

# Workload에 따른 FMS의 버퍼 Capacity 결정에 관한 연구

이정표, 김경섭  
연세대학교 산업시스템공학과

서울시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 산업시스템공학과 물류/시물레이션연구실  
전화: 02-361-4010, 이메일 milestone@las.yonsei.ac.kr, kyungkim@yonsei.ac.kr

FMS(Flexible Manufacturing System, 유연생산 시스템)는 1960년대 최초로 소개된 이후, 뛰어난 Throughput과 Flexibility로 지금까지 다양한 생산 현장에서 널리 활용되고 있다. 하지만 복잡한 Part의 흐름, 충분하지 못한 AGV(Automated Guided Vehicle) 등으로 인한 성능 저하는 가장 큰 장애물이라 할 수 있다. 이에 대한 대비책으로 시스템 내에 설치하는 버퍼는 일시적인 WIP(Work In Process, 재공재고)의 저장공간으로써 Blocking, Starving 등의 발생을 최소화하는 역할을 수행한다. 따라서 이러한 버퍼의 적절한 배치는 시스템 성능에 큰 영향을 미치게 되며, 이에 본 연구에서는 각 Workstation의 Workload를 고려해 각 버퍼의 적절한 Capacity를 결정하는 과정을 소개하며, 제시된 방법론의 실효성을 시물레이션을 통해 검증하고자 한다.

많은 작업시간에 따른 생산의 흐름을 원활히 하는

## 1. 서론

유연생산시스템(Flexible Manufacturing System)은 자재 운송을 담당하는 MHS(Material Handling System), 실제 작업을 위한 N/C 기계로 이루어진 Workstation, 이들을 통합 제어하는 Control Part로 구분되며 현재 생산현장에서 널리 사용되고 있다.

생산환경에 따른 유연성 등의 여러 장점에도 불구하고, FMS의 실제 적용에 있어서는 작업 스케줄링, 무인운반차(Automated Guided Vehicle)의 경로선택 및 할당, 설비계획 등의 문제가 존재하며 많은 연구를 통해 여러 문제들의 최적 또는 그에 가까운 방법론들이 제시되어 왔다.

일반적으로 버퍼는 시스템내의 재공재고(Work In Process)의 일시적인 저장공간이며, 일정하지

않은 작업시간에 따른 생산의 흐름을 원활히 하는 역할을 수행하나 공간과 비용상의 제약으로 총 가용 버퍼는 한정되어 있다. 결국 버퍼의 적절한 할당은 시스템의 수행도에 큰 영향을 끼치게 되며, 그 동안 이에 대한 여러 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 단방향 AGV를 이용하는 FMS의 각 Workstation의 작업량을 고려해 D.P.를 이용해 버퍼를 할당하는 방법론을 제시한다.

## 2. 버퍼의 의의 및 기존 연구

### 2.1 버퍼의 의의

생산시스템의 관리에서 생산통제를 보다 용이하게 하기 위해 변동을 흡수해 내는 기능을 버퍼가

능(Buffer Fuction)이라고 한다. 이러한 버퍼기능은 여분의 재고 확보 등과 같은 제품에 의한 조절, 여유 기계 보유 등과 같은 생산능력에 의한 조절, 납기지연에 대비한 납기여유와 같은 시간에 의한 조절로 구분될 수 있다.

이러한 버퍼의 순기능과 더불어, 과도한 재공재고, 생산소요시간의 증가 등과 같은 역기능도 포함하고 있다. 이러한 Tradeoff적인 성격을 고려해 어느 위치에 어떤 크기의 버퍼를 할당시킬 것인가가 문제의 초점이다.

본 연구에서는 이 중, 각각의 Workstation의 버퍼 크기를 할당하는 생산능력의 조절에 의한 버퍼기능을 대상으로 하고 있다.

## 2.2 기존 연구

Buzacott[1], Hendricks[5] 등은 Markov 과정을 이용해 짧은 생산라인을 연구대상으로 했고, Chow[2], Liu[6] 등은 동적계획법을, Soyster etc.[8] 는 선형계획법, Conway et al.[4]은 시물레이션 방법을 방법으로 연구를 수행했다.

Christian et al.[3]는 Tabu Search를 이용해 생산라인의 버퍼 위치와 크기를 결정하고 SLAM을 통해 검증하는 과정을 제시하기도 했다.

## 3. 문제의 개요

### 3.1 흐름 생산라인의 버퍼 결정 문제

생산시스템에서 버퍼의 크기가 무조건 커진다고 해서 좋은 결과를 보이는 것은 아니며 크기를 쉽게 늘릴 수도 없는 것이 현실이다.

네 개의 Workstation으로 구성된 간단한 시스템을 통해 버퍼 할당 문제가 얼마나 어려운 것인가를 파악해 보면, 각 Workstation 사이에 버퍼 1, 2, 3를 배치할 수 있다. 각 버퍼의 최대 크기를 2로

가정하면, 총 5가지(0-1-1, 1-0-1, 1-1-0, 0-0-2, 0-2-0, 2-0-0)의 결과가 나오게 된다.

Lutz[7]의 연구에 의하면 버퍼 설치가 가능한 총 위치( $n$ )와 총 버퍼의 용량( $u$ )에 따라서 버퍼 할당은 다음과 같은 수식을 통해 알 수 있다.

$$\left( \frac{n+(u-1)}{u} \right) \quad (1)$$

예를 들어 네 개의 Workstation 시스템에서 총 버퍼 용량이 3일 경우,  ${}^5C_3$ 이 되어 총 10가지의 대안이 도출된다. 따라서 시스템 복잡도가 조금이라도 증가할 경우, 고려해야 할 총 버퍼 할당의 조합은 기하급수적으로 늘어나게 됨을 알 수 있다.

### 3.2 FMS에서의 버퍼 할당 문제

FMS에서의 버퍼할당 문제는 위에서 살펴본 흐름 생산라인과는 많은 차이가 있다. 기본적으로 1개의 Part의 흐름에 따라 버퍼를 결정하던 것에서 여러 Part의 각기 다른 Route와 각 Workstation에서의 작업시간이 Part에 따라 달라지는 것을 고려해야 한다. 또한 한정된 AGV와 Guide Path의 공유에 따른 blocking, starving 등의 문제도 발생할 수 있다.

이러한 복잡함으로 수학적 접근을 통한 해결 방법은 불가능하며, Heuristic을 통한 방법론이나 대상 시스템이 지나치게 단순화된 연구가 대부분이어서 전체적으로 이에 대한 연구가 미진하다고 볼 수 있다.

## 4. Workload를 고려한 최적 버퍼 할당

### 4.1 개요

FMS 수행도의 중요한 변수로 Part 이동에 있어서의 blocking 또는 starving에 의한 Flow Time의 증가를 생각할 수 있다. 본 연구에서는 단방향 AGV를 통해 Part가 이동하는 시스템의 각 Parts 이동 성격을 정의하고 이를 분석하여, 가장 빈번하게 필요로 하는 Workstation의 버퍼를 우선적으로 할당하려고 한다.

즉, 시스템내의 Part 이동을 다음과 같이 두 종류로 분류하고, 기본적인 대기 행렬이론의 결과와 함께 동적계획법(Dynamic Programming)에 적용시켜 최적해를 얻고자 한다.

$n_k$ : W.S.  $k$ 로 작업되기 위해 도착하는 횟수

$h_k$ : 다음 작업을 위해 W.S.  $k$ 를 지나치는 횟수

#### 4.2 동적계획법의 적용

본 연구에서는 최적 버퍼할당을 D.P.를 이용해 해결하는데, 이는 일반적인 자원 할당을 위한 D.P. 방법론과 유사하다.

총  $N$ 개의 Workstation으로 구성된 시스템에서 총 버퍼 용량은  $X$ 이고, 총 작업시간의 최소화를 목적함수로 할 경우, 다음과 같은 식이 형성되며 이를 바탕으로 D.P.에 적용하면 다음과 같다.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N r_i(x_i) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^N x_i \leq X \quad (3)$$

$$x_i \geq 0, \text{ integer}$$

#### (A) State Variable

$i$ : Workstation Number

$x$ : Workstation  $i$ 에서  $N$ 까지 할당 가능한

버퍼용량

#### (B) Optimal Return Function

$S(i, x) = x$  만큼의 버퍼를 Workstation  $i$ 에서  $N$ 까지 할당해 얻을 수 있는 최소의 총 작업시간

#### (C) Bellman Equation

$$S(i, x) = \text{Min}_{0 \leq x' \leq x} [r_i(x_i) + S(i+1, x-x')] \quad (5)$$

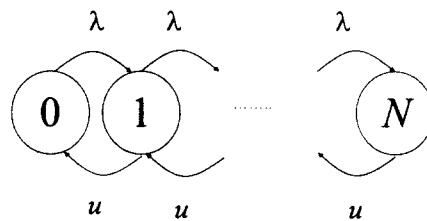
#### (D) Boundary Condition

$$S(N+1, x) = 0 \quad (6)$$

#### (E) $S(1, X)$ 의 값을 구해야 함

#### 4.3 대기행렬이론의 적용

FMS에서 Part들은 미리 정해진 순서에 따라 이동하게 된다. 상황에 따라서는 이미 지나쳤던 Workstation을 다시 방문할 수도 있다. 이러한 Parts의 해당 Workstation 도착과 작업시간이 포아송과정을 따른다고 가정할 경우, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.



<그림 1.  $N$  Capacity 시스템의 상태 전이 다이어그램>

그림 1와 같은 시스템에서 안정상태에서 서버의 Busy 확률과 Idle 확률을 구해보면 다음과 같다.

$$\text{Busy 확률: } 1 - P_0 = \frac{\rho - \rho^{N+1}}{1 - \rho^{N+1}} \quad (7)$$

$$\text{Idle 확률: } P_0 = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+1}} \quad (8)$$

#### (4) 4.4 FMS의 최적 버퍼 할당

대상으로 하고 있는 FMS는 단방향 AGV에 의해 Part의 이동이 이루어지고 있어, 대체 경로 선택이나 시스템버퍼의 설치 등과 같은 상황에 따른 민첩한 대처능력이 부족하다. 따라서 선행작업의 지체로 인한 후행작업의 지연은 피하기 어렵고, 결국 전체적인 시스템의 성능에 악영향을 미치게 된다. 그리고 각각의 Workstation으로 작업을 위해 도착하는 것이 아니라, 단순한 통과를 위해서라면 이러한 움직임은 원활하게 할 필요가 있다.

결론적으로 위에서 정의한  $n_k$ 나  $h_k$  등은 각 Workstation의 Workload로 볼 수 있으며, 대기행렬이론을 통해 이를 이용하고, 동적계획법으로 와 함께 고려해 이러한 Workload가 많은 곳에 더 큰 버퍼를 할당해 시스템 성능의 향상을 추구하고자 한다. 목적함수로는 각각의 버퍼 크기에 따른 총 작업시간의 최소화를 통해 문제를 해결하고자 한다.

다음은 본 연구에서 제시하는 해법에 관한 절차를 나타내고 있다.

(단계 1, Graph화) 대상시스템을 Node와 Arc를 통해 단순화시킨다.

(단계 2, 그래프 단순화 및 Part경로 부여) Part의 경로에 따라 필요한 Arc와 Workstation을 포함한 Node만을 남기고 기타부분은 삭제한 후, 남아 있는 Arc에 번호를 부여하고, 각 Part별 경로에 따른 Arc 번호를 정리한다.

(단계 3, Arc성분 분석) Part에 따른 Arc번호를 Arc의 목적지를 기준으로  $n_k$ 와  $h_k$ 를 찾아낸다.

(단계 4, 분석) 각 Workstation의 작업시간( $u$ )와 이를 통해 각 Workstation이 안정상태에서 Busy할 확률과 Idle할 확률을 알아낸다.

(단계 5, 동적계획법 적용) 단계 4를 통한 결과와  $h_k$ 를 이용해 각 Workstation의 버퍼크기 변화

에 따른 총 작업시간 척도를 계산해낸다.

(단계 6, 동적계획법 풀이) 단계 5의 척도를 이용해 동적계획법을 풀어  $S(I, X)$ 를 찾아낸다.

(단계 7, 검증) 시물레이션을 통해 제시된 방법론이 버퍼의 무작위적인 할당이나 동등한 할당보다 나은 시스템 성능을 보이는 것을 검증한다.

## 5. 수리적 예제

### 5.1 시스템 소개(그림 3 참고)

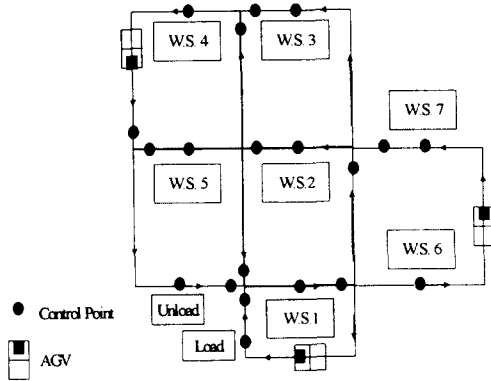
- 7개의 W.S.과 3대의 단방향 AGV로 구성되며 총 4종류의 Part가 정해진 경로에 따라 이동
- AGV의 이동은 SPT를 따르며, 기계고장이나 AGV의 고장은 고려하지 않음
- 동일한 거리의 움직임이 필요한 경우, Part 흐름이 다른 Part와 마주칠 가능성이 적은 쪽 선택
- Part의 입고는 포아송과정 rate  $\mu_1, \dots, \mu_7$
- 각 Workstation의 작업시간은 Part에 따라 큰 차이 없이 포아송과정 rate  $\mu_1, \dots, \mu_7$ 로 가정
- 4 종류 Part의 경로를 다음과 같음(여기서 숫자는 Workstation 번호를 의미)

Part 1: Load-1-2-1-2-3- 4-Unload

Part 2: Load-4-5-6-7-5-7-Unload

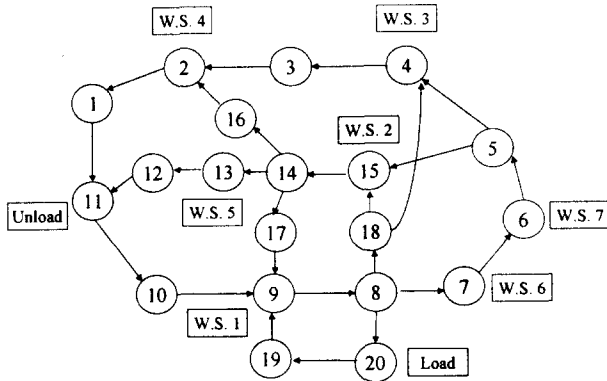
Part 3: Load-1-2-4-2-4-6-Unload

Part 4: Load-4-5-7-4-5-7-Unload



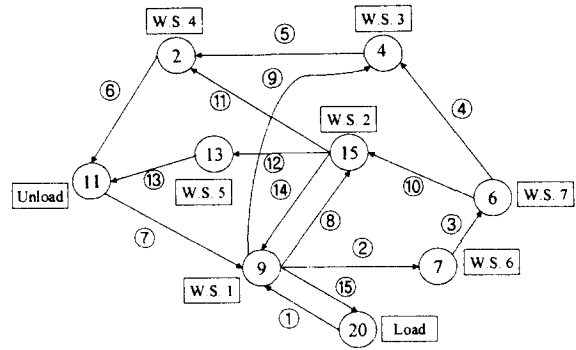
<그림 2. 대상 FMS 시스템>

(단계 1) 그림 2과 같은 대상시스템에서, 하나의 Node가 Control Point와 다음 Control Point 앞까지의 Route를 포함하도록 하여 그래픽적으로 표현하면 그림 3과 같은 결과를 얻게 된다.



<그림 3. 대상 FMS의 그래프화>

(단계 2) 그림 3에서 Workstation을 포함하는 Node만을 남기고 이를 단순화하고 각 Arc에 번호를 부여하면 그림 4와 같고, 이를 토대로 Parts들의 Route에 따라 정리하면 표 1과 같다.



<그림 5. 그래프의 단순화 및 Arc 번호화>

	Part별 Route에 따른 Arc 번호
Part 1	1-8-14-8-14-9-5-6
Part 2	1-8-11-6-7-8-12-13-7-2-3-10-12-13-7-2-3-10-12-13
Part 3	1-8-11-6-7-8-11-7-2-3-10-12-13
Part 4	1-8-11-6-7-8-12-13-7-2-3-4-5-6-7-8-12-13-7-2-3-10-12-13

<표 1. Part의 Route에 따른 Arc 번호>

(단계 3, 4) 표 1의 결과를 바탕으로 (표 1의 굵은 글씨체)와 (표 1의 일반 글씨체)를 알아낼 수 있고, 그 결과가 표 2에 나타나 있다.

	W.S.1	W.S.2	W.S.3	W.S.4	W.S.5	W.S.6	W.S.7
$n_k$	5	4	1	5	4	2	4
$h_k$	9	9	2	1	3	3	0

<표 2. 각 Workstation의  $n_k, h_k$ >

안정상태에서 Workstation  $k$ 가 Busy할 확률은 와 식 (7), (8)을 이용해 얻을 수 있다. 즉,  $n_k$ 만큼 rate  $\lambda_k$ 로 입고되고 작업시간은  $u_k$  이므로 다음과 같은 값을 얻게 된다.

$$\rho_k = \frac{n_k \lambda_k}{u_k} \quad (9)$$

예를 들어 Workstation 1의 안정상태에서 Busy

할 확률은 (7)을 이용, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_k[Busy] = \frac{P_k}{1 - P_k^{N+1}} \quad (10)$$

(단계 5, 6) 식 (10)을 통해 각 Workstation 상태에 대한 확률값을 구할 수 있으므로, 여기에  $n_k$  와  $h_k$ 의 Weight,  $R(0 < R < 1)$ 을 결정하고 Workstation의 상태와 버퍼크기를 해당 Workstation의 총 가용 보유량으로 생각하면 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그 후 식 (5)과 같은 Bellman Equation을 도출한 후, D.P.를 풀이하면 최적에 가까운 값이 산출된다.

버퍼 Size	W.S. 1	..	W.S. N
0	$P_1[Busy](n_1 + Rh_1) + P_1[Idle](n_1 + Rh_1 - 1)$	..	$P_N[Busy](n_N + Rh_N) + P_N[Idle](n_N + Rh_N - 1)$
1	$P_1[Busy](n_1 + Rh_1 - 1) + P_1[Idle](n_1 + Rh_1 - 2)$	..	$P_N[Busy](n_N + Rh_N - 1) + P_N[Idle](n_N + Rh_N - 2)$
...	...	..	...
X	$P_1[Busy](n_1 + Rh_1 - X) + P_1[Idle](n_1 + Rh_1 - X - 1)$	..	$P_N[Busy](n_N + Rh_N - X) + P_N[Idle](n_N + Rh_N - X - 1)$

<표 3. D.P.를 위한 Processing Time Index>

<만약  $(n_k + 0.6 - x_k) < 0$  될 경우 해당 항목은  $\infty$ >

### 7. 결론

FMS라는 복잡한 시스템의 버퍼 할당을 위해 각 Part별 움직임을 정의, 분류하고 이를 토대로 해당 W.S.의 총 Capacity를 고려하는 방법론을 제시하였다. 최종 버퍼의 할당은 위의 과정을 통한 작업 시간 인덱스를 D.P.에 적용시켜 얻을 수 있었다.

### 6. 참고문헌

[1] Buzacott, J.A., "The role of inventory banks in flow line production systems", International Journal of Production Research, Vol.9, No.4, pp 425-436, 1971

[2] Chow, W.M., Buffer capacity analysis for sequential production lines with variable process times, International Journal of Production Research, Vol. 25, No.8, pp 1183-1196, 1987

[3] Christian M. Lutz, K. Roscoe Davis, Minge Sun, Determining buffer location and size in production lines using tabu search, European Journal of Operations Research, No.106, pp 301-316, 1998

[4] Conway, R., Maxwell, W., McClain, J.O., Thomas, L.J., The role of work-in-process inventory in serial production lines, Operations Research, Vol.36, No.2, pp 229-241, 1988

[5] Hendricks, K.B., The output process of serial production lines of exponential machine with finite buffers, Oper. Res., Vol.40, No.6, pp 1139-1147, 1992

[6] Liu, C.M., Lin, C.L., Performance evaluation of unbalanced serial production lines, International Journal of Production Research, Vol. 32, No.12, pp 2897-2914, 1994

[7] Lutz, C.M., Determination of buffer size and location in scheduling system, Ph.D. Dissertation, Terry College of Business, The University of Georgia at Athens, GA, 1995

[8] Soyster, A.L., Schmidt, J.W., Rohrer, M.W., Allocation of buffer capacities for a class fixed production lines, AIIE Transactions, No.11, Vol.2, pp 140-146, 1979