

# FMS의 Deadlock과 Workload를 고려한 최적 버퍼 할당에 관한 연구

## A Study of Buffer Allocation in FMS based on Deadlock & Workload

이정표\*, 김경섭\*

Joung Pyo Lee, Kyung Sup Kim

연세대학교 산업시스템공학과\*  
(120-749) 서울시 서대문구 신촌동 134  
연세대학교 산업시스템공학과 물류/시뮬레이션연구실

### Abstract

Due to the complexity of parts flow and limited resources, FMS(Flexible Manufacturing System) develops blocking, starvation and deadlock problems, which reduce its performance. In order to minimize such problems buffers are imposed between workstations of the manufacturing lines. In this paper, we are concerned with finding the optimal buffer allocation with regard to maximizing system throughput in limited total buffer capacity situation of FMS. A grouping heuristic to solve the buffer allocation problem is proposed. Computer simulation using Arena will be experimented to show the validation of the proposed algorithm.

### 1. 서론

현대의 고도화된 자동화설비, 정보화 개념의 도입으로 기업의 대내외적인 상황변화에 대비하고 있다. 생산시스템의 성능 향상은 이러한 변화에 기본이 되는 연구 과제로 많은 관련 연구가 진행되어왔다. 최근 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System)은 효율성과 유연성의 중요성이 점차 강조되면서 주문생산방식(Job Shop)과 흐름생산방식(Flow Shop)의 장점으로 인해 널리 사용되고 있다.

이러한 유연생산시스템은 자재 운송을 담당하는 MHS(Material Handling System), 실제 작업을 위한 N/C 기계로 이루어진 workstation, 이들을 통합 제어하는 통제부분(Control Part)으로 구분된다.

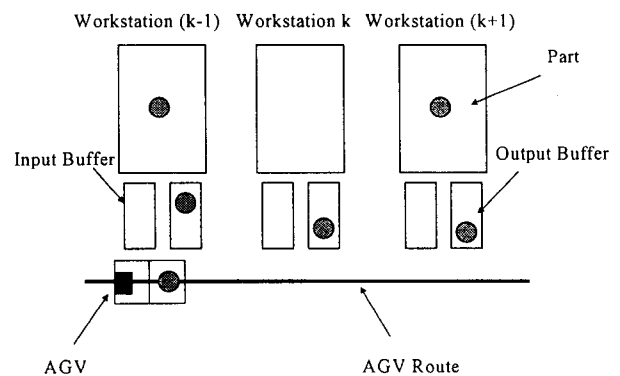
생산환경에 따른 유연성 증가, 제품의 품질 및 장비 가동률의 향상 등의 장점에도 불구하고, FMS의 실제 적용에는 작업 스케줄링, 무인운반차(Automated Guided Vehicle)의 경로선택 및 할당, 설비계획 등의 난해한 문제가 존재하며 그 동안 많은 관련 연구를 통

해 최적 또는 그에 가까운 방법론들이 제시되어 왔다. 본 연구는 이러한 FMS의 여러 문제 중 하나인 버퍼의 최적할당에 관한 부분을 다루고 있다.

### 2. 버퍼의 개념 및 기존 연구

#### 2.1 버퍼의 개념

일련의 연속적인 공정을 거치는 생산시스템에서 일정하지 않은 작업시간과 자재운반의 제약으로 시스템의 성능이 달라지게 되는데, 이에 대한 하나의 대안이 바로 버퍼의 설치이다.



<그림 1> 입, 출고버퍼를 가진 생산시스템

예를 들어, 그림 1에서와 같은 시스템에서 해당 작업을 위해 입고되고, 작업을 마치고 출고되는 부품은 일시적으로 해당 버퍼에 저장되어, 전체적인 흐름을 원활하게 만들고 있다. 만약 workstation 간에 버퍼가 없거나 부족하다면 후행작업이 선행작업의 작업종료 때까지 대기하는 blocking, 후행작업의 도착 지연으로

로 인해 workstation이 idle해지는 starving을 비롯해 전체 시스템이 모두 정지하게 되는 deadlock 현상이 발생하여 전체 시스템 성능을 크게 저하시키게 된다.

이와 같이, 생산시스템의 흐름 관리에서, 재공재고의 이동을 보다 용이하게 하기 위해 변동을 흡수해 내는 것을 버퍼기능(Buffer Function)이라고 한다.

하지만 버퍼의 순기능과 더불어, 과도한 재공재고의 발생, 생산 소요시간의 증가 등과 같은 역기능도 포함하고 있다. 따라서, 이러한 버퍼의 양면성을 고려해 어느 위치에 얼마 크기의 버퍼를 할당시킬 것인가가 그 동안 많은 연구의 관심 대상이다.

## 2.2 기존 연구

생산시스템의 버퍼 크기를 결정하는 버퍼 할당에 관한 문제는 일종의 미해결문제(open problem)로 Jackson[7]에 의해 처음으로 제시된 이후, 많은 연구가 이루어져왔다.

Altiok과 Stidham[1]은 대기행렬모형을 통해 시스템의 일정 수준이상의 산출량을 얻기 위한 분석적 접근을 제시했고, Buzacott[2]은 네 개의 머신으로 구성된 시스템의 최적 버퍼 할당을 수학적으로 접근하였으며, Hendricks[6]은 Markovian 과정을 이용해 짧은 생산라인을 대상으로 연구를 수행했다.

Conway et al.[5]은 시뮬레이션을 이용해 연구를 수행했으며, Christian et al.[4]는 Tabu Search를 이용해 생산라인의 버퍼 위치와 크기를 결정하고 SLAM을 통해 검증하는 과정을 제시했다.

Chow[3]은 목적함수의 재귀형식(recursive formula)을 이용하여, 두 workstation으로 단순화시킨 시스템에서 동적계획법을 통해 안정상태에서의 최대 산출량을 얻을 수 있는 버퍼할당과정을 보였다.

이상의 기존 관련 연구를 통해, 우리는 최적 버퍼 할당 문제가 가진 복잡성 때문에 연구의 대상을 소형 시스템 또는 단순 흐름 시스템으로 축소시키거나, 많은 가정들을 비롯, 전체 시스템에 관련된 데이터를 부분적으로 사용하는 등의 한계가 있다는 것을 알 수 있으며 FMS를 대상 시스템으로 하여 수행된 버퍼 할당에 관한 연구는 그다지 많이 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

## 3. 문제의 개요

생산시스템에서 버퍼의 크기에 따라 시스템 성능이 달라지는 것은 굳이 설명이 필요치 않은 부분이고 이제 간단한 흐름 생산시스템과 본 연구의 대상이 되는 FMS의 버퍼 할당문제의 특징을 비교해 본 연구의 대상에 대한 이해를 넓히고자 한다.

### 3.1 흐름 생산시스템의 버퍼 할당 문제

생산시스템에서 버퍼의 크기가 무조건 커진다고 해서 좋은 결과를 보이는 것은 아니라는 것은 그림 2를 통해 알 수 있었으며 또한 현실적으로 버퍼 크기는 공간상, 비용상의 제약으로 인해 임의로 늘릴 수도 없다.

네 개의 workstation으로 구성된 간단한 흐름 생산시스템을 통해 버퍼 할당 문제의 복잡성을 살펴보면, 각 workstation 사이에 버퍼 1, 2, 3를 배치할 수 있으며, 각 버퍼의 최대 크기를 2로 가정하면, 총 6가지(0-1-1, 1-0-1, 1-1-0, 0-0-2, 0-2-0, 2-0-0)의 대안이 도출된다.

Lutz[8]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.

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

예를 들어, 네 개의 workstation으로 이루어진 생산 시스템에서 총 버퍼 용량이 3일 경우,  ${}_5C_3$ 이 되어 총 10가지의 대안이 형성되므로, 시스템 복잡도가 약간 증가할 경우라도 고려해야 할 버퍼 할당 가짓수는 기하급수적으로 늘어나게 된다.

### 3.2 FMS에서의 버퍼 할당 문제

FMS에서의 버퍼할당 문제는 위에서 살펴본 흐름 생산라인과는 많은 차이가 있다. 기본적으로 part의 흐름이 흐름 생산시스템은 단순한 반면, FMS는 여러 part의 각기 다른 route와 각 workstation에서의 작업 시간이 part에 따라 달라지는 것을 고려해야 한다. 또한 한정된 AGV와 guide path의 공유에 따른 blocking, starving 그리고 deadlock 등의 문제도 발생할 수 있다.

이러한 특징으로 인해, FMS의 버퍼 할당 문제는 수학적 접근을 통한 해결 방법은 어려우며, 경험론적 방법론이나 대상 시스템이 단순화된 연구가 대부분인 실정이다.

## 4. Deadlock과 Workload를 고려한 최적 버퍼 할당

### 4.1 개요

FMS 수행도의 중요한 변수로 part 이동에 있어서의 blocking, starving 그리고 deadlock에 의한 cycle time의 증가 및 성능의 저하를 생각해 볼 수 있다. 본 연구에서는 단방향 AGV를 통해 part가 이동하는 시스템에서 각 part 이동 경로를 분석하여, 재공재고의 blocking이나 starving, 나아가 deadlock이 가능한 발생하지 않도록 각각의 workstation 버퍼를 할당해 시스템 수행도를 높이고자 한다.

즉, FMS내의 workstation으로 입고되는 part 이동을 아래와 같이 분류하고, 시뮬레이션을 통해 각 workstation의 버퍼 utilization과 deadlock 횟수와 알아낸 후, 이 세 가지 요인과 deadlock간의 회귀분석을 통해 유의한 것들로 제시된 일종의 휴리스틱에 적용시켜 본 연구에서 제시하는 최적의 버퍼 할당 대안을 얻는다.

$n_k$  : W.S. k로 작업되기 위해 도착하는 횟수

$h_k$  : 다음 작업을 위해 W.S. k를 지나치는 횟수

$u_k$  : W.S. k 버퍼의 utilization

$d_k$  : W.S. k에서 발생하는 deadlock 횟수

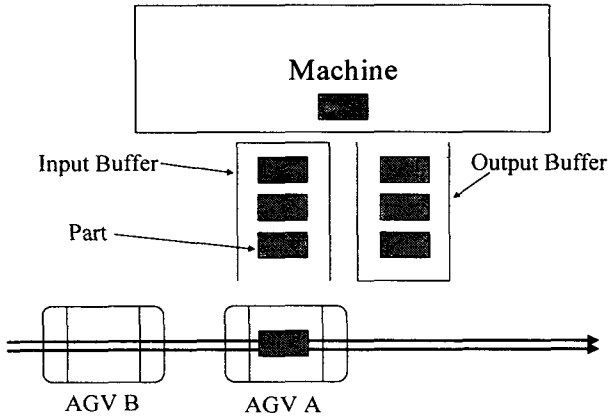
여기서 k: Workstation 1, 2, 3, ...,N

### 4.2 시뮬레이션을 통한 deadlock의 파악

Deadlock은 제한된 자원의 공유로 인해 전체 시스템이 정지되는 상태를 의미한다. 예를 들어, 그림 2에 서처럼 입, 출고 버퍼에 여유가 없는 상황에서 해당 머신으로 작업을 위해 또 다른 part를 실은 AGV A가 도착할 경우, part를 내려놓지 못해 blocking이 발생하고 뒤따라 오는 다음 AGV B 역시 blocking 되고 이러한 방식으로 확산되어 전체 시스템이 다운되는 상황이 발생하게 된다.

FMS와 같은 자동화된 시스템에서 이와 같은 현상이 발생할 경우, 사람이 직접 해결하거나 deadlock recovery 알고리즘을 통해 시스템을 전환해야 하므로 시스템 성능에 상당한 불이익을 가져오게 되며 본 연

구에서는 deadlock 발생시, 해당 part를 제외하는 것으로 가정하였다.



<그림 2> deadlock 상태의 생산 시스템

#### 4.3 FMS의 최적 버퍼 할당

본 연구에서 대상으로 하고 있는 FMS는 단방향 AGV에 의해 part의 이동이 이루어지고 있어, blocking 발생했을 때, 대체 경로 선택이 불가능하며, deadlock을 피하기 위한 시스템 버퍼의 설치도 어려운 상황이다. 따라서 선행작업의 지체로 인한 후행작업의 지연은 피하기 어렵고, 이는 결국 전체 시스템 성능에 악영향을 미치게 된다.

결론적으로 위에서 정의한  $n_k$  나  $h_k$  등은 각 workstation에 있어서 일종의 workload이며 시뮬레이션과정을 통해 얻은  $u_k$ 와  $d_k$ 간의 관계를 고려한 버퍼 할당을 통해 시스템 성능, 즉 각각의 버퍼 크기에 따른 전체 시스템 생산량의 최대화를 얻고자 한다.

다음은 본 연구에서 제시하는 해법에 관한 절차를 나타내고 있다.

##### (단계 1, Graph화)

대상시스템을 node와 arc를 사용해 단순화

##### (단계 2, 그래프 단순화 및 part경로 부여)

Part의 경로에서 필요한 arc와 workstation을 포함한 node만을 남기고 기타 부분은 삭제, 남아있는 arc에 번호를 부여해, 각 part별 경로에 따른 arc 번호를 정리

##### (단계 3, Arc성분 분석)

Part에 따른 arc번호를 통해, arc의 목적지를 기준으로  $n_k$ 와  $h_k$ 를 정리

##### (단계 4, 시뮬레이션을 통한 $d_k$ , $u_k$ 도출)

시뮬레이션을 통해 각 workstation의 deadlock 횟수 ( $d_k$ )와 buffer의 유용도  $u_k$  얻음

##### (단계 5, 회귀분석)

$n_k$ ,  $h_k$ ,  $u_k$  들과  $d_k$ 의 단순회귀분석을 시행해 유의한 요인을 찾고 상관계수(r)을 얻음

##### (단계 6, Grouping)

- 1) 각 workstation마다 작업을 필요로 하는 part들을 나타내는 표를 작성해 특정 workstation에 해당되는 part 종류를 쉽게 파악할 수 있도록 함
- 2) Key workstation(가장 적은 part를 필요로 하는 workstation)을 찾음
- 3) Key workstation과 가장 많이 동일한 part를 작

업하는 workstation을 그룹화함

- 4) 3)에서 그룹화된 workstation을 제외하고 다시 최소의 part를 작업하는 workstation 선택, 이와 가장 유사한 workstation 선택 그룹화
- 5) 모든 workstation이 그룹화되면 종료

##### (단계 7, 버퍼할당 대안 생성)

단계 5에서 얻은 가장 높은 상관계수를 기준으로 동일 그룹내의 workstation간 버퍼크기를 비교 기준이 되는 값( $n_k$  또는  $h_k$  또는  $u_k$ )의 전체 평균과 비교해 조정

##### (단계 8, 검증)

시뮬레이션을 통해 제시된 대안을 차례로 검증해 제시한 방법론이 버퍼의 동등한 할당보다 나은 시스템 성능을 보이는것을 보임

## 5. 수리적 예제

### 5.1 시스템 소개

제시한 방법론의 검증을 위해 아래의 시스템(그림 3 참조)을 대상으로 했으며, 시뮬레이션 모델링은 ARENA 시뮬레이션 패키지 version 3.5를 사용할 것이다.

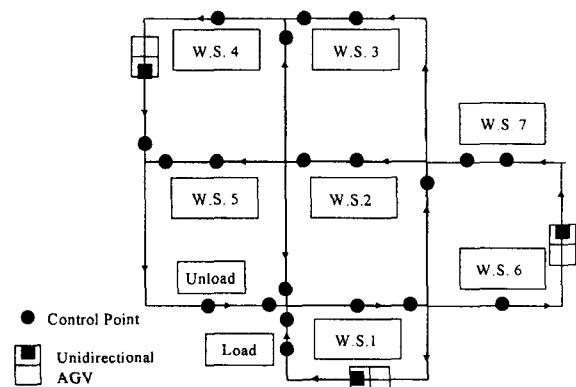
- 7개의 WS과 3대의 단방향 AGV로 구성되며 총 4종류의 part가 정해진 경로에 따라 이동
- AGV의 다음 작업을 위한 workstation 선택규칙은 SDS(Shortest Distance Serve)를 따르며, 기계 및 AGV의 고장은 고려하지 않음
- Workstation의 작업 시간은 일항분포(uniform distribution)를 따르며, balanced line과 같은 특징을 가짐
- 각 part별 입고는 지수분포를 따름
- 총 가용버퍼 크기는 14  
(대안의 비교 대상은 각 workstation에 균등하게 할당한 시스템)
- deadlock이 발생할 경우 사람이 직접 해당 part를 AGV에서 제거하고 시스템은 당시 상황에서 다시 시작됨
- 네 종류 part의 경로는 다음과 같으며 숫자는 workstation 번호를 의미

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

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

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

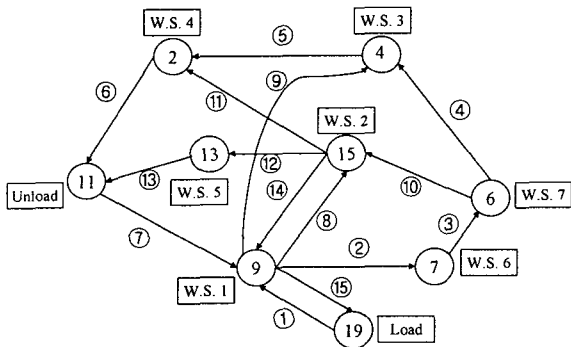
Part D: Unload-4-5-3-6-7-5-Load



<그림 3> 대상 FMS 시스템

## 5.2 방법론 적용 과정(시뮬레이션과정 전까지의

(단계 1, 2) 그림 4와 같은 대상시스템에서, 하나의 node가 control point와 다음 control point 앞까지의 route를 포함하도록 하여 그래픽적으로 표현하고 이를 workstation을 포함하는 node만을 남기고 이를 단순화하고 각 arc에 번호를 부여하면 그림 4과 같고, 이를 토대로 part의 route에 따라 정리하면 표 1과 같다.



<그림 4> 그래프의 단순화 및 arc 번호화

	Part별 route에 따른 arc 번호
Part A	7-8-11-6-7-8-14-2-3-4-5-6
Part B	7-8-11-6-7-8-12-7-2-3-4-5-6-7-8-12-13
Part C	7-8-12-13-7-9-5-6-7-2-3-10-12-13
Part D	7-8-12-7-9-5-6-7-2-3-4-5-6

<표 1> Part의 route에 따른 arc 번호

(단계 3)  $n_k$ ,  $h_k$  분석

표 1의 결과를 바탕으로 표 2과 같은 결과를 얻을 수 있다.

	$n_k$	$h_k$
W.S. 1	3	10
W.S. 2	3	5
W.S. 3	4	1
W.S. 4	5	2
W.S. 5	4	1
W.S. 6	3	1
W.S. 7	2	2

<표 2> 각 workstation의  $n_k$ 와  $h_k$

## 6. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 FMS라는 복잡한 시스템의 버퍼 할당을 위한 방법론을 제시하였다. 최종 버퍼의 할당, 다시 말하면 제한적인 총 버퍼크기를 고려해, 각 workstation에 현재 상황에서의 최적의 버퍼크기를 주어, 전체적인 시스템 산출량을 늘릴 수 있었다. 이를

위해 각 part의 움직임을 정의, 분석하고 시뮬레이션에서 얻은 deadlock 발생 횟수에 대한 결과를 토대로 휴리스틱을 적용해 최적의 버퍼할당 대안을 얻을 수 있을 것이다.

향후 연구 과제로는 적절한 대상 시스템을 찾아 방법론의 검증과정이 필요하며, 양방향 AGV 시스템으로 연구 대상을 확대시킬 필요가 있을 것이다.

## 7. 참고문헌

- [1] Altiok and Stidham, "The Allcation of Inter-stage Buffer Capacitis in Production Lines", *IIE Transactions*, Vol.15, No.4(1983), pp.292-299.
- [2] Buzacott, J.A., "The Role of Inventory Banks in Flow Line Production Systems", *International Journal of Production Research*, Vol.9, No.4 (1971), pp 425-436.
- [3] Chow,W.M., "Buffer Capacity Analysis for Sequential Production Lines with Variable Process Times", *International Journal of Productduction Research*, Vol. 25, No.8 (1987), pp. 1183-1196.
- [4] Christian M. Lutz, K, Roscoe Davis and Minge Sun, "Determining Buffer Location and Size in Production Lines Using Tabu Search", *European Journal of Operations Research*, No.106 (1998), pp. 301-316.
- [5] Conway,R., Maxwell, W., McClain, J.O. and Thomas, L.J., "The Role of Work-In-Process Inventory in Serial Production Lines", *Operations Research*, Vol.36, No.2(1988), pp. 229-241.
- [6] Hendricks, K.B., "The Output Process of Serial Production Lines of Exponential Machine with Finite Buffers", *Operations Research*, Vol.40, No.6(1992), pp. 1139-1147.
- [7] Jackson, R.R.P., "Queueing Systems with Phase Type Service", *Operations Research*, Vol.5 (1954), pp. 109-120.
- [8] 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.