

Production Control in Multiple Bottleneck Processes using Genetic Algorithm

Ilhwan Ryoo* · Jung-ho Lee** · Jonghwan Lee**†

*Department of Business Administration, Kumoh National Institute of Technology

**The School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

GA를 이용한 복수 애로공정 생산방식제어

류일환* · 이정호** · 이종환**†

*금오공과대학교 경영학과

**금오공과대학교 산업공학과

This paper seeks to present a multi-control method that can contribute to effective control of the production line with multiple bottleneck processes. The multi-control method is the production system that complements shortcomings of CONWIP and DBR, and it is designed to determine the raw material input according to the WIP level of two bottleneck processes and WIP level of total process. The effectiveness of the production system developed by applying the multi-control method was verified by the following three procedures. Raw material input conditions of the multi-control method are as follows. First, raw materials are go into the production line when the number of the total process WIP is lower than established number of WIP in total process and first process is idle. Second, raw materials are introduced when the number of WIP of two bottleneck processes is lower than the established number of WIP of each bottleneck process. Third, raw materials are introduced when the first process and in front of bottleneck process are idle even if the number of WIP in the total process is less than established number of WIP of the total process. The production line with two bottleneck processes was selected as the condition for production environment, and the production process modeling of CONWIP, DBR and multi-control production method was defined according to the production condition. And the optimum limited WIP level suitable for each system was obtained by applying a genetic algorithm to determine the total limited number of WIP of CONWIP, the limited number of WIP of DBR bottleneck process, the number of WIP in the total process of multi-control method and the limited number of WIP of bottleneck process. The limited number of WIP of CONWIP, DBR and multi-control method obtained by the genetic algorithm were applied to ARENA modeling, which is simulation software, and a simulation was conducted to derive result values on the basis of three criteria such as production volume, lead time and number of goods in-progress.

Keywords : CONWIP, DBR, Multi Control Method, Bottleneck, Genetic Algorithm

Received 15 December 2017; Finally Revised 19 March 2018;

Accepted 20 March 2018

† Corresponding Author : shirjei@kumoh.ac.kr

1. 서론

제조업에서 제조비용을 줄이기 위하여 재공품재고의 최소화에 역점을 두고 있고, 생산성과 제조라인의 Capacity를 높이기 위한 노력을 하고 있다. 이를 위하여 제조라인의 대부분을 차지하고 있는 흐름 생산공정의 성능 향상과 관리가 중요하다.

원자재와 재공품 재고가 생산시스템에 투입되어 제품을 생산하는 흐름 공정에서 재공품 재고의 흐름을 제어하는 대표 방식은 Push 시스템과 Pull 시스템이 존재한다. Push 시스템은 정해진 생산계획과 원자재 공급에 의해서 운영이 통제되는 방식이며, Pull 시스템은 공정의 작업 상태와 필요에 따라 전 공정의 작업이 연쇄적으로 제어되는 방식이다.

Pull 시스템에서 많이 사용하는 칸반(Kanban)시스템에서는 재공품 또는 완제품을 이동시키는 역할을 한다. 이 신호는 하위 작업장과 상위 작업장을 적시에 생산할 수 있도록 연결시켜주는 고리로서 중요한 역할을 맡고 있는 것이다. 카드에는 부품의 번호가 부착되어 움직이게 되는데, 부품의 종류가 많아질수록 카드의 개수가 증가하는 단점을 가지고 있다[2, 9]. JIT 방식 단점을 보완하기 위해 CONWIP과 Gated MaxWIP, Critical WIP loops 등 여러 공정 제어 시스템을 개발하였다.

CONWIP은 생산 공정 내 WIP 수량을 일정하게 유지하는데, 공정라인이 길어지거나 애로공정에 대한 대처가 약한 문제점이 있다. TOC 이론 중 DBR은 공정 스케줄링 메커니즘으로 시스템 내에 존재하는 여러 자원 중에서 생산능력이 가장 떨어지는 제약자원에만 버퍼(Buffer)를 허용하여 시스템 변동(결품, 자원의 일시적 사용 불능 등)으로 인해 제약자원이 쉬는 일이 없도록 능력 제약자원을 최대한 활용한다. 그리고 로프(Rope)를 사용하여 적절한 공정 재고량을 유지하고, 드럼(Drum)으로 제약자원 및 비 제약자원 전체의 생산일정을 조절한다[3]. 그러나 실제 생산라인이나 반복공정을 갖는 생산라인에서는 애로공정(제약공정)이 2개 이상 존재할 수 있으며, 하나의 애로공정(제약공정)만 관리하는 기존 DBR은 적용하기 어렵다. 기존 연구 흐름 생산시스템에 적용되었던 CONWIP과 DBR은 단순한 생산 방식에 의한 한계가 있으며, 생산라인에 2개 이상의 애로공정이 존재할 경우에 따른 효율적이고 제조비용을 줄일 수 있는 차별된 생산라인의 관리기법이 필요하다.

본 연구의 목적은 기존 생산방식과 다르게 복수 애로공정이 존재하는 생산라인을 효과적으로 관리하는 새로운 제조라인의 관리 방법론인 다중 제어방식을 제시하는 것이다. 다중 제어방식이란, CONWIP과 DBR의 단점을 보완한 생산방식으로 2개 애로공정의 WIP 수준과 시스템 전체의 WIP 수준에 따라 원자재 투입을 결정하는 방식

이다. 동일한 생산환경 조건에서 CONWP, DBR, 다중 제어방식의 성능을 비교 분석한다. 생산공정의 성과를 결정하는 요인들은 생산량, 리드타임, 공정 내 재공품 재고 등 총 3가지 관리기준을 제시한다. 제시한 방법론의 분석을 위해 동일한 생산공정 환경을 정의하고 생산환경 조건에 맞게 ARENA Simulation 프로그램을 이용하여 CONWIP, DBR, 다중 제어방식이 적용된 생산시스템 모델링을 구현하였다. 그리고 CONWIP, DBR, 다중 제어 시스템 성능에 영향을 주는 최적 WIP 수준을 구하기 위해 Meta Heuristic Method인 Genetic Algorithm(GA)을 Matlab 프로그램을 이용하여 구현하였다.

2. 기존 논문 연구

DBR 메커니즘과 기존의 공정제어 메커니즘의 성능과 평가와 관련된 연구로 Satya(2001)는 job shop 환경에서 기존의 제어 메커니즘인 MIL(Modified Infinite Loading), IMM(IMMEDIATE)과 DBR의 성능을 평가하고 있다. 위 3가지 시스템과 2가지 작업배정규칙인 FCFS와 SPT를 조합하여 총비용, 재고비용, 납기 등의 관점에서 그 성능을 평가하였는데 DBR 시스템이 가장 좋은 성능을 보였다[7, 12].

Watson[12] 등은 DBR과 JIT의 칸반(Kanban) 시스템을 비교하였다. 실험결과, DBR 메커니즘이 칸반 시스템보다 더 작은 공정재고로 동일한 수준의 생산량을 보였으며, 동일한 수준의 생산량을 보이는 DBR이 칸반 시스템보다 더 짧은 리드타임과 낮은 리드타임 변동성을 보였다[7, 12].

이호창[8] 등은 상수 공정 시간을 갖는 라인생산시스템에서 CONWIP과 DBR이 각각 max-plus 선형 시스템의 특수형태를 밝히고 max-plus 대수에 기반한 안전대기 시간을 연구결과를 이용하여 CONWIP과 DBR의 성능을 비교 분석하였을 때, DBR이 CONWIP 시스템보다 우수한 결과를 보였다.

박상근[9]은 Push, Simple Pull, CONWIP, Gated Max-WIP, CWIPL 중에 어떤 시스템이 가장 좋은 성능을 보이는지 비교하며, 제조 환경에 따라 성능이 더욱 우수한 시스템을 제안하였다. 결과 Push 시스템은 생산량과 시스템이 복잡성이 상대적으로 높은 제조환경일 때 우수한 결과를 보여주었고, 전반적으로 CONWIP 시스템이 항상 우수한 결과를 보였다.

권치명[5] 등은 생산 공정 간 버퍼 제약이 있는 flow shop 시스템에 활동기간 기반 애로공정 발견기법을 적용하여 그 타당성을 분석하여 애로공정을 개선을 통한 생산 시스템 가용 자원의 효과적인 배치는 생산성 향상시키는 데 기여한다고 밝혔고, RFID 기술도 적용하기 위한 연구도 진행 중이다[5, 6].

김정섭 외[4]은 Pull System에는 공정의 WIP 수준을 결정해야 하는데 수리적 모형이나 전문가의 견해에 의해 결정된다. 하지만 공정이 복잡해지거나 반영해야 할 변수의 증가로 인해 WIP 수준을 결정함에 있어 어려움을 따른다. Pull System 기반의 생산 공정 모델에 GA를 적용하여 WIP 수준을 결정하는 방법을 제시하였다 .

3. 실험 조건 및 프로세스 정의

3.1 실험개요

실험을 위한 생산환경 조건은 기존 논문인 “CONWIP : a pull alternative to Kanban[11]”, “Gated MaxWIP : a strategy for controlling multistage production system[1]”과 “생산환경에 변화에 따른 공정관리 메커니즘 효율성[9]”, 유전자 알고리즘을 이용한 Work-In-Process 수준 최적화[4]”, “조립 공정을 갖는 주문제조업의 DBR 스케줄링 성능평가[7]”를 참조하여 다음 <Table 1>과 같이 정의하였다.

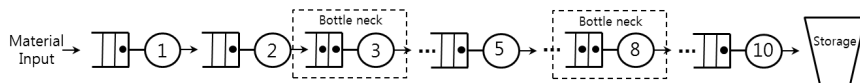
<Table 1> Conditions of Production Environment

Overview	Conditions
Common	<ul style="list-style-type: none"> • Flow-type production line • Maintain demand and supply at all times • Presence of two bottleneck processes • Trouble-free process • Goods in process is also regarded as WIP • Setup Time is ignored.

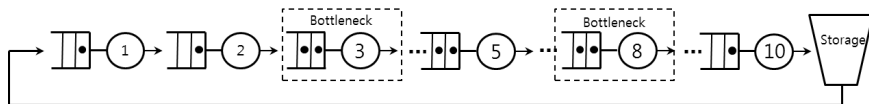
생산환경 조건은 흐름식 생산 작업라인이며 수요와 공급은 항상 유지하고, 작업라인에 2개 애로공정이 존재하며 공정내 기계 고장은 없고, 공정 내에서 작업 중인 재공품도 WIP로 간주하며, 작업준비시간(Setup Time)은 무시한다.

본 실험에 복수 애로공정을 가진 흐름 생산라인은 <Figure 1>과 같다.

제조 공정의 수는 10개이며 2개의 애로공정이 존재한다. 애로공정은 3번, 8번 공정으로 정의한다. 애로공정



<Figure 1> Production Line Model Existing Bottleneck Process



<Figure 2> CONWIP Model Existing Bottleneck Process

작업시간은 지수분포(Expo(10)), 일반공정 작업시간은 지수분포(Expo(5))를 따른다. 각 공정에서는 고장 및 작업 중단 등이 일어나지 않는다. CONWIP, DBR, 다중 제어 생산방식 실험을 위한 세부 생산환경 조건은 <Table 2>에 정리하였다.

<Table 2> Detailed Conditions of Production Environment

Overview	Conditions
Number of process	10
Bottleneck process	#3 process , #8 process
Bottleneck process time	Expo(10) min
Normal process time	Expo(5) min
Supply, Demand	Infinite
Production	CONWIP, DBR, Multi-Control
Performance measure	Throughput, Lead time, WIP

3.2 프로세스 정의

3.2.1 CONWIP

<Figure 2>는 2개 애로공정이 존재하고 총 공정의 수가 10개인 CONWIP 방식을 적용한 제조시스템이다. 애로공정은 3번 공정과 8번 공정이다. 애로공정 작업시간과 원자재 투입시간은 <Table 2>와 같이 지수분포(Expo(10))를 따르고, 일반 공정 작업시간은 지수분포(Expo(5))를 따른다. 전체 공정의 제한 WIP 수준 값은 GA를 적용하여 구할 것이다.

CONWIP의 경우 전체 공정의 WIP 수준을 관리하는 생산 방식이다. 따라서 전 공정의 WIP 수가 공정의 제한 WIP 수준보다 작을 경우에 원자재 또는 제품을 투입할 수가 있다. 생산라인에 제품이 투입 후에는 제품의 흐름은 Push 시스템의 특징을 가진다. CONWIP의 원자재 투입 규칙은 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Input Rule of Raw Materials in CONWIP

Rule	Contents
Rule 1	Raw material input if the number of WIPs in whole process is less than the WIP level limited to the whole process

3.2.2 DBR

<Figure 3>과 <Figure 4>는 CONWIP 방식과 동일하게 2개의 애로공정(3번 공정, 8번 공정)과 생산환경 조건을 가진 DBR 방식을 적용한 생산시스템이다. 기존 DBR 방식은 애로공정 하나의 WIP 수준을 집중 관리하는 생산 방식이다. 그러나 본 연구의 생산환경 조건은 애로공정이 2개 존재하기에 <Figure 3>과 같이 3번 애로공정을 관리하는 DBR 방식과 <Figure 4>와 같이 8번 애로공정을 관리하는 DBR 방식을 각각 구현하였다. 3번 애로공정을 관리하는 DBR 방식은 DBR1로 정의하고, 8번 애로공정 관리하는 DBR 방식은 DBR2로 정의한다.

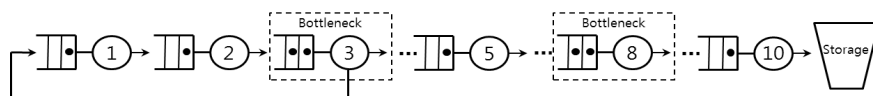
3번, 8번 애로공정의 제한 WIP 수준 값은 다음 장에서 유전자 알고리즘을 적용하여 구할 것이다. DBR 방식의 원자재 투입 규칙은 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Input Rule of Raw Materials in DBR

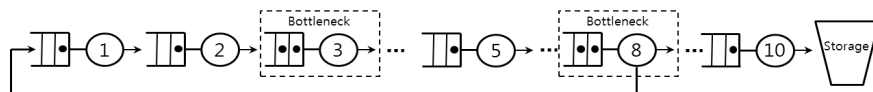
Rule	Contents
Rule 1	Raw material input if the WIP level of bottleneck process is lower than the WIP level limited to bottleneck process

3.2.3 다중 제어방식

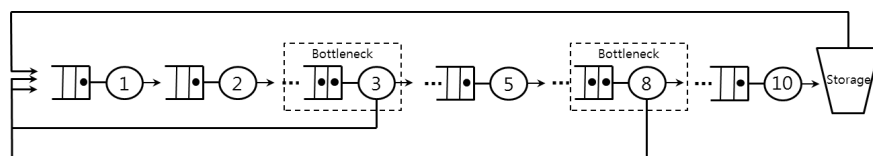
<Figure 5>는 CONWIP, DBR과 동일하게 2개의 애로공정(3번 공정, 8번 공정)과 생산환경 조건에서 개발한 다중 제어방식 모형이다. 다중 제어방식이란, CONWIP과 DBR의 단점을 보완한 생산방식으로 2개 애로공정의 WIP 수준과 시스템 전체의 WIP 수준에 따라 원자재 투입을 결정하는 방식이다. 2개의 애로공정의 제한 WIP 수준과 전체 공정의 제한 WIP 수준을 설정하여 원자재 투입을 관리함으로써 불필요한 원자재 투입을 막는다. 다중 제어방식의 원자재 투입 규칙은 <Table 5>와 같다.



<Figure 3> DBR1 Model Managing #3 Bottleneck Process



<Figure 4> DBR2 Model Managing #8 Bottleneck Process



<Figure 5> Multi-Control Model Existing Two Bottleneck Processes

<Table 5> Input Rule of Raw Materials in Multi-Control

Rule	Contents
Rule 1	Raw material input when the WIP level of whole process is lower than the WIP level set to whole process, and the first process is Idle.
Rule 2	Raw material input when the WIP level of two bottleneck processes is lower than the WIP level set to bottleneck process, and the first process is Idle
Rule 3	Raw material input when the WIP level of whole process is lower than the WIP level set to whole process, whereas the WIP level of bottleneck process is higher than the WIP level set to bottleneck process, and the first process and the one prior to bottleneck process are Idle

<Rule 1>, <Rule 2>에 첫 번째 공정이 Idle 상태일 때 원자재 원자재가 투입하는 조건은 각 애로공정 원자재 투입 신호와 최종 공정에서 완제품이 출하되었을 때와 원자재 투입신호가 반복적으로 발생하게 될 때 첫 번째 공정에 WIP을 관리할 수 있고, 리드타임이 감소하는 효과를 가져올 수 있다. <Rule 3>은 생산라인 내 WIP이 과도하게 애로공정에만 쌓여 원자재 투입이 되지 않아 다른 공정의 작업 효율은 떨어지는 것을 방지하기 위한 원자재 투입 규칙이다. 즉, 애로공정 외 다른 공정의 공정 효율을 일정하게 유지하며 리드타임을 감소하는 효과를 가져올 수 있다.

3.3 Genetic Algorithm(GA) 적용

CONWIP, DBR 다중 제어방식을 적용한 생산시스템의 최적 제한 WIP 수준 값을 구하기 위해 GA를 이용하여 구현하였다.

3.3.1 유전자 생성 및 표현

GA를 적용하기 위해 <Figure 6>과 같은 Geno Type의 유전자 집단을 생성한다. 3번, 8번 유전자를 제외한 각 염색체는 1~5사이의 랜덤값을 가지고 3번 8번 애로공정 염색체는 15 이하의 랜덤값을 가지는 1×10 행렬로 표현된다. 본 연구의 집단크기(Population Size)는 10으로 정하여, 초기 유전자 집단의 행렬은 10×10이 된다. <Figure 6>은 본 연구의 유전자타입으로 적용한 예시이다.

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Chromosome	1	1	6	4	1	2	4	9	3	1

<Figure 6> Example of Gene Type

유전자는 CONWIP, DBR, 다중 제어 생산방식에 따라 역할이 나뉘게 된다. CONWIP은 모든 유전자의 합이 생산 시스템의 전체 WIP 수준을 나타낸다. DBR1은(3번 애로공정)은 1번에서 10번까지 모든 유전자의 합이 생산 시스템 전체 WIP 수준을 나타내고 3번 유전자가 애로공정의 제한 WIP 수준을 의미한다. DBR2(8번 애로공정)는 8번 유전자가 애로공정의 제한 WIP 수준을 의미한다. 다중 제어방식은 1번부터 10번까지 염색체의 합이 전체 생산 시스템의 WIP 수준을 나타내며 3번과 8번은 각각 애로공정의 제한 WIP 수준을 의미한다.

3.3.2 유전자 조작

유전자 조작에 있어서 본 연구에서는 해의 형태요소 중 순서, 앞뒤 상관관계보다는 한 위치에서 유전자의 값의 크기가 중요하고, 유전자 값이 중복되어도 무관하다. 따라서 유전자 알고리즘에서 가장 많이 이용하는 일점 교차를 사용한다. 그리고 중복된 값이 문제를 해결하는데 아무런 영향을 주지 않으므로 단순돌연변이 방법으로 돌연변이를 일으켜 준다. 그러나 돌연변이 후, 유전자의 값이 음수(-)값을 가질 때에는 이를 양수(+)로 바꾸어 주는 보정 작업을 하게 된다. 또한 유전자 조작과정에서는 다음 유전자 최소값 조건을 만족하도록 보정하여야 한다.

- 1) CONWIP, DBR1, DBR2, 다중 제어방식의 염색체의 전체 합이 최소 1 이상의 값을 갖도록 보정해야 한다.
- 2) DBR1은 3번 염색체 WIP 수준 값이 최소 1 이상 갖도록 보정해야 한다.
- 3) DBR2는 8번 염색체 WIP 수준 값이 최소 1 이상 갖도록 보정해야 한다.
- 4) 다중 제어 시스템은 3번, 8번 염색체 WIP 수준 값이 최소 1 이상 갖도록 보정해야 한다.

3.3.3 평가함수(Fitness Function)

평가함수의 경우 본 연구에서는 전체 WIP 수준의 합과 애로공정의 WIP 수준 결과값을 이용하여 시스템의 평가 함수(Fitness Function)를 다음과 같이 정의하였다.

$$Fitness\ Function = \frac{100,000}{8(wipN) + 5(wipB)}$$

wipN = 각 공정 WIP 수준의 합

wipB = 애로공정 WIP의 합

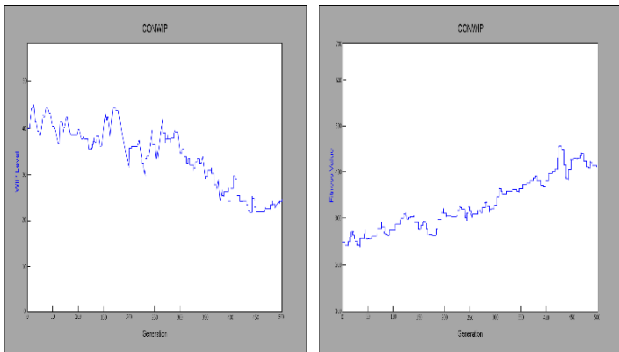
각각의 Parameter에 곱해진 상수는 문제를 해결함에 있어서 Parameter가 가지고 있는 가중치를 표현한 것이다. 분자의 상수 값은 각각의 Parameter 값이 작아질수록 평가함수의 값이 커지도록 하는 효과를 가지는데, 이때 결과치를 더 명확하게 구분하여 확인하기 위해 100,000 상수 값을 적용하였다. 평가함수에 애로공정의 WIP 수준의 값을 반영함으로써 유전자 알고리즘을 통해 애로공정의 적정 WIP 수준을 구할 수 있다.

3.3.4 선택(Select Operation)

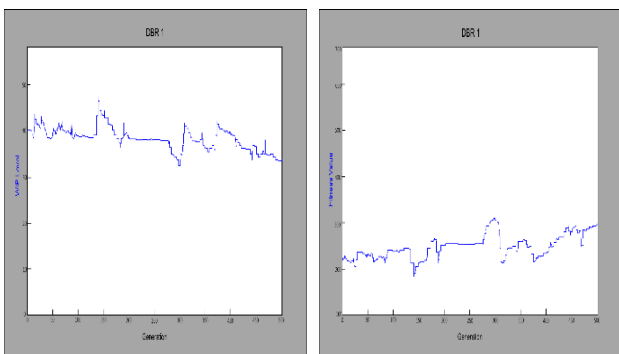
유전자 선택은 유전자 알고리즘에서 가장 많이 쓰이는 기법인 룰렛 휠 선택을 사용한다. 평가함수를 통해 구해진 값이 클수록 룰렛 휠 선택에서 선택될 확률은 높아진다. 따라서 집단에서 발달이 덜 된 유전자(평가함수 값이 낮은 유전자)가 생태계에서 자연도태 되는 현상을 프로그래밍으로 구현할 수 있다.

3.3.5 GA 구현 결과

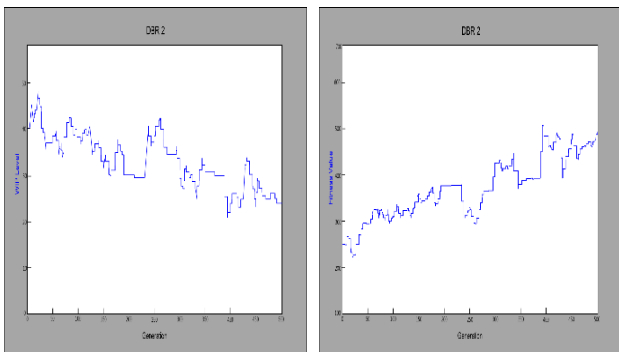
본 연구에서는 GA를 이용하여 CONWIP, DBR1, DBR2 다중 제어방식이 적용된 생산 시스템 최적 제한 WIP 수준을 도출하였다. CONWIP, DBR, 다중 제어방식이 적용된 생산시스템의 최적 WIP 수준 결정 모형에 유전자 알고리즘에서 많이 쓰이는 룰렛 휠 방법을 적용하였다. 염색체 집단크기는 10개, 최대 세대 수는 500개로 설정하였다. 각 시스템의 평가함수의 값은 WIP 수준에 따라 크게 달라지게 된다. 그러므로 그래프와 같이 WIP 수준이 최적 WIP 수보다 증가하면 평가함수 값은 작아지고, WIP 수준이 최적의 값이 될수록 평가함수 값은 증가하는 반비례 현상이 나타난다. 평가함수 값에 따른 전체 시스템의 데이터 결과 값을 다음 <Table 6>과 같다. CONWIP 방식은 전체 공정 WIP 수준만 고려하므로 애로공정 WIP 수준은 배제하였다. 반면 DBR은 애로공정 WIP 수준을 관리하는 방식으로 전체 공정 WIP 수준은 배제하였다. 다중 제어방식은 전체 공정 WIP 수준과 3번, 8번 애로공정 WIP 수준을 모두 적용하였다.



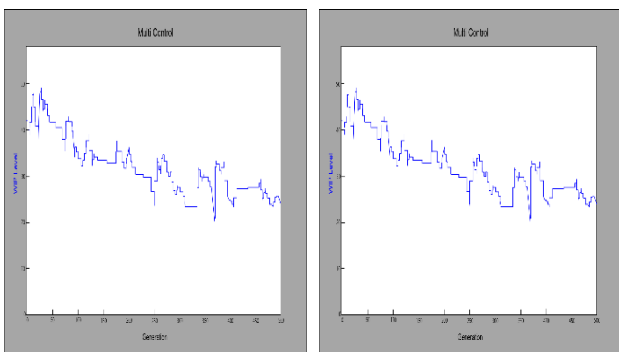
<Figure 7> WIP Level & Fitness Value in CONWIP



<Figure 8> WIP Level & Fitness Value in DBR1



<Figure 9> WIP Level & Fitness Value in DBR2



<Figure 10> WIP Level & Fitness Value in Multi-Control

<Table 6> Optimal WIP Level Using Genetic Algorithm

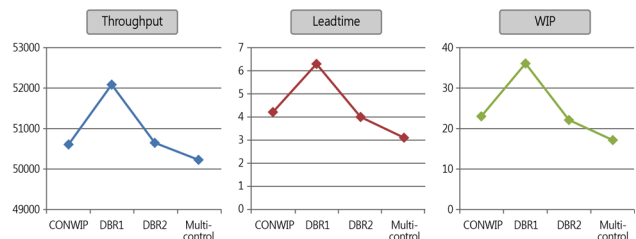
Production	Total WIP	#3 bottleneck process WIP	#8 bottleneck process WIP
CONWIP	23	•	•
DBR1	•	5	•
DBR2	•	•	9
Multi-control	21	6	8

4. 결 과

4.1 시뮬레이션 결과

ARENA 프로그램으로 구축한 CONWIP, DBR, 다중 제어방식에 유전자 알고리즘을 통해 구한 제한 WIP 수준 값을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 생산량, 리드타임, 재공품 재고 등 3가지 척도로 비교 분석 하였다.

시뮬레이션 종료시간은 10,000시간으로 설정하였으며 5번 반복 수행하였다. 그리고 결과값에 초기조건의 영향을 배제하기 위해서 Warm-up 1,000시간을 제외하고 결과값을 도출하였다. <Figure 11>과 <Table 7>은 시뮬레이션 결과값을 정리한 표이다.



<Figure 11> Result of CONWIP, DBR and Multi-Control

<Table 7> Result of CONWIP, DBR and Multi-control

Production	Throughput	Leadtime(hour)	WIP
CONWIP	50505	4.2	23
DBR1	52082	6.3	36
DBR2	50637	4.0	22
Multi-control	50286	3.1	17

시뮬레이션을 통한 생산방식 분석결과 리드타임과 재공품 재고 수준은 다중 제어방식 > DBR2 > CONWIP > DBR1 순으로 나타났다. 다중 제어방식을 적용한 생산시스템은 2개 애로공정 WIP 수준과 전체 공정의 WIP 수준으로 원자재 투입을 동시에 통제함으로써 리드타임 단축과 재공품 재고 감소 결과값을 얻을 수 있었다. 그러나

생산량에 있어서는 $DBR1 > DBR2 > CONWIP >$ 다중 제어방식 순으로 나타났다. 3번 애로공정 WIP 수준을 관리하는 DBR1은 높은 생산량 결과값을 얻었으나 재공품 재고와 리드타임에서 큰 값을 가지므로 효과적이라고 할 수 없다. DBR 방식의 단점인 로프(Rope)의 길이가 짧으면 전반적으로 Push 시스템의 생산방식이 나타나며, 애로공정의 WIP 수준은 줄지만, 전체 시스템의 성능에 저해한다는 점을 보여준다. 그리고 다중 제어 방식이 CONWIP, DBR 방식보다 리드타임이 짧지만 생산량이 적은 이유는 2개의 애로공정 WIP 수준과 전체 공정 WIP 수준을 함께 고려하여 원자재 투입을 통제함으로써 CONWIP, DBR 방식에 비해 불필요한 제품 투입을 줄여 리드타임 단축과 재공품 재고에서 감소하였지만 생산량도 함께 감소한 것을 확인할 수 있다.

4.2 통계적 검정

통계적인 검정은 CONWIP, DBR, 다중 제어방식을 적용한 생산시스템의 성능 결과값이 통계적으로 차이가 있는지 검정해 본다. 통계적 수치는 각 생산 방식 별 생산량, 리드타임, 재공품 재고이고, 신뢰수준 95%의 Paired t-Test를 사용하였다. 통계적 검정에 있어서 DBR1은 생산량, 리드타임과 재공품 재고 결과값이 큰 차이가 나타나서 통계적 검정에서 제외하고, CONWIP, DBR2, 다중 제어방식이 적용된 생산시스템만 통계적 검정에 포함하였다.

첫 번째 검정은 CONWIP과 다중 제어방식이 적용된 생산시스템의 생산량, 리드타임, 재공품 재고 결과값의 검정이다. 시뮬레이션 5회 반복하여 Paired t-Test로 통계적으로 검정한다.

Paired t-Test 통계적 검정결과 리드타임과 재공품 재고 결과값의 신뢰구간이 0을 포함하지 않으므로 통계적으로 유의하다. 즉, CONWIP 방식이 적용된 생산시스템과 다중 제어방식이 적용된 생산시스템은 리드타임과 재공품 재고에 있어서 시스템 성능 차이가 있다고 할 수 있다. <Table 7>의 시뮬레이션 결과값처럼 리드타임과 재공품 재고 시스템 성능은 다중 제어 방식이 적용된 시스템이 더 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 생산량은 통계적 검정 결과값이 0을 포함하므로 통계적으로 유의하지 않다. 즉, CONWIP 방식이 적용된 생산시스템과 다중 제어방식이 적용된 생산시스템은 생산량에 있어서 시스템 성능 차이가 있다고 할 수 없다. <Table 7>의 결과값에서는 생산량에서 다중 제어방식이 CONWIP보다 적지만 통계적으로 생산량은 차이가 없다고 할 수 있다.

두 번째 검정은 DBR2와 다중 제어방식이 적용된 생산시스템의 생산량, 리드타임, 재공품 재고 결과값의 검

정이다. 시뮬레이션 5회 반복하여 Paired t-Test로 통계적으로 검정한다.

Paired t-Test 통계적 검정결과 리드타임과 재공품 재고 결과값의 신뢰구간이 0을 포함하지 않으므로 통계적으로 유의하다. 즉, DBR2 방식이 적용된 생산시스템과 다중 제어방식이 적용된 생산시스템은 리드타임과 재공품 재고에 있어서 시스템 성능 차이가 있다고 할 수 있다. <Table 7> 시뮬레이션 결과값처럼 리드타임과 재공품 재고 시스템 성능은 다중 제어방식이 적용된 시스템이 더 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 생산량은 통계적 검정 결과값이 0을 포함하여 통계적으로 유의하지 않다. 즉, DBR2 방식이 적용된 생산시스템과 다중 제어방식이 적용된 생산시스템은 생산량에 있어서 시스템 성능 차이가 있다고 할 수 없다. <Table 7> 결과값에서는 생산량에서는 다중 제어방식이 DBR2보다 적지만 통계적으로 생산량은 차이가 없다고 할 수 있다.

통계적 검정 결과, 복수 애로공정이 존재하는 흐름식 생산라인에서 다중 제어방식은 CONWIP, DBR 방식과 생산량은 차이가 없다고 할 수 있다. 그러나 리드타임과 재공품 재고는 다중 제어방식이 더 효과적이라고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 제조 공정의 개선을 통하여 시스템 내 재공품 수를 최소화하고, 생산비용을 절감하는 효율적인 제어 생산방식을 연구하고, 새로운 제어 생산 방식에 제시하였다. 새로운 제어 생산방식은 흐름 생산라인에 복수 애로공정이 존재할 때 기존의 CONWIP, DBR 생산방식의 단점을 보완한 다중 제어방식이다. 다중 제어 방식을 적용하여 개발한 생산시스템에 대한 효과 검증은 다음과 같다. 생산조건에 맞게 CONWIP, DBR, 다중 제어생산방식의 생산공정을 시뮬레이션 프로그램인 ARENA로 모델링 하였다. 시뮬레이션 모델링 방법에 있어서 각 시스템 조건, 시스템 패턴, 구축 방법 등을 제시하였다. 또한 각 시스템의 성능에 중요한 요소인 최적 WIP 수준 설정은 기존 수리적 모형이나 전문가의 견해가 아닌 유전자 알고리즘을 이용하여 결정하였다. 유전자 알고리즘을 통해 각 시스템의 허용 WIP 수준을 결정함으로써 CONWIP, DBR, 다중 제어방식이 동일한 생산환경 조건에 맞는 최적 시스템을 구축하고 시뮬레이션 실시하여 시스템 성능을 비교 분석할 수 있었다.

복수 애로공정이 존재하는 생산라인에 다중 제어방식을 도입하였을 때 성능의 효과는 다음과 같다. 애로공정의 WIP 수준과 전체 공정의 WIP 수준에 따라 원자재 투

입함으로써 기존의 생산방식인 CONWIP, DBR보다 리드타임 단축, 공정 내 재공품 감소 등의 효과를 얻을 수 있었다.

복수 애로공정이 존재하는 흐름식 생산라인에 다중 제어방식을 적용하면 리드타임 단축과 공정 내 재공품 감소로 생산비용 절감 및 기업의 생산 경쟁력 강화에 될 것이라 기대한다. 그러나 본 연구는 비용 관계를 고려하지 못한 한계점이 있다. 정확한 시스템 성능 비교를 위해 생산 제품의 비용, 재고비용 등을 함께 고려한 비교·분석이 필요하다. 또한, 한 가지 제품을 생산하는 과정을 바탕으로 연구가 진행되었지만 다양한 제품을 생산하는 방식에서의 추가 연구가 필요할 것이다. 그리고 복수 애로공정이 존재하는 단품 생산라인을 대상으로 연구가 되었으나 추후 병렬과 직렬이 존재하는 생산라인, 반복공정이 존재하는 생산라인, 조립 생산라인, 다수 애로공정이 존재하는 생산라인 등에도 다중 제어방식을 적용할 수 있도록 지속적인 연구와 개선이 필요할 것이다.

Acknowledgement

This paper was supported by Kumoh National Institute of Technology.

References

- [1] Grosfeld-Nir, A. and Magazine, M., Gated MaxWIP : a strategy for controlling multistage production system, *International Journal of Production Research*, 2002, Vol. 40, No. 11, pp. 2557-2568.
- [2] Grosfeld-Nir, A., Magazine, M., and Vanberkel, A., Push and pull strategies for controlling multistage production system, *International Journal of Production Research*, 2000, Vol. 38, No. 11, pp. 2361-2375.
- [3] Kim, H.N., *A Study on Optimization of Manufacturing Flow Line*, Using TOC and Pull-Push System, Chungnam National University, 2008.
- [4] Kim, J., Jung, J.Y., and Lee, J., Optimizing Work-In-Process Parameter using Genetic Algorithm, *Journal of Society of Korea Industrial Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 2, pp. 79-86.
- [5] Kwon, C.M. and Lim, S.G., Bottleneck Detection Based on Duration of Active Periods, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 2013, Vol. 22, No. 3, pp. 35-41.
- [6] Lee et al., Development of Robotic System based on RFID Scanning for Efficient Inventory Management of Thick Plates, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2016, Vol. 17, No. 10, pp. 1-8.
- [7] Lee, G.H., *The performance Evaluation of DBR for An MTO Manufacturing with an Assembly Process*, AJU University, 2009.
- [8] Lee, H.C. and Seo, D.W., Comparison of DBR with CONWIP in a Production Line with Constant Processing Times, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 2012, Vol. 21, No. 4, pp. 11-24.
- [9] Park, S.G., *Performance comparison of process control mechanism due to changes in the production environment*, Hongik University Institute of Technology, 2010.
- [10] Satya, S.C., An evaluation of the DBR control mechanism in a job shop environment, *Omega*, 2001, Vol. 29, No. 4, pp. 335-342.
- [11] Spearman, M.L., Woodruff, D.L., and Hopp, W.J., CONWIP : a pull alternative to kanban, *International Journal of Production Research*, 1990, Vol. 28, No. 5, pp. 879-894.
- [12] Watson, K.J. and Patti, A., A comparison of JIT and TOC buffering philosophies on system performance with unplanned machine downtime, *International Journal of Production Research*, 2008, Vol. 46, No. 7, pp. 1869-1885.

ORCID

- Ilhwan Ryoo | <http://orcid.org/0000-0001-8124-3685>
 Jung-ho Lee | <http://orcid.org/0000-0001-8344-4077>
 Jonghwan Lee | <http://orcid.org/0000-0001-9630-5236>