

# FMC에 계층적 스케줄링 전략의 적용

\* 여용기      유준  
충남대학교 전자공학과

Application of the Hierarchical Scheduling Policy to FMC

Yong-Kee Yeo, Joon Lyou

Dept. of Electronics Eng., Chungnam National University

## ABSTRACT

The scheduling algorithm based on the hierarchical scheduling policy is presented for the Job Shop type FMC control, and the simulation results using this hierarchical scheduling policy are compared with the results which are based on the heuristic scheduling policy. The results show that the hierarchical scheduling policy is more efficient than the heuristic scheduling policy in either case that there exist machine failures in the FMC or not.

## 1. 서론

FMC는 DEDS의 전형적인 예로서 다양한 구성요소(가공기계, 버퍼, AGV 등) 및 각 구성요소의 범용성에 의해 여기서 발생하는 이산사건도 매우 다양하고 복잡하게 된다.

FMC에서 발생하는 대표적인 이산사건으로는 그림 1과 같이 그 발생빈도가 낮은 생산요구 발생에서부터 발생빈도가 높은 가공물 운반, 가공작업 등을 들 수 있다.

발생 기간(Day)

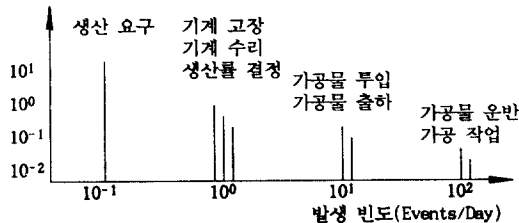


그림 1. FMC에서의 발생빈도별 이산사건

이러한 다양한 발생 빈도를 갖는 이산사건에 적절히 대응하여 생산비용을 최소화하며 생산량을 극대화할 수 있는 운영기법으로 계층적인 운영방법이 많이 시도되고 있다. [1, 2, 3, 4]

계층적 운영방법은 그림 1과 같이 이산사건을 발생 빈도별로 분류한 후, 발생 빈도가 비슷한 사건들을 하나의 집단(계층)으로 보고 발생 빈도가 높은 집단에 대해서 발생빈도가 낮은 집단의

사건은 우발성이 배제된 고정된 사건으로 간주한 후 각 계층별로 단계적으로 제어 가능한 이산사건에 대한 의사결정을 내리는 방법이다. [5]

본 논문에서는 Gershwin, Akella, Choong이 제안한[3] 간단화한 계층적 운영방법을 도입하여, Job Shop 방식의 FMC 모델에 적용할 수 있는 운영 알고리즘을 개발하고, 이 운영방법을 4대의 가공기계와 1대의 AGV로 구성된 FMC 모델에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써, 계층적 운영방법이 Job Shop 방식의 FMC 환경하에서도 우수한 성능으로 동작함을 확인하였다.

## 2. 계층적 운영방법의 개요

그림 1과 같은 이산사건들이 발생하는 FMC의 각 사건별 의사결정 단계는 그림 2와 같은 4개의 계층으로된 계층적 의사결정 구조로 표현할 수 있다.

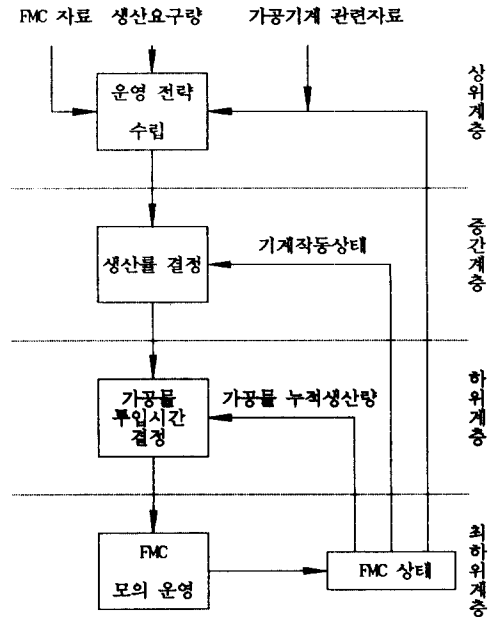


그림 2. 4개의 계층구조를 갖는 운영방법

상위계층에서는 FMC의 입력자료로 주어지는 기계관련정보, 가공물 생산정보 등으로부터 생산비용을 최소화하기 위한 운영전략을 수립하고, 중간계층에서는 이러한 운영전략에 입각하여 현재 작동 가능한 기계상태를 반영한 가공물별 최적 생산량을 결정하고, 하위계층에서는 최적생산량을 만족시키기 위한 각 가공물 투입시간을 조절하며, 최하위계층에서는 실제 투입된 가공물에 대한 가공작업과 기타 기계고장 및 수리 등의 공장 전반적인 운영이 이루어진다.

각 계층에서의 세부적인 의사 결정 방법은 다음과 같다.

### 2.1 상위 계층에서의 의사결정 방법

생산 비용과 생산량을 연관짓는 매개변수로 과잉 생산량 개념을 도입하면, 생산 요구율을  $d(t)$ , 순간 생산률을  $u(t)$ 라고 할 때 과잉 생산량  $x(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$x(t) = \int \{u(t) - d(t)\} dt \quad (1)$$

$x(t) > 0$  인 경우 과잉 생산을 의미하고  $x(t) < 0$  인 경우 생산 부족을 의미하며, 두 경우 모두 경영적인 측면에서의 비용 증가를 유발한다.

이러한  $x(t)$ 에 의해 유발되는 비용을  $g(x)$ 라고 하면, 운영방법의 목표는 이  $g(x)$ 를 최소화하며 궁극적인 생산 목표량을 만족시킬 수 있는 최적 생산량을 결정하는 최적화 문제로 요약할 수 있으며 목적함수는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$J[x(0), \alpha(0)] = \min_u E \left\{ \int g[x(t)] dt | x(0), \alpha(0) \right\} \quad (2)$$

생산량을 결정함에 있어 또한 고려해야 할 사항은 실제 총 생산량은 FMC의 가공기계 수에 의해 결정되는 생산 용량을 초과할 수 없다는 사실이며, 이것은 가공기계  $i$ 에서 가공물  $j$ 가 가공되는 총 가공 시간을  $\tau_{ij}$ 라고 하고 전체 가공물 수를  $n$ 이라고 할 때 다음식으로 표현된다.

$$\sum_{j=1}^n \tau_{ij} u_j(t) \leq \alpha_i(t) \quad (3)$$

$$u_j \geq 0$$

$\alpha_i(t)$ 는  $t$  시간에서의 가공 기계 작동 상태를 나타내며 가공 기계가 하나인 경우, 작동시에는 1, 고장시에는 0의 값을 갖는다.

상위 계층에서는 중간 계층에서 사용하기 위한 목적함수  $J$ 를 결정하며, 계산을 간단히 하기 위하여 목적함수를 이차함수 형태 (Quadratic Approximation Form)로 다음과 같이 가정한다.

$$J(x, \alpha) = \frac{1}{2} x^T A(\alpha) x + b(\alpha)^T x + C(\alpha) \quad (4)$$

$A(\alpha)$ 는 Positive Definite Diagonal Matrix로서 Diagonal 성분  $A_{jj}$ 는 가공물  $j$ 의 가공우선 순위를 반영하며, 생산요구량이 많거나, 생산지연시 큰 손실을 가져오는 경우, 또는 고장발생이 잦은 기계에서 가공되는 경우 큰 값을 갖도록 선정한다.

(4)식으로 주어지는 목적함수를 최소화하는  $x(t)$ 를 생산분기점 (Hedging Point: 이하 HP)으로 정의하면 FMC는 과잉 생산량이 이 수준을 유지하도록 운영할 경우 비용대 효과면에서의 이윤이 극대화 된다.

식 (4)에서  $j$  형태 가공물의 HP  $H_j$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$H_j(\alpha) = - \frac{b_j(\alpha)}{A_{jj}(\alpha)} \quad (5)$$

### 2.2 중간 계층에서의 의사결정 방법

(2)식과 같은 형태의 목적 함수를 갖는 동적 최적화 문제는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\min \frac{\partial J(x, \alpha)}{\partial x} u \quad (6)$$

식 (4), (5)를 (6)식에 대입하고 (3)식의 제한조건을 적용하면 다음과 같은 LP(Linear Programming)식을 얻을 수 있다.

$$\min C(x)^T u, \quad C(x) = A(x - H) \quad (7)$$

$$\text{subject to } D u = e$$

$$u \geq 0$$

윗 식에서  $u$ 는 (3)식의 비 등가 조건을 등가 조건으로 바꾸기 위하여 여유 변수(Slack Variable)를 도입 확장한 벡터이다.

표준형태의 LP 문제로 표현된 (7)식은  $u$ 를 Basic Part  $u_B$  와 Nonbasic Part  $u_N$  으로 나누고 이에 따라  $C(x)$ 와  $D$ ,  $C_D$  Basic, Nonbasic Part로 나누면 다음과 같이 변형된다.

$$\min C_B(x)^T u_B + C_N(x)^T u_N, \quad C_N(x)^T = C_N(x)^T - C_B(x)^T D_B^{-1} D_N \quad (8)$$

$$\text{subject to } D u = e$$

$$u \geq 0$$

$C_N(x)^T$ 는 Nonbasic Part  $u_N$ 에 의해 유발되는 할인가(Reduced Cost)를 반영하며 (8)식이 기저해 (Basic Solution)  $(u_B, 0)$ 를 가지려면  $C_N(x)^T$ 의 모든 성분은 양수값을 가져야 한다.[6] 따라서 LP에 의해 구한 최적 생산량  $u$ 는  $C_N(x)^T$ 의 한 성분이 최초로 0에 도달하는 시간 동안만 유지되며, 즉 LP에 의해 최적 생산량과 이 생산량에 의한 최적 생산 시간이 결정된다.

### 2.3 하위 계층에서의 의사결정 방법

시간  $t$ 에서의  $j$  형태 가공물에 대한 실제 과잉 생산량  $(x_j^A(t))$ 은 다음과 같다.

$$x_j^A(t) = \{ \text{투입된 } j \text{ 형태 가공물의 총합} \} - d_j t \quad (9)$$

하위 계층에서는 LP의 해로부터 구한  $x(t)$ 에 이 실제 과잉 생산량이 가장 가깝도록 해당 가공물을 투입하며 그 방법은 다음과 같다.

- 1)  $x_j^A(t) < x_j(t)$  : 해당 가공물 투입
- 2)  $x_j^A(t) \geq x_j(t)$  : 해당 형태의 가공물 투입 중단

### 2.4 최하위 계층에서의 의사결정 방법

최하위 계층에서는 실제 투입된 각 가공물에 대한 가공 및 운반 작업 등이 이루어지며 이러한 작업은 일정한 작업규칙에 의해 작업시점, 우선순위 등이 결정된다.

본 논문에서는 이미 개발된 FMC 시뮬레이터<sup>[7]</sup>에 의해 FMC에서 발생하는 모든 작업이 수행되도록 하였다.

### 3. 운영 알고리즘 개발

2장에서 기술한 계층적 운영방법을 이용한 Job Shop 형태의 FMC 모델에 적용할 수 있는 운영 알고리즘 구조는 그림 3과 같다.

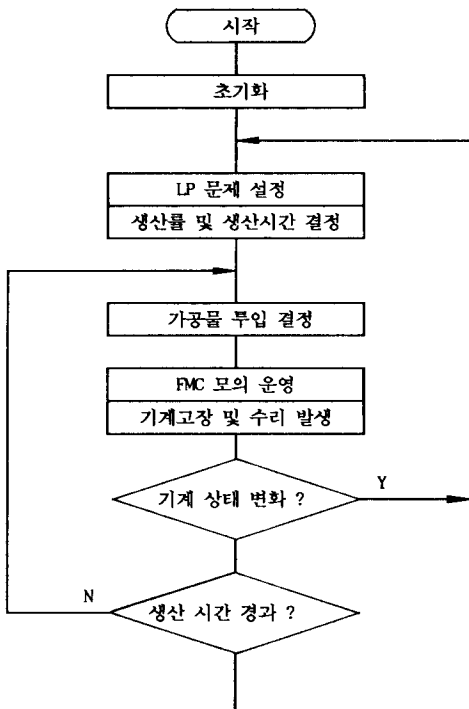


그림 3. 계층적 운영방법 알고리즘

그림 3과 같이 계층적 운영방법 알고리즘은 크게 4개의 서브루틴으로 구성되었으며 각 서브루틴에서의 수행 내용은 다음과 같다.

### 3.1 초기화 서브루틴

이 서브루틴에서는 상수로 주어지는 각종 정보를 입력 처리한다.

시뮬레이션에 필요한 정보는 가공기계나 AGV 등 FMC 구성요소 정보와 주어진 시스템에서 가공될 가공물 정보, 가공 순서와 시간 등을 결정하는 작업공정 정보 및 생산분기점(HP) 등의 기본적인 정보와, 실제 시뮬레이션시 시뮬레이션 시간과 결과처리 방법 등을 규정하는 보조 정보로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 운영방법 결정에 필수적으로 사용되는 정보만을 입력하도록 하고 공정 정보 등을 포함한 FMC 모델 정보는 FMC 시뮬레이터의 입력 루틴에서 처리하도록 하였다.

### 3.2 선형 계획법 서브루틴

이 서브루틴에서는 상수로 주어진 정보와 FMC의 운영 상태에서부터 결정되는 정보를 이용하여 LP 문제를 설정한 후 이에 대한 최적해를 구한다. 최적해는 수정 단계법(Revised Simplex Method)을 이용하여 구하며 최적해에 해당되는 최적 생산물이 결정되면 이 생산물로 생산을 계속할 생산 기간을 계산하여 메인 루틴에 제공한다.

이 서브루틴은 크게 다음의 세 단계로 처리과정을 나눌 수 있다.

#### 1) 초기 LP 문제 설정

초기화 서브루틴에서 상수로 주어진 정보(가공 완료시 까지 사용되는 기계수 A, 생산 분기점 H)와 FMC의 운영 상태에서부터 결정되는 정보(과잉 생산량  $x$ )를 식 (7)에 대입하여 LP 문제를 설정한다.

#### 2) 최적 생산물 결정

설정된 LP 문제의 해가 최적 생산물이며 식 (7)과 같은 표준형태의 LP 문제에 대한 최적해를 구하는 과정은 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

##### (1) 초기화 과정

부등식을 등식으로 변환하기 위하여 도입한 여유변수 (Slack Variable)를 초기 기저해(Initial Basic Solution)로 하여 이에 대한 해의 가능성을 검토 (Feasibility Test)한다. 모든 초기 기저해가 양수이면 가능해(Feasible Solution)이다.

##### (2) 반복적인 최적해 검색 과정

초기 가능해를 출발점으로 하여 비용함수를 최소화하는 가능해를 찾는다. 식 (8)의 합인가를 모두 양수로 하는 가능해가 최적해(Optimal Solution)이다.

3) 최적 생산물에 의한 생산기간 결정

최적해에서 제외된 비기본변수(Nonbasic Variable)의 할인가가 양수에서 음수로 변하는 순간 최적해의 조건이 상실되며 더이상 최적 생산량이 될 수 없다. 할인가는 시간에대한 선형함수로 표현되며 따라서 최적해가 결정되면 할인가가 양수에서 음수로 변하기 까지 걸리는 시간을 계산할 수 있으며 이 시간이 최적 생산물에 의한 생산기간이 된다.

3.3 가공물 투입 서브루틴

이 서브루틴에서는 시뮬레이션 시간 t까지의 이론적으로 계산된 과잉 생산량을 가공물이 투입되어 가공 완료된 후 출하되고 남은 실제 과잉 생산량과 비교하여 실제 과잉 생산량(xj^A(t))이 이론에 의한 과잉 생산량(xj(t))에 미달되면 해당되는 j 형태 가공물을 투입한다.

가공물 투입 정보는 독립적인 FMC 시뮬레이터 프로그램의 입력 서브루틴에서 처리될 수 있도록 가공물 형태와 투입시간을 출력 화일에 동시에 기록한다.

3.4 FMC 모의 운영 서브루틴

이 서브루틴은 FMC 내에서 발생하는 모든 작업을 시뮬레이션하는 프로그램이며, 규정된 작업 규칙과 작업 시간 등에 의해 가공물이 투입되어 출하되기 까지의 모든 가공물에 대한 작업과정이 결정된다.

또한 이 서브루틴에서 통계적인 입력 자료(평균고장발생시간, 평균고장수리시간)를 이용하여 기계고장이나 수리 사건을 발생시킨다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 대상으로 설정된 모델은 4대의 가공기계(범용기계 3대, 전용기계 1대)와 1대의 AGV로 구성된 Jop Shop 형태의 FMC이며, 모든 기계에는 각각 2개의 입,출력 버퍼가 있는 것으로 가정하였다.[7]

가공기계의 고장 관련 자료는 평균고장발생시간(MTBF), 평균고장수리시간(MTTR)으로 주어지는 것으로 가정하였으며, 각 기계의 고장 관련 자료는 모두 동일한 것으로 가정하였다. 초기고장발생시간(SEED)은 임의로 선정하되, 기계고장 발생시 같은 종류의 기계가 2대 이상 동시에 고장상태에 있는 경우는 없도록 선정하였다. 고장관련자료는 표 1과 같다.

표 1. 기계고장 관련자료 (단위: 시간)

기계 번호	형태	MTBF	MTTR	SEED
1	범용	24	5	1.78
2	범용	24	5	10.11
3	전용	24	5	12.89
4	범용	24	5	18.44

이 FMC에서 가공되는 가공물 종류는 모두 4가지로 하루에 생산되어야 할 각 가공물에 대한 생산 요구량과 기계 형태별 가공에 소요되는 가공시간은 표 2, 표 3과 같다.

표 2. 가공물 생산 요구량 (단위: 개/일)

가공물 형태			
1	2	3	4
10	10	20	20

표 3. 가공물 가공 소요시간 (단위: 분)

기계형태	가공물 형태			
	1	2	3	4
범용기계	60	60	42	48
전용기계	45	35	0	0

각 가공물에 대한 생산분기점은 다음 식에 의하여 결정하였으며[4], 그 결과는 표 4와 같다.

$$H_j = d_j T_r / 2 \tag{10}$$

d<sub>j</sub> : Demand Rate

T<sub>r</sub> : MTR

표 4. 생산 분기별 (단위: 개)

가공물 형태			
1	2	3	4
1	1	2	2

계층적 운영방법(Hierarchical Scheduling Policy; 이하 HSP)의 성능을 비교하기 위한 운영기법으로는 직관에 의한 최대 투입 방법(Full Loading Policy; 이하 FLP)을 사용하였으며, 각 운영방법 별로 기계고장이 없는 경우(No Fail)와 모든 기계가 고장 가능한 경우(Fail) 각각에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과로는 하루 생산요구량을 만족시키기까지 걸리는 총생산시간, 평균기계효율, 가공물별 평균생산시간을 출력하였으며, 각 가공물의 시간별 누적생산량을 그림으로 도시하여 생산과정을 유추할 수 있도록 하였다.

5.1 기계고장이 없는 경우의 시뮬레이션 결과

표 5. 기계고장이 없는 경우의 시뮬레이션 결과

		FLP	HSP
총생산시간 (시간)		26.93	22.01
평균기계효율(%)	범용기계	61.88	75.73
	전용기계	49.50	60.58
평균생산시간 (분)	가공물 1	149.75	166.47
	가공물 2	177.17	144.80
	가공물 3	91.38	84.03
	가공물 4	104.03	93.83

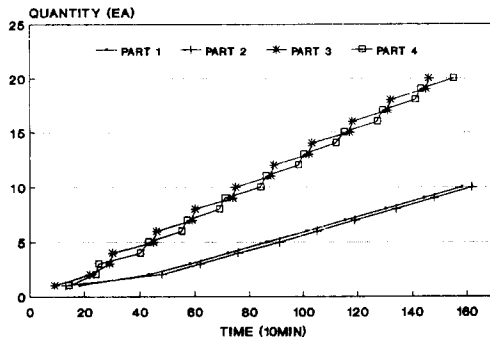


그림 4. 가공물별 누적생산량 (No Fail, FLP)

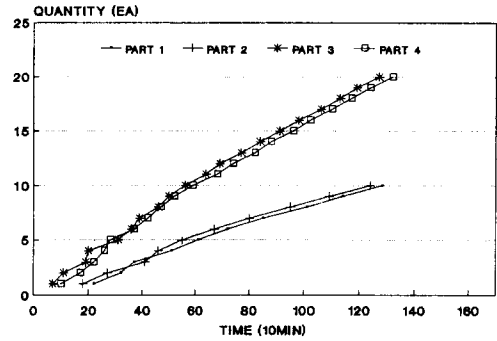


그림 5. 가공물별 누적생산량 (No Fail, HSP)

표 5를 보면 모든 성능지수 면에 있어서 계층적 운영방법이 직관적 최대투입방법 보다 우수함을 알 수 있다. 기계고장이 없는 경우에도 최대투입방법은 하루 생산 요구량을 만족시키는데 하루를 초과하고 있으나, 계층적 운영방법은 주어진 시간내에 생산요구량을 만족시키고 있다.

그림 4, 5를 보면 모든 가공물은 균형있게 생산되고 있으며 모든 기계상태가 정상이므로 생산률도 일정함을 알 수 있다.

5.2 모든기계가 고장 가능한 경우의 시뮬레이션 결과

표 6. 모든기계가 고장 가능한 경우의 시뮬레이션 결과

		FLP	HSP
총생산시간 (시간)		26.98	24.46
평균기계효율(%)	범용기계	75.84	85.64
	전용기계	60.68	68.51
평균생산시간 (분)	가공물 1	235.43	234.42
	가공물 2	306.88	176.98
	가공물 3	120.38	124.88
	가공물 4	120.77	142.31

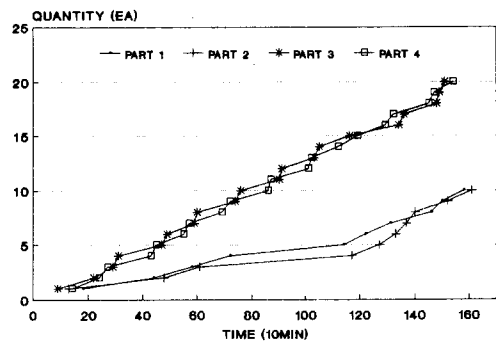


그림 6. 가공물별 누적생산량 (Fail, FLP)

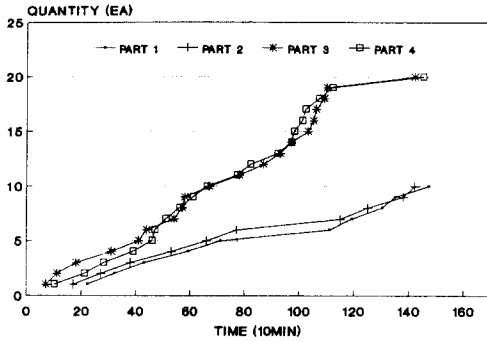


그림 7. 가공물별 누적생산량 (Fail, HSP)

모든기계가 고장 가능한 경우에도 계층적 운영방법이 모든 성능지수 면에서 우수하다.

그림 6을 보면 직관적 운영방법의 경우 전용기계의 고장과는 상관없이 범용기계만 이용 생산되는 가공물 3, 4의 생산물은 일정하다. 즉 전용기계 고장에 의해 가공물 1, 2의 생산이 중단되어도 가공부하가 감소된 범용기계에서의 가공물 3, 4의 추가생산은 이루어 지지 않고 따라서 이 기간중의 기계효율은 매우 떨어지게 된다.

그림 7을 보면 계층적 운영방법의 경우 전용기계가 고장난 기간 동안 범용기계에 의해서만 생산되는 가공물 3, 4의 생산물은 급격히 증가한다. 즉 전용기계가 고장난 기간 동안 가공물 3, 4를 추가생산하여 놓고, 전용기계가 수리된 이후에는 가공물 1, 2의 생산에만 집중할 수 있도록 기계 운영이 이루어져 모든 기계의 효율이 높아지고 총생산시간도 짧아지게 된다.

## 6. 결 론

시뮬레이션 결과 계층적 운영방법은 기계고장을 고려한 어떠한 FMC 운영 환경 조건 하에서도 우수한 성능을 나타내었다. 즉 기계고장을 고려하여 과잉생산을 허용하고 과잉 생산 기준을 경영적인 측면에서의 생산비용을 최소화 할 수 있도록 선정한 계층적 운영방법은 기계고장 등의 우발적 요소를 가진 FMC에 대한 매우 효과적인 운영방법임을 알 수 있다.

이러한 계층적 운영방법을 실제 FMC 운영에 적용하기 위해서는 기계고장관련정보, 작업공정정보 및 가공물 정보 등이 보다 정확히 반영되어야 하며, 생산요구량에 따른 최적의 버퍼 선정문제, 가공기계의 Set-up 시간의 반영문제 등도 검토 되어야 한다. 앞으로 이러한 미비점들이 보완된다면 보다 현실적인 시뮬레이션에 근거한 FMC 운영방법 수립이 가능할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] R. R. Hildebrant and R. Suri, "Methodology and Multi Level Algorithm Structure for Scheduling and Real Time Control of Flexible Manufacturing Systems," Proceedings of 3'rd Int. Sym. on Large Engineering Systems, pp 239-244, July 1980.
- [2] Joseph Kimemia and Stanley B. Gershwin, "An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System," IIE Transaction, pp 353-362, Dec. 1983.
- [3] Stanley B. Gershwin, Ramakrishna Akella and Yong F. Choong, "Short-term Production Scheduling of an Automated Manufacturing Facility," IBM J. Res. Develop., Vol. 29, No 4, July 1985.
- [4] Ramakrishna Akella, Yong Choong, and Stanley B. Gershwin, "Performance of Hierarchical Production Scheduling Policy," Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-7, No. 3, pp 225-241, Sep. 1984.
- [5] Stanley B. Gershwin, "A Hierarchical Framework for Discrete Event Scheduling in Manufacturing Systems," Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp 197-216, Springer-Verlag, 1987.
- [6] David G. Luenberger, "Linear & Nonlinear Programming," pp 58-60, Addison Wesley, 1980.
- [7] 백양식, "자동 생산 시스템의 시뮬레이션 프로그램 개발," 충남 대학교 석사학위 논문, 1988.
- [8] 박순달, "OR 프로그램집," 대영사, pp 7-32, 1983.