

유연생산시스템의 작업량을 고려한 버퍼 할당에 관한 연구 A Study of Buffer in FMS Based on FMS Workload

이정표, 김경섭

연세대학교 산업시스템공학과

Abstract

현대의 생산환경에서 널리 사용되고 있는 생산시스템의 형태는 FMS(Flexible Manufacturing System, 유연생산 시스템)로, FMS는 다품종 소량생산과 생산성 향상이라는 두 가지 목표에 가장 적합한 형태라고 할 수 있다. 하지만 FMS에는 시스템의 효율을 저하시키는 blocking, starving, deadlock 등이 존재하며 이들의 영향을 줄이고자 재공재고의 일시적 저장공간인 버퍼를 설치하게 된다. 시스템내의 제약으로 인해 버퍼의 총 용량은 제한적이므로, 효율적인 버퍼관리는 시스템 성능 향상을 가능하게 할 수 있다. 본 연구에서는 FMS의 각 Workstation의 작업량을 고려한 버퍼 할당을 통해 시스템 효율 향상을 추구하고, 시물레이션 과정을 통해 검증해 보고자 한다.

1. 서론

FMS(Flexible Manufacturing System, 유연생산 시스템)은 1960년대 처음 등장한 이후, 특유의 유연성과 효율성으로 많은 생산시스템에서 적용되고 있다. 이러한 FMS는 자재 운송을 담당하는 MHS(Material Handling System), 실제 작업을 위한 N/C 기계로 이루어진 Workstation, 이들을 통합 제어하는 Control Part로 구분된다.

FMS의 실제 적용에 있어서는 여러 가지 문제가 발생하게 되는데, 대표적인 것으로 작업 일정의 결정, AGV(Automated Guided Vehicle, 무인운반차)의 경로선택 및 할당, 설비계획 등 뛰어난 성능만큼 그에 따른 많은 어려움이 산재해 있으며 그동안의 많은 연구를 통해 여러 문제들의 최적 또는 그에 가까운 방법론들이 끊임없이 제시되어 왔다.

일반적으로 버퍼는 시스템내의 WIP(Work In Process, 재공재고)의 일시적인 저장공간으로, 선행 또는 후행 작업의 지체와 AGV의 부족 등으로 인한 Blocking, Starving, Deadlock의 발생을 감소시키는 역할을 수행하며 공간과 비용상의 제약으로 인해 총 버퍼의 용량은 제한적이다. 따라서 이러한 버퍼의 적절한 배치와 운영은 시스템의 수행도에 큰 영향을 끼치게 되며, 그 동안 이에 대한 여러 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 단방향 AGV를 이용하는 FMS의 각 Workstation의 작업량을 고려해 버퍼를 할당하는 방법론을 제시해 시스템의 성능향상을 추구하고자 한다.

2. 버퍼의 의의 및 기존 연구

2.1 버퍼의 의의

생산시스템의 관리에서 생산통제를 보다 용이하게 하기 위해 변동을 흡수해 내는 기능을 버퍼 기능(Buffer Function)이라고 한다. 이러한 버퍼 기능은 여분의 재고 확보 등과 같은 제품에 의한 조절, 여유 기계 보유 등과 같은 생산능력에 의한 조

절, 납기 지연에 대비한 납기여유와 같은 시간에 의한 조절로 구분될 수 있다.

이러한 버퍼의 순기능과 더불어, 과도한 재공재고, 생산소요시간의 증가, 생산비용의 증가 등과 같은 역기능도 포함하고 있다. 결국 이러한 Tradeoff적인 성격을 고려해 어느 위치에 얼마의 크기를 가지는 버퍼를 위치시킬 것인가가 문제의 초점이다.

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

2.2 기존 연구

지금까지 수행된 여러 연구들은 필요한 재고 버퍼를 결정하는 것에 초점이 맞추어져 왔다. 이러한 연구에서 다양한 방법론의 평가 척도로 가장 널리 사용되는 것이 시스템의 산출량이며, 방법론을 구분해 보면 분석적 방법, 시물레이션, 예측적 방법 등으로 나눌 수 있다. 이중, 첫번째 분석적 방법은 정확한 작업시간의 분포나 적은 Workstation 이어야 하는 등의 제약이 심하고, 복잡한 시스템을 주대상으로 하는 시물레이션의 경우 시간과 비용이 많이 소요되는 단점을 지니고 있다. 결국 마지막 대안인 예측적인 방법을 통해 수행도를 측정하고 그 결과를 시물레이션을 통해 검증하는 과정이 일반적이다.

Hunt[6], Buzacott[1], Hendricks[5] 등은 Markov 과정을 이용해 짧은 생산라인을 연구대상으로 했고, Chow[2], Jafari et al.[7], Liu[8] 등은 동적계획법을, Soyster etc.[11]는 선형계획법, Conway et al.[4], Powell et al.[10] 등은 시물레이션을 방법론으로 연구를 수행했다.

Vourous et al.[12]는 Knowledge Based System을 이용해 비선형 생산라인의 버퍼 할당에 관한 연구를 수행했으며, 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

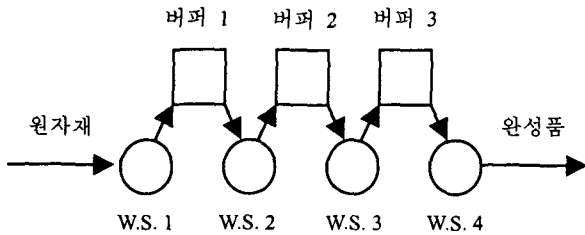
생산시스템에서 버퍼의 크기가 무조건 커진다고 해서 좋은 결과를 보이는 것은 아니며 크기를 쉽게 늘릴 수도 없는 것이 현실이다.

그림 1 과 같은 간단한 시스템을 통해 버퍼 할당 문제가 얼마나 어려운 것인가를 파악해 보도록 하자. 네 개의 Workstation 으로 구성되어 있으므로 총 세 지역에 버퍼 1, 2, 3 를 배치할 수 있다. 각 버퍼의 최대 크기를 2 로 잡을 경우, 총 5 가지(0-1-1, 1-0-1, 1-1-0, 0-0-2, 0-2-0, 2-0-0)의 결과가 나오게 된다.

Lutz[9]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.

$$\binom{n+(u-1)}{u} \quad (1)$$

예를 들어 그림 1 과 같은 시스템에서 총 버퍼 용량이 3 일 될 경우, 5C3 이 되어 총 10 가지의 대안이 도출된다. 따라서 시스템 복잡도가 조금이라도 증가할 경우, 고려해야 할 총 버퍼 할당의 조합은 기하급수적으로 늘어나게 된다.



<그림 1. Workstation 4 개로 구성된 흐름 생산라인>

3.2 FMS 에서의 버퍼 할당 문제

FMS 에서의 버퍼할당 문제는 위에서 살펴본 흐름 생산라인과는 많은 차이가 있다. 기본적으로 1 개의 Part 의 흐름에 따라 버퍼를 결정하던 것에서 여러 Part 의 각기 다른 Route 와 각 Workstation 에서의 작업시간이 Part 에 따라 달라지는 것을 고려해야 한다. 또한 한정된 AGV 와 Guide Path 의 공유에 따른 blocking, starving 등의 문제도 발생할 수 있다.

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

4. Workload 를 고려한 최적 버퍼 할당

4.1 개요

FMS 수행도의 중요한 변수로 Part 이동에 있어서의 blocking 또는 starving 에 의한 Flow Time 의 증가를 생각할 수 있다. 본 연구에서는 단방향 AGV 를 통해 Part 가 이동하는 시스템의 각 Parts

이동 성격을 정의하고 이를 분석하여, 가장 빈번하게 필요로 하는 Workstation 의 버퍼를 우선적으로 할당하려고 한다.

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

n_k : Workstation k 로 작업되기 위해 도착하는 횟수

h_k : 다음 작업을 위해 Workstation 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 Workstation 으로 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.

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

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

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

(a) State Variable

i : Workstation

x : Workstation i 에서 N 까지 할당 가능한 버퍼 용량

(4)

(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

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

(d) Boundary Condition

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

(e) $S(1, X)$ 의 값을 구해야 함

4.3 대기행렬이론의 적용

FMS 에서 Part 들은 미리 정해진 순서에 따라 이동하게 된다. 상황에 따라서는 이미 지나쳤던 Workstation 을 다시 방문할 수도 있다. 이러한 Parts 의 해당 Workstation 도착과 작업시간이 포아송과정을 따른다고 가정할 경우, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.



... ..
U U U
<그림 2. N Capacity 시스템의 상태 전이 다이어그램>

그림 2 와 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 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 움직임을 원활하게 해 줄 필요가 있다.

결론적으로 위에서 정의한 n_k 나 h_k 등은 각 Workstation의 Workload로 볼 수 있으며, 대기행렬이론을 통해 n_k 를 이용하고, 동적계획법으로 h_k 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 Part 경로 부여) Part의 경로에 따라 필요한 Arc와 Workstation을 포함한 Node만을 남기고 기타부분은 삭제한 후, 남아있는 Arc에 번호를 부여하고, 각 Part별 경로에 따른 Arc 번호를 정리한다.

(단계 3, Arc 성분 분석) Part에 따른 Arc 번호를 Arc의 목적지를 기준으로 n_k 와 h_k 를 찾아낸다.

(단계 4, n_k 분석) 각 Workstation의 작업 시간(u)과 n_k 를 통해 각 Workstation이 안정상태에서 Busy할 확률과 Idle할 확률을 알아낸다.

(단계 5, 동적계획법 적용) 단계 4를 통한 결과와 h_k 를 이용해 각 Workstation의 버퍼크기 변화에 따른 총 작업시간 척도를 계산해낸다.

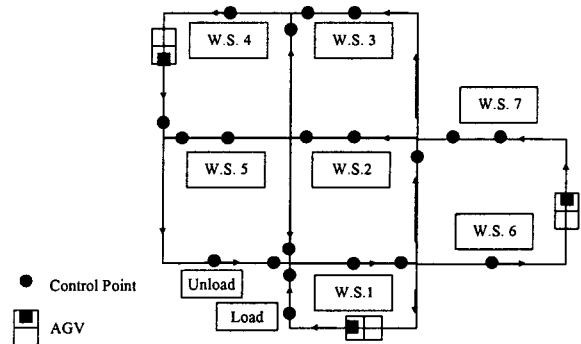
(단계 6, 동적계획법 풀이) 단계 5의 척도를 이용해 동적계획법을 풀어 $S(I, X)$ 를 찾아낸다.

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

5. 수리적 예제

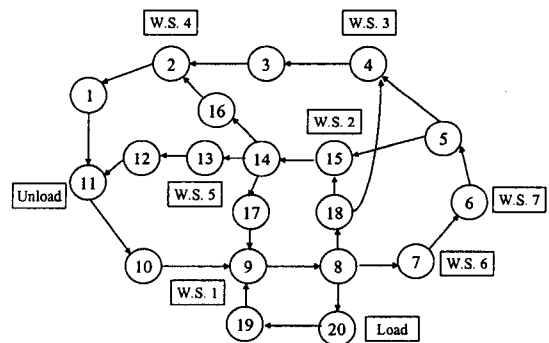
5.1 시스템 소개(그림 3참고)

- 7개의 Workstation과 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, Part의 흐름이 다른 Part와 부딪히는 가능성이 적은 쪽을 선택
- Part의 입고는 포아송과정 Rate u_1, \dots, u_7
- 각 Workstation의 작업시간은 Part에 따라 큰 차이 없이 포아송과정 rate u_1, \dots, u_7 을 따른다고 가정
- 4종류 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



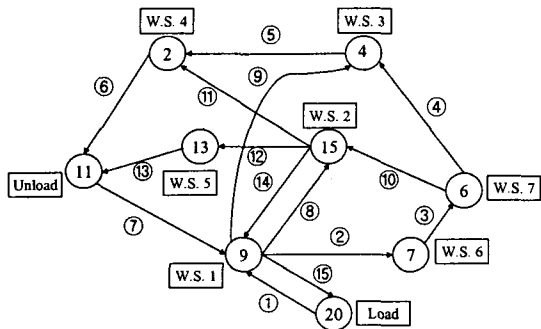
Part 2: Load-4-5-6-7-5-7-Unload
Part 3: Load-1-2-4-2-4-6-Unload
Part 4: Load-4-5-7-4-5-7-Unload
<그림 3. 대상 FMS>

(단계 1) 그림 3과 같은 대상시스템에서, 하나의 Node가 Control Point와 다음 Control Point 앞까지의 Route를 포함하도록 하여 그래픽적으로 표현하면 그림 4와 같은 결과를 얻게 된다.



<그림 4. 대상 FMS의 그래프화>

(단계 2) 그림 4에서 Workstation을 포함하는 Node만을 남기고 이를 단순화하고 각 Arc에 번호를 부여하면 그림 5와 같고, 이를 토대로 Parts들의 Route에 따라 정리하면 표 1과 같다.



<그림 5. 그래프의 단순화 및 Arc 번호화>

	Part 별 Route 에 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. Part 의 Route 에 따른 Arc 번호>

(단계 3, 4) 표 1의 결과를 바탕으로 n_k (표 1의 굵은 글씨체)와 h_k (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 Workstation 의 n_k, h_k >

안정상태에서 Workstation k 가 Busy 할 확률은 n_k 와 식 (7), (8)을 이용해 얻을 수 있다. 즉, n_k 만큼 rate λ_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 이용해 다음과 같이 구할 수 있다.

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

(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 풀이하

면 최적에 가까운 값이 산출된다.

(만약 $(n_k + 0.6 - x_k) < 0$ 이 될 경우 해당 항목은 ∞)

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>

7. 결론

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

6. 향후 연구 방향

양방향 AGV가 보편화된 추세에 맞추어, 이를 적용한 FMS에서의 버퍼할당에 관한 연구로의 범위확대와 n_k 와 h_k 가 시스템에 미치는 영향에 대한 보다 정확한 고찰을 바탕으로 R을 좀더 실제에 가깝게 조정하는 연구가 필요하다.

7. 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] Hunt, G.C., "Sequential arrays of waiting lines", *Operations Research*, No.4, Vol.6, pp 674-683, 1989

[7] Jafari, M.A., Shanthikumar, J.G., "Determination of optimal buffer storage capacities and optimal allocation in multistage automatic transfer lines", *IIE Transactions*, No.21, Vol.2, pp 130-135, 1989

[8] 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

[9] 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

[10] Powell, S.G., Pyke, D.F., "Allocation of buffers to serial production lines with bottlenecks", *IIE Transactions*, No.28, Vol.1, pp 18-29, 1996

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

[12] Vorusos, G.A., Papadopoulos, H.T., "Buffer allocation in unreliable production lines using a knowledge based system", *Computers Operations Research* Vol. 25, No. 12, pp 1055-1067, 1998