, "Architectures of Expert Systems for Scheduling Flexible Manufacturing Systems", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 1987
- [7] M. F. Clifford & A. A. desrochers, "Preview Control of Flexible Manufacturing Systems", *Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics & Automation*, 1987
- [8] A. Kusiak, "FMS Scheduling: A Crucial Element in an Expert System Control Structure", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 1986
- [9] G. Bruno & M. Morisio, "The Rule Based Programming for Production Scheduling", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 1987