

재투입공정 하에서 DBR 기법 적용 방안 및 효과분석

양현준 · 정석재 · 윤성욱[†]

An Application Method and Effect Analysis of the DBR(Drum-Buffer-Rope) Method Under the Re-entrant Process

Hyunjun Yang · Sukjae Jeong · SungWook Yoon[†]

ABSTRACT

Many researchers have recommended that DBR scheduling would be an efficient method to maintain the balance of their workload among many processes in the general flow shop. However, as product variety has increased in recent years, the process has become more complex and requires the re-entrance of raw materials and work in process. The re-entrant line has known for the complex manufacturing process that raw materials are repeatedly processed on the same machine. This study reviews the applicability of DBR against the re-entrant manufacturing line due to the distinguishing characteristics and the higher complexity caused by multiple visits of a job into the identical process. In order to apply the DBR method to the re-entrant process, the main idea is to reconstruct re-entrant process into a virtual flow process(loop) that has a single bottleneck. This study discusses the following two questions. First, DBR is also superior to traditional scheduling methods against re-entrant manufacturing line. And how we structure and detect the system bottleneck (or sub-bottleneck) through drum-buffer-rope concepts. To answer the above questions, we experimented and analyzed the effects of the applicability of DBR under the general re-entrant process model(TRC, Technology Research Center). As a result, we have identified a balance between loops for cycle time and work in process.

Key words : Re-entrant process, Drum-Buffer-Rope, Simulation, TOC

요약

DBR(Drum-Buffer-Rope)은 하나의 병목공정이 존재하는 생산라인을 드럼, 버퍼 그리고 로프로 구성하여 제약설비인 병목공정을 중심으로 효과적인 스케줄링을 수립하는 데 좋은 전략으로 알려져 있다. 하지만 최근 제품의 다양성이 증가되면서 공정의 복잡성이 높아지고, 자재 및 중간재의 재투입을 요구하는 공정이 많아지고 있다. 재투입 공정은 원자재가 완제품으로 생산될 때까지 동일한 설비에서 반복적으로 작업처리가 되어야 하므로 복잡한 작업환경을 가지게 된다. 본 연구는 기존의 흐름공정에서 우수한 성능을 보인 DBR 기반의 스케줄링 방법이 재투입이 있는 공정에서도 효과적으로 적용 가능한지 여부와 이를 위해서 추가적으로 검토되어야 할 전략들을 다루었다. 본 연구의 핵심은 재투입 공정에 DBR 방법을 적용하기 위하여 재투입 공정을 여러 개로 쪼개어 하나의 병목공정을 갖는 임의의 흐름공정(루프)으로 재구성한다는 점이다. 이러한 구조를 기반으로 본 연구에서는 두 가지 의사결정에 초점을 맞추어 생산 스케줄링 전략을 구성하였다. 첫째, 흐름공정마다 적정 수준의 재고수준과 안정적인 생산성을 유지하기 위해 자재 투입시점과 적절한 투입량을 결정한다. 둘째는 각 공정별 상이한 작업 우선순위를 결정하는 방법이다. 본 연구는 실험을 위해 HP사의 TRC(Technology Research Center) 공정에 대한 시물레이션 모델을 설계하였고, DBR 기반 루프 스케줄링을 적용한 결과, cycle time의 감소 및 재공품재고의 루프 간 균형을 유지하는 것을 확인하였다.

주요어 : 재투입 공정, 드럼-버퍼-로프, 시물레이션, 제약이론

* 본 연구는 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B07050455)의 지원으로 수행되었습니다.

Received: 18 February 2020, Revised: 21 February 2020,
Accepted: 22 February 2020

[†] Corresponding Author: SungWook Yoon

E-mail: giantguard@naver.com

Management Dept., Kwangwoon University, Seoul, Korea

1. 서론

오늘날 기업 환경의 급격한 변화는 고객의 다양한 요구에 기업이 신속하게 반응할 것을 요구하고 있으며, 기업은 이러한 요구를 생산정책 및 생산 시스템에 반영하

여 더욱 더 고객의 요구를 만족하고자 노력하고 있다.

일반적으로 생산시스템은 Pull control system과 Push control system으로 구분할 수 있다. MRP(Material Requirement Planning)시스템으로 대표되는 Push Control System은 최종 수요를 예측한 후, 예측된 수요를 적시에 만족시키기 위하여 각 생산 공정에서의 생산 시기와 생산량을 결정하는 방식이다. 따라서 모든 공정에서 생산이 사전 계획에 따라 Push 방식으로 진행된다.

반면 Pull Control System은 일정 수준의 재고를 유지하면서 후 공정에서 수요가 발생하면, 그 수요가 전 공정으로 전달되어 전 공정이 생산을 유도하는 방식이다. 따라서 모든 공정에서의 생산시기가 사전 계획이 아닌 그때의 시스템 상태에 따라 달라진다. Push Control System의 대표적인 예로 적시 생산시스템(JIT, Just in Time)을 들 수 있다. 또, 적시 생산 시스템의 하부 시스템인 간판(Kanban system)은 1970년대부터 일본기업들이 적용하고 있었으며, 낭비요소가 최소화된 효율적인 생산 운영 및 통제시스템으로 도요타 자동차에서 큰 성공을 이룬 이후, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

간판시스템은 재공품재고를 일정수준이하로 유지하고 통제하는 데 탁월한 시스템으로 알려짐에 따라 다양한 생산 공정 유형에서 이를 활용하는 사례가 많아지고 있다. 간판 시스템의 대표적인 유형으로 알려져 있는 CONWIP(Constant WIP) 방법은 생산 공정을 Push와 Pull이 혼재된 Coupling 방법으로 나누어, Pull 방식의 공정에서는 재고를 최소화하고, Push 방식의 생산 공정에서는 자재를 DBR 기반으로 투입하는 방식을 권고하고 있다.

CONWIP 시스템의 효과성이 점차 확대되면서, 이에 발맞추어 많은 연구자들이 TOC(Theory of Constraints), DBR(Drum-Buffer-Rope) 방식을 활용한 생산 시스템 통제 방법에 대해 관심이 가지게 되었다. TOC 이론에서는 “시스템이 그 목표를 달성하는 데 제약이 되는 요인”을 정의하고 기업은 지속적으로 제약이 되는 요인을 찾아내고 개선하여 단기적으로 기업의 이익에 기여하고, 장기적으로는 이러한 개선작업을 통해 시스템을 최적화하여야 한다는 것을 강조하고 있다. 많은 선행연구에서 TOC와 DBR을 이용하여 생산 스케줄링의 효과를 검증하고 있지만, 대부분의 연구들은 흐름공정 하에서의 그 효과를 검증하는 데 초점을 맞추고 있다.

하지만 고객 요구가 다양화됨에 따라 제품의 복잡성이 높아지면서 제품 생산라인에 원재료나 중간제품의 재투입이 빈번하게 발생하고 있다.

재투입이 있는 흐름공정은 전형적인 혼합 흐름공정으

로 직렬의 공정을 통해 제품을 생산하는 데 각 공정마다 복수의 병렬 장비를 갖는 제조 시스템과 물리적 형태는 동일하지만, 제품의 생산과정 중 전체 또는 일부 공정을 두 번 이상 방문하는 즉 재투입되는 제조 사양의 특징을 갖는다. 이러한 재투입 제조 특성은 반도체, TFT-LCD, PCB 제조와 같은 첨단 전자 제품의 제조공정에서 흔히 볼 수 있다.

일반 흐름공정과 달리 재투입 있는 공정에서는 하나의 완제품이 생산되기 위해 특정 공정에서 반복적인 작업이 이루어지는 것이 일반적인 특징이다. 따라서 일반 흐름공정과 달리 재투입 공정은 병목이 동적으로 변화할 수 있어 병목공정을 식별하는 것이 쉽지 않으며, 이는 결국 생산라인의 흐름 균형을 유지하는 것을 어렵게 한다. 따라서 일반 흐름공정과 동일한 방식으로 DBR 방법을 재투입 공정에 적용하는 경우 생산성 개선 효과를 기대하기는 어렵다.

재투입 있는 공정에서 DBR을 효과적으로 적용하기 위한 생산전략이 무엇이며, 전략에 따른 생산성 효과가 어느 정도인지를 측정한다면, 향후 많은 연구에서 재투입 있는 복잡한 생산라인에서도 보다 효과적으로 DBR 방식의 스케줄링을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 기존의 흐름공정에서 우수한 성능을 보인 DBR 기반의 스케줄링 방법이 재투입이 있는 공정에서도 적용 가능한지 여부와 이를 위해서 고려되어야 할 전략들을 다루고 있다. 따라서 본 연구는 크게 두 가지의 의사결정에 초점을 맞추고자 한다. 첫째, 재투입 있는 생산라인에서 적정 수준의 재고수준을 유지하기 위해서는 무엇보다도 자재 투입시점을 효과적으로 결정하는 것이 필요하다. 공정 내 재고수준이 높을 경우 과도한 재고유지 비용이 초래될 가능성이 높으므로, 생산율에 맞춘 작업 투입시점(Job release) 결정을 효과적으로 이행하기 위한 전략은 중요한 의사결정 중 하나라고 볼 수 있다. 작업 투입시점을 결정하는 문제는 투입을 위해 대기 중인 작업들의 투입 시점 및 투입 순서를 결정하는 문제로 생산시스템의 통제 문제에서 매우 중요한 문제로 알려져 있다.

특히 다품종 소량생산체제 환경 하에서는 고객의 납기 요구를 만족시키기 위하여 효과적인 작업 투입 통제 규칙이 필요하다. 작업 투입의 시점이 적절하지 못해서 너무 빨리 자재를 투입하면 생산시스템의 혼잡도를 증가시킬 뿐만 아니라 재고의 양이 증가하게 되며, 반면에 너무 늦게 투입이 되면 납기 내에 생산을 완료하지 못하게 되므로 고객의 수요를 충족시켜줄 수가 없다.

둘째는 우선순위를 결정하는 방법이다. 재투입 있는

생산라인에서는 특정 공정에서 여러 차례 반복된 작업이 이루어지기 때문에 해당 공정에서의 작업 순서를 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 시스템 병목공정으로 지정하고, 시스템 병목공정을 중심으로 라인 밸런싱을 위한 전략을 마련하는 것이 필수적이다. 라인 밸런싱이 원활히 이루어지지 않을 경우, 재공품재고 수준이 높아지고 시스템 체류시간이 길어지는 등의 생산성이 나빠지는 결과를 초래할 수밖에 없다.

위의 두 가지 문제를 해결함에 있어 본 연구는 DBR 기반의 방법을 적용하고자 한다. 생산 스케줄링을 위한 다양한 의사결정 방법들이 논문에서 제시되고 있지만, 실제 현장에서 활용하는 데 있어 쉽게 접근이 가능하고, 이행하는 데 효과적인 방법이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 DBR 기반의 투입 통제와 작업 우선순위를 결정하는 방법을 제안하고, 제안된 전략들의 성능 효과를 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 선행연구

재투입이 있는 공정은 하나의 원자재가 완제품으로 생산될 때까지 같은 공정을 두 번 이상 재 방문하는 공정을 말한다. 일반적으로 반도체나 TFT-LCD, PCB 제조공정이 재투입이 있는 흐름공정으로 알려져 있으며, 재투입이 있는 공정 흐름은 Figure 1과 같다.

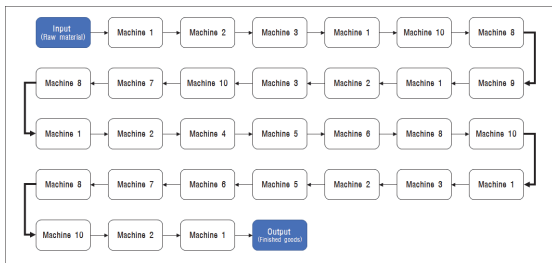


Fig. 1. The flow of Re-entrant manufacturing

일반적인 흐름공정은 n 개의 작업 i 가 설비 j 에서 한 번만 처리되지만, 재투입 공정은 n 개의 작업 i 가 설비 j 에서 한번 이상 처리되는 공정을 말한다. 재투입 공정은 재투입이 존재하는 flow shop공정과 job shop공정으로 구분될 수 있다. 두 공정의 차이는 작업 i 의 작업 순서에 있다. 만일 작업 i 가 모든 설비를 거쳐 완제품으로 생산되면 재투입이 있는 흐름 공정(Re-entrant flow shop)이라 하고, 각 작업마다 다른 작업 순서를 통해 완제품이 생산되는 경우 이를 재투입이 있는 Job shop 공정(Re-entrant job shop)

이라고 정의한다(Danping, Lin, and Carman KM Lee. 2011).

재투입 공정 스케줄링의 복잡성은 제품의 종류 다양성, 공정단계의 복잡성, 공정의 재방문 빈도 및 주문의 변동성에 따라 결정된다. 예를 들어, 웨이퍼 공정(Wafer fabrication)의 생산은 단일 웨이퍼가 생산프로세스를 거치면서 복수 층의 웨이퍼로 변하는데, 각 층의 작업이 진행될 때 같은 설비를 이용하지만 웨이퍼의 각각 층마다 에칭(Etching), 증착(Deposition), 포토리소그래피(photolithograph)와 같은 특수한 작업들이 요구된다.

이러한 재투입 공정의 스케줄링 복잡성은 연구자뿐만 아니라 현장관리자들에게도 도전적 과제였다. 많은 연구들이 재투입 공정의 스케줄링을 해결하기 위하여 많은 노력을 기울어 왔으며, 본 연구에서는 수리적 방법, 휴리스틱 기법 그리고 메타 휴리스틱 기법을 기반으로 재투입 공정의 스케줄링에 관련된 기존 연구들에 대해서 분석하였다.

2.1 수리적 기법을 활용한 재투입 공정 분석 연구

수리적 기법은 많은 작업들과 설비들이 있는 환경에서 복잡한 재투입 공정 스케줄링 문제를 해결하는데 유용하다고 알려져 왔다. 본 논문에서는 Mean value analysis (MVA), Petri net 그리고 branch and bound의 수리적 모델을 이용하여 재투입 공정의 스케줄링문제를 해결한 연구들을 살펴보겠다.

MVA는 도착이론(arrival theorem, Reiser 1980)과 리틀의 법칙(Little's Law, Little 1961)의 대기이론을 기반으로 안정된 상태에서의 시스템을 분석하기 위한 기법이다. Narahari, Y., and L. M. Khan.(1996)은 재투입공정에서 MVA기법을 처음으로 사용한 바 있다. 그들은 FBFS (First Buffer First Serve), LBFS(Last Buffer First Serve) 및 FCFS(First Come First Serve)와 같은 우선순위 규칙을 버퍼(buffer)에 적용하여 MVA를 이용하여 평균 사이클타임(mean cycle time)과 생산율(throughput rate)을 계산하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 재투입 공정의 복잡성 때문에 이전의 많은 연구들은 시뮬레이션 기법을 기반으로 두어 스케줄링 문제를 다루었지만, 그들의 연구를 통해 MVA가 스케줄링 알고리즘의 시간 효율성 측면에서 굉장히 효율적이면서 시뮬레이션 결과와 매우 유사한 방법임을 입증된 바 있다.

한편, Park et al.(2002)은 Narahari, Y., and L. M. Khan(1996)의 연구를 단일 제품과 설비에서 다중 제품과 설비가 있는 복잡한 제조업체 환경에서 MVA를 이용

하여 시스템을 분석하였지만 다양한 우선순위규칙을 적용하지 못했다는 한계점이 존재했다.

Petri Net(이하 페트리 넷)은 1960년대 Carl A. Petri에 의해 처음 개발된 이산 사건 시스템을 모델링하는 방법이다. 페트리 넷은 병행적(Concurrent), 분산적(Distributed or Decentralized), 비동기적(Asynchronous)으로 사상(event)이 발생하는 시스템을 표현하기 위한 수학적 모델이다. 페트리 넷의 여러 장점 중 하나가 모델을 통하여 시스템의 성질을 분석할 수 있다는 점이다. 페트리 넷은 많은 성질을 가지고 있는데, 그 중에서도 대표적인 몇 가지를 정의하면 Reachability, Boundedness, Liveness, Reversibility, 그리고 Conservativeness 등이다. 이러한 성질은 재투입 있는 생산 공정을 수학적으로 표현하거나 모델링하는 데 매우 유용하다.

Odrey et al.(2001)는 세 개의 작업공정(work centers)과 여섯 대의 설비가 존재하는 재투입 공정에 대한 페트리 넷을 모델화하였다. 이 연구에서는 두 가지의 대기이론모형 ‘last-buffer-first-served’ 또는 ‘bottleneck workload-regulating’과 두 가지의 작업투입전략 ‘closed-loop’와 ‘open-loop’들의 조합을 페트리 넷으로 모델화하였다.

Zhang et al.(2007)의 연구에서는 멀티 에이전트(Multi-agent)기반의 스케줄링연구 하에서 재투입공정의 모델링 기술을 발전시켰다. 이 연구에서 재투입공정을 모델링하기 위해 ‘material flow net model’과 ‘interactive protocol model’로 구성된 ‘agent-based colored timed Petri net (ACTPN)’를 만들었고, 이를 상하이의 반도체 제조공정에 적용시켰다.

마지막으로 분기한계법(Branch and bound)은 Land et al.(1960)에서 처음 소개하였다. 분기한계법은 최적해의 후보가 되는 모든 영역 또는 경로를 효율적으로 검색하는 방법이며 주로 이산 최적화나 조합 최적화 문제를 풀 때 사용되었다. 이 방법은 모든 후보 해를 체계적으로 나열하는 분기과정(branching)을 수행하면서 최적화할 수치의 상한 값(upper bound)과 하한 값(lower bound)을 추정 후, 유망함이 없다고 판정된 해를 검색하여 제거해(pruning) 나간다. 제거하는 해에서 파생되는 해는 살펴보지 않기 때문에 불필요한 시간 소모를 줄이게 된다. 재투입 공정의 스케줄링을 해결하기 위하여 분기한계법을 적용한 사례를 살펴보면, Choi and Kim(2009)는 두 개의 설비가 존재하는 재투입 공정 환경에서의 스케줄링 문제에 대해서 분기한계법을 적용하였다. 그들의 연구에서 고려한 재투입 공정은 모든 작업들이 각각의 설비들을 두 번씩 방문한다. 즉, 설비 1을 방문한 작업은 설비

2를 방문하고 다시 설비 1과 설비 2를 재방문하게 된다. 이 문제는 Koulamas(1994)에 의해 이미 NP-hard문제로 알려져 왔으며, 분기한계법을 이용하여 작업의 납기 지연(tardiness)을 최소화하는 스케줄링 문제를 다루었다.

재투입이 있는 생산 공정을 대상으로 수학적 기법을 활용한 연구는 많지 않다. 그 이유는 무엇보다 재투입의 특성을 모델 상에서 반영하는 데 어려움이 있으며, 수학적 기법의 한계로 하나의 모형으로 복잡성을 모두 반영하는 것이 어렵기 때문으로 판단된다.

2.2 휴리스틱 규칙을 활용한 재투입공정 분석 연구

휴리스틱 기법은 최적 값을 찾을 수 있는 결정적인 방법이 없을 때, 받아들일 수 있을 만큼의 적정시간동안 근사 최적 값을 찾는 방법이다. 재투입 공정 스케줄링문제에서 가장 많이 사용된 휴리스틱 기법은 우선순위 규칙이다. 우선순위 규칙은 공정의 대기행렬에 대기하고 있는 작업들 중에서 어떤 작업을 우선적으로 처리할지 선택하는 방법을 일컫는다. 일반적으로 많이 알려진 우선순위 규칙들은 다음과 같다.

- First-Come-First-Served (FCFS)/First-In-First-Out (FIFO) : 가장 먼저 도착한 작업을 선택
- Earliest-Due-Date (EDD) : 납기일이 가장 이른 작업을 선택
- Shortest Processing Time (SPT)/Weight Shortest Processing time (WSPT) : 작업시간이 가장 짧은 작업 선택
- Truncated Shortest Processing Time (TSPT) : 사전에 정의한 truncation 시간이 가장 짧은 작업 선택
- Longest Processing Time (LPT)/Weighted Longest Processing Time (WLPT) : 작업시간이 가장 긴 작업 선택
- Critical Ratio (CR) : 긴급률이 가장 높은 작업 선택 (긴급률 = 남은 작업시간 / 납기일까지 남은 시간)
- Least Slack (LS) : 납기일로부터 잔여작업시간을 뺀 여유(SLACK)가 가장 작은 작업을 선택
- Least Setup Cost (LSC) : 생산준비시간이 가장 짧은 작업 시간

하지만 재투입공정에서는 전체 대기행렬에서 새롭게 투입된 작업과 재투입된 작업들이 혼재하며, 설비의 고장과 같은 공정의 불확실성과 주문의 불안정성 때문에 위에서 언급한 전통적인 우선순위규칙들이 효과가 있다고

보장할 수 없다. 따라서 많은 연구들이 재투입 공정의 스케줄링 문제를 해결하기 위하여 전통적인 우선순위 규칙들을 개선하거나 조합하는 연구를 많이 진행하였다.

Chen et al.(2004)는 재투입 공정의 특성을 갖는 웨이퍼 공정에 ‘A dynamic state-dependent dispatching(DSDD)’ 휴리스틱 기법을 적용했다. DSDD 휴리스틱 기법은 공정의 상태변화에 따라서 다른 우선순위규칙들을 다양하게 적용하는 방법이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 먼저 공정을 병목공정 후보공정(Dynamic bottleneck workstations)들과 비 병목공정(Non-dynamic bottleneck workstations)들로 구분한다. 그리고 병목공정 후보 공정들의 대기행렬 상태가 ‘CONWIP’ 전략과 ‘FIFO’ 전략을 이용한 시뮬레이션의 결과인 레퍼런스 대기행렬 상태보다 좋지 않을 때 우선순위 규칙들을 적용시킨다. DSDD와 6가지 전통적인 우선순위규칙을 단일적으로 적용하여 비교 실험결과 DSDD 휴리스틱 기법이 리드타임을 줄이는 것을 알 수 있었다. Zhang et al.(2009)은 시뮬레이션과 반응표면 방법을 이용하여 병목공정의 대기행렬에 대기하고 있는 작업 종류, 대기행렬 길이 등의 변화에 따라 적절한 우선순위규칙을 적용하는 ‘dynamic bottleneck dispatching policy(DBDP)’를 제안하였다. 연구에서 소개된 휴리스틱 규칙의 효과를 증명하기 위하여 Critical ratio(CR), First in First out(FIFO), Early Due Date(EDD), Shortest Process Time(SPT)등과 같은 전통적인 우선순위 규칙들과 비교하는 실험을 진행하였다.

작업 우선순위 규칙을 활용한 연구는 많은 선행연구에서 다루고 있지만, 재투입 공정의 경우, 하나의 작업이 여러 번 공정을 거치기 때문에 이를 적용하는데 많은 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.

2.3 메타휴리스틱을 활용한 재투입 공정 분석 연구

메타휴리스틱은 일반적인 알고리즘이나 휴리스틱 기법으로 해결하기 힘든 문제를 다룰 때 사용되며, 최적의 해에 근사한 값을 찾기 위해 동식물의 행동이나 인간의 행동을 모방하여 만들어진 일종의 휴리스틱 기법이라고 할 수 있다. 메타휴리스틱은 지정한 반복횟수에 도달하거나 더 좋은 해로 향상될 수 없다고 판단 될 때까지 초기 해를 시작으로 무작위방법이나 연구자가 지정한 기준에 의해 계속해서 더 좋은 해를 탐색해간다. 일반적으로 재투입 공정에서 많이 사용된 메타휴리스틱 기법으로는 유전자알고리즘(Genetic algorithm), 타부써치(Tabu Search) 그리고 시뮬레이티드어닐링(Simulated Annealing)등이 있다.

유전자알고리즘을 활용한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Hwang and Sun(1998)은 재투입 공정 환경에서 첫 번째 설비에서의 셋업시간이 바로 다음 작업이 아닌 두 단계 후의 작업에 영향을 받는 특수한 문제를 해결하기 위해서 유전자 알고리즘을 이용하였다. 유전자 알고리즘은 총 완료시간(Makespan)을 최소화하는 목적으로 초기 해를 무작위로 생성하고, 새로운 해를 생성하기 위하여 교차(crossover)와 돌연변이(mutation)를 생성하도록 설계되었다. 기존의 휴리스틱 기법과 유전자 알고리즘을 비교한 결과 예러 크기나 계산시간 측면에서 유전자 알고리즘이 더 좋은 결과를 보였다.

Liu, Cheng-Hsiang.(2010)연구에서는 세 가지 설비가 존재하고 재투입이 존재하는 반도체 흐름공정에서 유전자 알고리즘을 이용하여 ‘Multiple Orders in Jobs (MOJ)’ 스케줄링 문제를 해결하였다. 이 연구에서 세 가지 설비는 아이템을 처리하는 설비(Item processing machine), 작업(Job)을 처리하는 설비(Job processing machine) 그리고 배치로 처리하는 설비(batch processing machine)로 구성되어 있다. 아이템을 처리하는 설비의 작업시간은 작업으로 묶인 아이터들의 개수에 따라 달라지고, 작업을 처리하는 설비는 작업단위로 처리되고 배치로 처리되는 설비는 작업들이 배치로 묶여 처리되기 때문에 처리시간은 아이터들의 개수와 독립적이다. 이와 같은 설비로 구성된 흐름공정에서 MOJ 스케줄링 문제는 여러 고객들의 주문 아이터들을 어떤 Job에 할당시킬 것이며, Job들을 어떻게 배치로 묶을 것인지를 결정하는 것이다. 이 문제는 납기지연을 최소화하는 혼합정수계획 법으로 묘사되었고, 유전자 알고리즘을 이용하여 해를 찾았다. 유전자 알고리즘과 27개의 휴리스틱 기법을 비교 실험한 결과는 유전자 알고리즘이 합리적인 시간 안에 가장 근접한 최적 해를 찾는 것을 보여주었다.

타부서치의 경우 다른 휴리스틱 기법과 함께 적용할 수 있다는 점과 다른 휴리스틱 과정을 효과적으로 제어할 수 있다는 점에서 큰 장점을 지닌다. 따라서 지역탐색 기법(local search)과 함께 적용하는 사례가 많다. Chen et al.(2008)은 어떠한 상황에서도 작업의 순서가 바뀌지 않는 조건을 갖는(즉, 먼저 처리된 작업은 늦게 처리된 작업보다 무조건 앞서 처리됨) 재투입 공정이 존재하는 흐름공정에서 타부 서치와 지역탐색기법을 조합한 방법을 제안한 바 있다. Nawaz et al (1983)에서는 비교적 작은 크기의 재 투입공정(작업 5개, 3개 설비, 재작업 2회)을 대상으로 초기 해를 생성시키고, 해 이동을 통해 후보 목록을 만들어 열망수준을 검사하고, 더 좋은 해의 가능

성이 있는지를 평가하여 개선된 방향으로 해의 이동을 설계했다. 이 연구에서는 타부목록이 7개가 나타났으며 더 이상의 해 개선이 발생하지 않았다. 이 연구에서 제안한 하이브리드 타부서치는 정수계획 모델에서 얻어진 해와 순수한 타부서치에서 나온 해를 작은 사이즈, 중간 사이즈 그리고 큰 사이즈의 문제에서 각각 비교하였고, 모든 문제에서 더 좋은 해를 찾았다.

시물레이티드어닐링의 원리는 반복적개선법을 기본으로 하되 비용증가의 이동을 확률적으로 허용하는데 있다. 시물레이티드 어닐링의 기본 아이디어는 고체물리학에서 에너지 수준이 가장 낮은 상태인 결정을 얻기 위해서 이용하고 있는 어닐링과정을 그대로 조합 최적화문제에 모사하는 것이었다. Jain et al. (2003)은 웨이퍼 스케줄링 문제에 시물레이티드 어닐링기법을 적용하였다. 이 연구에서는 초기온도를 이론적으로 모든 이동을 받아들일 수 있도록 0.85~0.95사이의 범위에서 $\exp(-\Delta S/TEM)$ 을 이용하여 설정하였고, 쿨링 스케줄에서 쿨링 비율은 0.85~0.95에서 선택되도록 설계하였다.

수학적 기법에 비해, 비교적 유연하게 적용할 수 있다는 점에서 메타 휴리스틱을 활용하여 재투입공정의 생산성을 높이기 위한 시도들이 일부 진행되었지만, 메타 휴리스틱 방법은 설계의 어려움과 도출된 해의 우수성을 검증하는 데 어려움이 있기 때문에 현장에서 적용하는 데 어려움을 내포하고 있다. 또한, 수학적 기법과 마찬가지로, 대부분의 연구가 비교적 작은 사이즈 문제에서 메타 휴리스틱 방법의 적용 가능성을 타진하는 형태로 연구가 진행되어, 실제 복잡한 생산라인을 묘사하고, 이에 대한 효과를 검증하는 데는 여전히 한계점이 크다고 하겠다.

2.4 재투입 공정에서의 DBR 스케줄링 적용

반도체나 TFT-LCD 공정과 같이 재투입이 있는 공정에서 생산성을 개선하기 위한 다양한 시도들이 이루어져 왔다. 하지만, 대부분의 연구들은 비교적 작은 작업 수 및 설비 수와 제한된 재방문 횟수 하에서 성능을 평가하는데 그치고 있다. 이는 재투입 공정 특성으로부터 오는 복잡성, 큰 규모, 그리고 높은 불확실성 때문에 대부분 재투입공정에 직접적으로 적용하기는 힘들다는 것을 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 DBR 기반의 스케줄링 방법은 전체 시스템 중에서 제약설비를 기반으로 스케줄링 문제에 접근함으로써 큰 규모의 복잡한 스케줄링문제를 해결하는 데 적합하다.

아래 내용은 DBR 스케줄링을 효과적으로 적용하기

위해 요구되는 전제 사항을 소개하고 있다(Qiao, Fei, and Qidi Wu. 2013).

- 전체 시스템 안에 병목공정은 오직 한 개가 존재한다.
- 각 제품들은 생산라인을 순서대로 흘러간다.
- 각 설비들은 각 제품들을 한 번씩만 처리한다.

재투입공정은 각 설비들이 각 제품들을 한 번씩만 처리한다는 전제 조건을 위배하기 때문에, 효과적으로 DBR을 적용하는 데 어려움이 존재한다. 좀 더 자세히 설명하면, 하나의 작업이 완제품으로 생산되기까지 여러 차례의 걸쳐 병목공정을 거쳐야 하고, 병목공정에서는 동일한 작업들이 방문횟수별로 여러 차례에 걸쳐 대기하게 된다. 이러한 특성으로 인해 재투입공정에서 DBR 기반 스케줄링의 핵심 요소인 드럼, 버퍼 및 로프 개념을 정의하기가 어렵다.

따라서 전형적인 흐름공정을 대상으로 DBR 기반 스케줄링 연구는 이미 선행연구에서 많이 다루어졌지만, 복잡한 재투입 공정에서 DBR 기반 스케줄링에 대한 적용 방법 및 적용에 따른 효과를 분석한 연구는 매우 미미한 실정이다. Cao et al.(2011)의 연구는 시스템 병목공정을 기준으로 전체 시스템을 여러 개의 루프로 구분하였고, 각 루프에 DBR 스케줄링을 적용하는 방법을 제안하였다. 특히, 병목공정의 작업부족(starvation)현상을 사전에 예방하기 위해 비 병목공정의 예상되는 설비고장 등을 파악하여 투입시점을 결정하고, 각 병목공정에 우선순위 규칙을 적용함에 있어 루프의 균형을 맞춘 것이 제안한 방법의 핵심이다. 다만 해당 연구는 루프별 병목공정을 고려하지 않았으며, 시스템 병목공정을 1개로 고정하였다는 점, 그리고 투입시점 결정 시 각 루프별 부하수준을 함께 고려하지 않았다는 점이 아쉽다.

3. 연구모형

3.1 DBR 적용을 위한 재투입공정 재구성

본 연구에서는 재투입공정에 DBR스케줄링을 적용하는 방법을 제안하고자 한다. 앞서 언급했듯이, 재투입공정의 복잡성 때문에 일반적인 DBR 스케줄링을 그대로 적용하기 힘들다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Figure 2와 같이 재투입공정의 구성요소를 시스템 병목공정, 서브시스템 병목공정, 루프 병목공정, 루프 내 공정으로 구분하였다. 재투입 공정 절차는 시스템 병목공정과 서브시스템 병목공정을 기준으로 분할하여 개별 흐름을

갖는 루프(Loop)들의 묶음으로 재구성하였다.

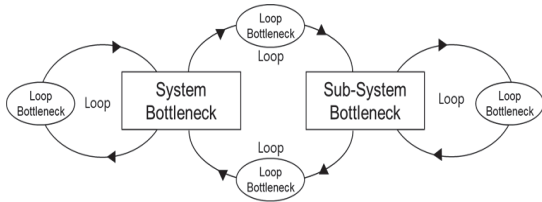


Fig. 2. Process re-design of re-entrant manufacturing

시스템 병목공정은 가장 부하가 큰 공정으로, 재투입이 빈번하게 발생한다고 볼 수 있으며, 전체 생산성을 높이기 위해서는 효율적으로 관리하는 것이 중요하다. 일반적으로, DBR에서는 시스템 병목공정을 탐색하고, 물리적, 시간적 버퍼를 사용하며, Rope를 통해 원자재의 투입 속도를 조절하여 시스템 병목공정을 효율적으로 관리한다. 하지만, 재투입공정은 시스템 병목공정을 기준으로 공정을 분할하게 될 경우, 시스템 병목공정에서 처리된 자재는 루프를 지나 다시 시스템 병목공정으로 재투입되는 흐름이 만들어진다. 즉, 시스템 병목공정은 루프들의 작업흐름을 결정할 뿐만 아니라, 시스템 병목공정으로 되돌아오는 작업흐름도 결정하게 되기 때문에 시스템 병목공정에서 어떤 작업 투입 규칙을 활용할 것인지가 매우 중요하다.

또한, 서브시스템 병목공정은 시스템 병목공정을 제외한 공정 중 부하가 가장 큰 공정으로 시스템 병목공정에 작업이 투입되는 속도를 조절할 수 있는 역할을 수행한다. 이는 일반적인 DBR의 버퍼 역할과 유사하다고 볼 수 있다.

시스템 병목공정 또는 서브시스템 병목공정은 작업을 투입하는 위치에 존재하도록 구성하여, Figure 3과 같이 개별적인 흐름공정으로 분할하였으며, 이를 본 연구에서는

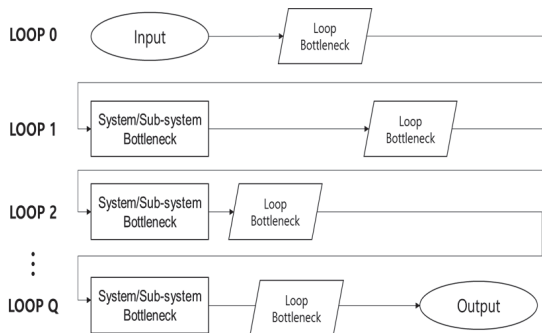


Fig. 3. Definition of Loop

루프(Loop)라 정의하였다. 루프의 구조를 살펴보면, 루프 내 가장 부하가 큰 공정을 루프 병목공정으로 정의하였고, 이는 루프로 분할한 재투입 공정에 DBR을 적용하기 위해서 각 루프 내 새로운 제약설비를 선정할 필요가 있기 때문이다. 따라서 하나의 루프를 독립적인 흐름공정으로 고려한다면, 시스템 병목공정과 서브시스템 병목공정은 Rope로 묶이는 공정이라고 볼 수 있다.

본 연구는 각 루프의 병목공정 생산속도 및 시스템 병목공정과 서브시스템 병목공정의 대기열 내 작업들이 어떤 루프에서 도착한 것인지를 고려하여 작업투입 우선순위를 결정하고자 한다. 시스템 병목공정과 서브시스템 병목공정에서 각 루프의 루프 병목공정의 작업부하를 고려하여 작업우선순위 투입규칙을 설계하였으며, 통해 루프 간 부하의 균형을 맞추으로써 전체 시스템의 생산성을 높이고자 한다.

3.1.1 시스템 병목공정 및 서브시스템 병목공정 정의

시스템 병목공정(L_B)은 전체 시스템에서 부하가 가장 큰 공정을 의미한다. 부하가 가장 큰 공정을 선정하기 위해 본 연구에서는 식 (1)과 식 (2)를 활용하였다.

$$L_h = \frac{1}{u_h} \times q \times \sum_{i=1}^y \theta_{ih} \cdot t_{ih}, \quad h = 1, 2, \dots, H \dots (1)$$

- L_h = 공정h의 총 작업부하
- i = 재투입 공정 절차순서
- q = 생산에 투입된 총 원자재 수량
- y = 재투입공정의 총 생산단계수
- θ_{ih} = 만약 i 번째 생산단계에서 설비 h 가 작업을 수행하면 1, 그렇지 않으면 0
- t_{ih} = i 번째 생산단계에서 설비 h 의 작업시간
- u_h = 공정h의 총 용량 (배치사이즈*설비용량)

시스템 병목공정은 다음과 같이 재투입 공정에서 가장 부하가 큰 공정으로 정의한다. 시스템 병목공정은 전체 시스템에서 하나의 공정으로만 정의한다.

$$L_B = \max\{L_1, L_2, \dots, L_H\} \dots (2)$$

서브시스템 병목공정(L)은 식 (3)과 같이 시스템 병목공정을 제외한 나머지 공정들 중에서 가장 부하가 큰 공정으로 정의한다.

$$L \dots (3)$$

3.1.2 루프 병목공정 정의

루프 병목공정(L_k^l)은 개별 루프 내 공정 중 부하가 가장 큰 제약설비로 정의하였으며, 전체 공정을 분할한 루프의 개수와 루프 병목공정의 개수는 동일하다. 루프 병목공정을 선정하는 방법은 식 (4)와 식 (5)를 활용하였다.

$$L_r^l = \frac{1}{u_r} \times q \times \sum_{i=S_l+1}^{S_{l+1}-1} [\theta_{ir} \cdot t_{ir}], \dots\dots\dots (4)$$

$$r = S_l + 1, \dots, S_{l+1} - 1,$$

$$l = \text{루프 번호}, 0, 1, 2, \dots, Q,$$

$$L_r^l = l\text{번째 루프에서 공정 } r \text{의 총 부하정도},$$

$$S_l = l\text{번째 방문하는 시스템 병목공정 단계수},$$

$$Q = \text{루프의 총 개수},$$

$$L_k^l = \max \{L_{S_{l+1}}^l, \dots, L_r^l, \dots, L_{S_{l+1}-1}^l\} \dots\dots\dots (5)$$

3.2 DBR기반 루프 스케줄링

3.2.1 루프 우선순위 결정 알고리즘 및 수치 예제

Figure 4는 재투입공정을 루프단위로 구분하고, 각 루프 별로 루프 병목공정을 고려한 ‘DBR기반 루프 스케줄링’의 구조를 보여주고 있다. 그림을 간략히 표현하기 위

해 서비스시스템 병목공정은 제외하였다. 이러한 구조에서 ‘DBR기반 루프 스케줄링’을 적용하게 되면, 가운데 위치한 시스템 병목공정 혹은 서비스시스템 병목공정에서 루프 병목공정을 기준으로 어떤 루프의 작업을 우선적으로 투입할 것인지를 결정하게 된다. DBR 스케줄링의 기본 원리를 적용하면, 시스템 병목공정에서는 루프 병목공정의 속도에 맞춰 작업들을 투입시켜야 한다.

따라서 각 루프의 루프 병목공정의 부하정도를 고려하여 작업의 우선순위를 결정하였다. 그러나 루프 병목공정의 부하정도만 고려하여 우선순위를 결정하게 되면 특정 루프의 작업만 선택되기 때문에 각 루프의 마지막 작업처리시간을 고려하였다. 즉, 현재 스케줄링 시점에서 루프 병목공정의 부하정도와 마지막 작업처리시점을 비교하여 두 시간 차이가 큰 작업을 선택되도록 함으로써 모든 루프의 작업이 루프 병목공정의 부하정도에 맞춰 균형 있게 처리될 수 있도록 한다. 알고리즘의 세부 내용은 다음과 같다.

T_s = 현재시간

T_n = 시스템 병목공정에서 새로운 작업을 투입시켜야 하는 시간

T_k = 루프 k 에 대하여 시스템 병목공정에서 마지막으로 선택된 시간

k = 루프 번호

L_k = 루프 k 에서 루프 병목공정의 부하정도

P_u = wip 레벨의 기준 (reference)

P = 우선순위 값

- Step 1. 시스템 병목공정에서 새로운 작업을 선택해야 하는 시간을 현재시간으로 설정한다. ($T_s = T_n$)
- Step 2. 각 루프에서 루프 병목공정을 찾고, 루프 병목공정의 부하정도(L_k)를 계산한다.
- Step 3. 각 루프의 우선순위(P)를 계산한다. ($P = P_u - L_k$, where $P_u = T_s - T_k$)
- Step 4. 우선순위가 가장 큰 루프를 찾고, 시스템 병목공정에서 해당 루프의 작업을 투입한다.
- Step 5. Step 1로 다시 돌아간다.

Figure 4에서 보는 것과 같이 시스템 병목공정에는 각 루프 별 작업들이 대기하고 있다. 현재시간($T_s = T_n$)은 2:05분이며, 시스템 병목공정에서는 어떤 루프의 작업을 선택할지 결정해야 하는 상황이다. 표에는 현재시점(2:05분)의 각 루프 별 마지막 처리시간(T_k)과 루프 병목공정의 부하정도(L_k)가 각각 정리되어 있다. 이 값들을 이용하여 각 루프 별 우선순위(P)값을 구한 결과, 가장 높은

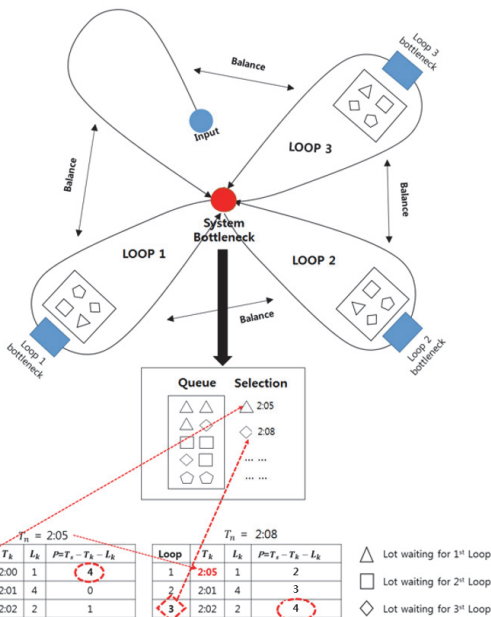


Fig. 4. A working example of DBR based Loop Scheduling

우선순위를 갖는 루프 1의 작업을 선택한다. 그리고 루프 1의 마지막 처리시간(T_k) 정보를 갱신한다. 시스템 병목 공정에서 다음 의사결정 시점이 2:08분($T_n=2:08$)이라고 가정하면, 이때 가장 높은 우선순위를 갖는 루프 3의 작업을 투입시킨다. 이처럼 ‘DBR기반 루프 스케줄링’에는 각 루프 별 루프 병목공정의 부하정도와 마지막 작업 투입시점 정보를 이용하여 각 루프의 균형을 맞추는 우선 순위규칙 적용되고 있다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 모델 검증

본 연구에서는 Wein(1988)이 처음 소개한 HP사의 반도체 웨이퍼 테스트 공정인 TRC(Technology Research Center) 공정을 예시로 실험을 진행하였다. 실험에 앞서 본 연구에서 개발한 시뮬레이션이 실험에 적합한지를 판단하기 위하여, Wein(1988)의 실험과 동일한 환경에서 평균 사이클타임(Mean cycle time)과 평균 사이클타임의 표준편차(Standard deviation of mean cycle time)를 측정하는 실험을 진행하였다. 각 공정별 파라미터 값은 Table 1과 같으며, NM은 기계의 수를 의미하고, MRT는

Table 1. Parameter values of each station

Station NO	Station Name	Type of Operation	NM (EA)	MPT (hour)	MTBF (hour)	MTTR (hour)
1	CLEAN	Deposition	2	1.55	42.18	2.22
2	TMGOX	Deposition	2	4.98	101.11	10.00
3	TMNOX	Deposition	2	5.45	113.25	5.21
4	TMFOX	Deposition	1	4.68	103.74	12.56
5	TU11	Deposition	1	6.14	100.55	6.99
6	TU43	Deposition	1	7.76	113.25	5.21
7	TU72	Deposition	1	6.23	16.78	4.38
8	TU73	Deposition	1	4.35	13.22	3.43
9	TU74	Deposition	1	4.71	10.59	3.74
10	PLMSL	Deposition	1	4.05	47.53	12.71
11	PLMSU	Deposition	1	7.86	52.67	19.78
12	SPUT	Deposition	1	6.10	72.57	9.43
13	PHPPS	Lithography	4	4.23	22.37	1.15
14	PHGCA	Lithography	3	7.82	21.76	4.81
15	PHHB	Lithography	1	0.87	387.20	12.80
16	PHBI	Lithography	2	2.96	No Failure	
17	PHFI	Lithography	1	1.56	119.20	1.57
18	PHJPS	Lithography	1	3.59	No Failure	
19	PLM6	Etching	2	13.88	46.38	17.42
20	PLM7	Etching	1	5.41	36.58	9.49
21	PLM8	Etching	2	7.58	36.58	9.49
22	PHWET	Etching	2	1.04	118.92	1.08
23	PHPLO	Resist Strip	2	1.09	No Failure	
24	IMP	Ion Implant	1	3.86	55.18	12.86

평균 프로세스 타임을 말하며, MTBF는 고장간의 평균 시간을 나타낸다. 그리고 MTTR은 수리를 위한 평균 시간이다. 작업 투입규칙은 평균 0.0623 job/hr인 포아송 분포를 적용하였으며, 병목공정에서는 FIFO규칙을 적용하였다. 그 결과, Table 2와 Table 3을 보면 본 연구에서 개발한 모델과 Wein(1988)의 결과 값이 큰 차이가 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서 만든 시뮬레이션을 기반으로 다음 실험을 진행하였다.

이어지는 실험에서는 본 연구에서 제안하는 스케줄링 기법의 루프 간 균형(Balance) 효과를 잘 나타내기 위하여 각 루프에 초기 재공품재고를 가정하였다. 각 루프의 초기 재공품재고는 UNIF(20, 200)으로 무작위 발생토록 하였다.

Table 2. Mean cycle time result of Wein & proposed method

Input rule	Mean cycle time		t-value
	Wein (1988)	Proposed method	99% Confidence Interval
POISS Dist.	1439	1574	1574±177.0588

Table 3. Standard deviation of cycle time result of Wein & proposed method

Input rule	Standard deviation of mean cycle time		t-value
	Wein (1988)	Proposed method	99% Confidence Interval
POISS Dist.	397	498	498±103.185

4.2 DBR기반 루프 스케줄링 실험결과

4.2.1 시스템 병목공정 및 서브시스템 병목공정 선정결과

TRC공정을 루프 단위로 구성하기 위하여 우리는 먼저 식(1)을 이용하여 시스템 병목공정을 탐색하였다. 모든 공정의 부하정도(L_k)값은 Table 4와 같으며, L_k 값이 가장 큰 공정은 68,457값을 갖는 PHGCA공정으로 나타났다. 이 공정은 TRC공정에서 총 11번 반복 작업이 진행되며, 작업시간은 7.86시간으로 다른 공정들보다 반복횟수가 많고, 작업시간이 긴 특징을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 PHGCA공정을 시스템 병목공정으로 고려하였다. 또한, 시스템 병목공정 외 공정 중 가장 부하가 큰 24번 공정(IMP)을 서브시스템 병목공정으로 정의하였다.

Table 4. The result of L_k

Station NO.	Station Name	L_k
1	CLEAN	5516
2	TMGOX	6176
3	TMNOX	7095
4	TMFOX	3448
5	TU11	6789
6	TU43	10850
7	TU72	5706
8	TU73	10732
9	TU74	7172
10	PLMSL	13860
11	PLMSU	4865
12	SPUT	9204
13	PHPPS	20877
14	PHGCA	68457
15	PHHB	7007
16	PHBI	11464
17	PHFI	8538
18	PHJPS	9873
19	PLM6	19318
20	PLM7	8850
21	PLM8	17906
22	PHWET	18315
23	PHPLO	18223
24	IMP	44700

4.2.2 루프 병목공정 선정결과

본 연구에서 세분화한 결과 루프의 개수는 19개로 설정하였다. 루프 병목공정은 식(4)와 식(5)를 이용하여 Input은 13번 공정, 루프 1은 13번 공정, 루프 2는 20번 공정 등으로 선정되었다. Figure 5와 같이 시스템 병목공정과 서브시스템 병목공정, 각 루프의 루프병목공정을 구분하여 전체 루프를 도식화하였다. 이처럼 루프를 세분화하는 목적은 DBR을 각 루프에 적용할 때 루프병목공정이 드럼의 역할을 충분히 수행함으로써 루프 간 균형을 맞추는 것이다. 루프는 공정이 커지면 커질수록 더욱 세분화시킬 수 있지만 본 연구에서는 한 번만 세분화하였다.

4.2.3 DBR기반 루프 스케줄링 결과

본 연구에서 제시한 ‘DBR기반 루프 스케줄링’을 적용한 실험의 효과성을 검증하기 위해 동일한 조건에서 시스템 및 서브시스템 병목공정에 FIFO의 작업투입규칙을

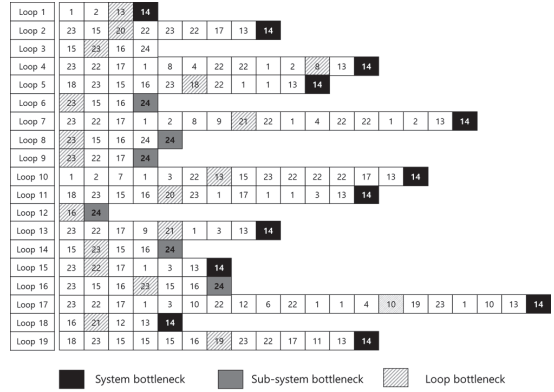


Fig. 5. The result of bottlenecks selections & loop

적용한 모델과 비교를 실시하였다. 결과값은 루프 별 평균 사이클 타임과 평균 재공품재고 수준을 측정하였다. 평균 사이클 타임은 전체 재투입 공정의 생산성 지표로 활용하였으며, 평균 재공품재고 수준은 루프 간 균형을 효과적으로 유지하는지를 확인하기 위한 지표로 선정하였다. 특히 본 연구의 방법이 휴리스틱적 접근을 기반으로 하기 때문에 최적해와 본 연구의 결과값이 얼마나 근접한지를 비교평가할 필요성이 있다고 판단하였다. 따라서 루프 내에 대기하고 있는 재공품재고가 없다고 가정하고, 루프 내 공정들의 처리시간 합을 산출하였으며, 이를 최적해(이론적인 사이클타임)로 판단하였다.

루프 별 평균 사이클타임 결과값은 Table 5와 같으며, 괄호 안의 수치는 최적해 대비 몇 배의 차이가 발생하는지에 대한 값이다. 전체 평균 사이클타임을 보면, 최적해는 재공품재고나 대기시간이 포함되지 않았기 때문에 523초로 나타났다. 하지만, FIFO 방법은 2,459초, 제안한 방법은 963초 정도로 나타났으며 FIFO 방법에 비해 1/3 수준으로 감소한 결과가 나타났다. 또한, 최적해와 비교하여도 FIFO 방법은 약 4.7배이지만, 제안한 방법은 약 1.8배 정도 수준의 결과를 보였다. 본 연구의 실험은 루프 별로 초기 재공품재고를 UNIF(20,200)으로 무작위 발생시킨 것을 감안한다면 우수한 결과로 판단된다.

루프 별 평균 재공품재고 수준의 결과값은 Table 6과 같다. FIFO 방법에 비해 평균적으로 3배 이상 감소한 결과를 보였으며 그 편차가 현저히 감소하였음을 볼 수 있다. 이는 본 연구의 방법이 루프 간 균형을 유지하는데 효과적인 것으로 판단된다.

Table 5. Average cycle time of each loop of DBR based Loop Scheduling

Loop No.	Theoretical cycle time (Optimal)	Proposed method	FIFO
Input	286	601 (2.1)	1733 (6.1)
Loop 1	351	562 (1.6)	1668 (4.7)
Loop 2	545	927 (1.7)	2847 (5.2)
Loop 3	356	640 (1.8)	1683 (4.7)
Loop 4	617	987 (1.6)	2831 (4.6)
Loop 5	680	1497 (2.2)	4619 (6.8)
Loop 6	351	736 (2.1)	1801 (5.1)
Loop 7	369	812 (2.2)	2815 (7.6)
Loop 8	459	826 (1.8)	2737 (6.0)
Loop 9	936	1405 (1.5)	2990 (3.2)
Loop 10	315	631 (2.0)	1717 (5.4)
Loop 11	336	808 (2.4)	1819 (5.4)
Loop 12	533	852 (1.6)	1347 (2.5)
Loop 13	735	1249 (1.7)	2665 (3.6)
Loop 14	698	1325 (1.9)	3149 (4.5)
Loop 15	394	828 (2.1)	1953 (5.0)
Loop 16	608	1094 (1.8)	2809 (4.6)
Loop 17	614	1227 (2.0)	2680 (4.4)
Loop 18	882	1412 (1.6)	3647 (4.1)
Loop 19	401	842 (2.1)	1669 (4.2)
Average	523	963 (1.8)	2459 (4.7)
Standard Deviation	188	295 (1.6)	821 (4.4)

Table 6. Average WIP of each loop of DBR based Loop Scheduling

Loop No.	Proposed method	FIFO
Input	21.89	57.84
Loop 1	27.67	51.58
Loop 2	21.47	84.63
Loop 3	17.96	52.22
Loop 4	21.77	88.26
Loop 5	22.77	143.25
Loop 6	18.67	56.22
Loop 7	19.62	80.95
Loop 8	18.71	72.86
Loop 9	21.89	77.95
Loop 10	16.83	45.37
Loop 11	17.24	43.52
Loop 12	19.11	51.62
Loop 13	17.86	75.91
Loop 14	20.04	64.66
Loop 15	21.54	58.32
Loop 16	18.26	69.08
Loop 17	17.76	120.51
Loop 18	19.2	38.66
Loop 19	20.17	131.87
Average	20.0	73.3
Standard Deviation	2.52	29.10

5. 결론

본 연구는 DBR 스케줄링을 재투입공정에 적용하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 재투입 공정을 단일 병목공정을 갖는 독립적인 루프로 구분하였고, 각 루프에 DBR 개념을 적용하기 위해 루프병목공정을 새롭게 정의하였다. 병목공정에 대기하고 있는 루프 별 작업들의 우선순위는 각 루프 병목공정의 부하정도와 각 루프의 마지막 처리시간을 이용하여 결정하였다. 그러나 이러한 우선순위규칙은 각 루프 안에 반복되는 작업이 많고, 다른 루프에서 동시에 사용되는 설비가 많을수록 효과가 떨어짐을 알 수 있었다.

추후 연구 방향으로서는 재투입 공정에서 루프의 구분 방법과 관련하여 루프의 기준인 공정을 어떤 기준으로 선택할지에 대한 방법에 대해 연구하고자 한다. 본 연구에서는 TRC공정 데이터를 기반으로 한 각 공정의 시스템 전체 부하를 산출해본 결과 14번(시스템 병목공정)과 24번(서비스시스템 병목공정)을 제외한 나머지 공정의 부하 수준이 낮고, 비슷하게 나타남으로 세분화된 서비스시스템 병목공정을 구성하는 데 한계가 있었다. 하지만 루프 내 병목공정을 기준으로 서비스시스템 병목공정을 더 세분화한다면 루프 간 밸런스를 맞추는데 효과적일 것이라고 생각된다.

또한, 본 연구는 DBR을 재투입 공정에 적용하기 위한 방법론을 제시하는 연구였기 때문에 다른 스케줄링 방법과 비교 분석은 하지 않았다. 따라서 TRC공정에 적용된 다른 벤치마킹 규칙과 비교하여 본 연구가 제안한 스케줄링의 효율성을 입증할 필요성이 있다.

References

Cao, Z., Peng, Y., & Wang, Y. (2011, August). A drum-buffer-rope based scheduling method for semiconductor manufacturing system. In 2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (pp.120-125). IEEE.

Chen, J. C., Chen, C. W., Tai, C. Y., & Tyan, J. C. (2004). Dynamic state-dependent dispatching for wafer fabrication. *International Journal of Production Research*, 42(21), 4547-4562.

Chen, J. S., Pan, J. C. H., & Wu, C. K. (2008). Hybrid tabu search for re-entrant permutation flow-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*,

- 34(3), 1924-1930.
- Choi, S. W., & Kim, Y. D. (2009). Minimizing total tardiness on a two-machine re-entrant flowshop. *European Journal of Operational Research*, 199(2), 375-384.
- Danping, L., & Lee, C. K. (2011). A review of the research methodology for the re-entrant scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2221-2242.
- wang, H., & Sun, J. U. (1998). Production sequencing problem with re-entrant work flows and sequence dependent setup times. *International Journal of Production Research*, 36(9), 2435-2450.
- Hwang, Y. J., Huang, C. L., & Li, R. K. (2011). Using simplified drum-buffer-rope to rapidly improve operational performance: A case study in China. *Production and Inventory Management Journal*, 47(1), 80.
- Jain, V., Swarnkar, R., & Tiwari, M. K. (2003). Modelling and analysis of wafer fabrication scheduling via generalized stochastic Petri net and simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 41(15), 3501-3527.
- Land, A. H., & Doig, A. G. (1998). An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems, *Econometrica*.
- Little, J. D. (1961). A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$. *Operations research*, 9(3), 383-387.
- Liu, C. H. (2010). A genetic algorithm based approach for scheduling of jobs containing multiple orders in a three-machine flowshop. *International Journal of Production Research*, 48(15), 4379-4396.
- Narahari, Y., & Khan, L. M. (1996). Performance analysis of scheduling policies in re-entrant manufacturing systems. *Computers & operations research*, 23(1), 37-51.
- Nawaz, M., Ensore Jr, E. E., & Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, 11(1), 91-95.
- Odrey, N. G., Green, J. D., & Appello, A. (2001). A generalized Petri net modeling approach for the control of re-entrant flow semiconductor wafer fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17(1-2), 5-11.
- Park, Y., Kim, S., & Jun, C. H. (2002). Mean value analysis of re-entrant line with batch machines and multi-class jobs. *Computers & Operations Research*, 29(8), 1009-1024.
- Qiao, F., & Wu, Q. (2013). Layered Drum-Buffer-Rope-Based scheduling of reentrant manufacturing systems. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 26(2), 178-187.
- Zhang, J., Zhai, W., & Yan, J. (2007). Multiagent-based modeling for re-entrant manufacturing system. *International journal of production research*, 45(13), 3017-3036.
- Zhang, H., Jiang, Z., & Guo, C. (2009). Simulation-based optimization of dispatching rules for semiconductor wafer fabrication system scheduling by the response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1-2), 110-121.



양 현 준 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0337-9242> / june6520@gmail.com)

2016 광운대학교 경영학과 학사
2018 광운대학교 경영학과 석사
2018~ 현재 광운대학교 경영학과 박사과정

관심분야 : Simulation, Operation Research, Workforce Scheduling



정 석 재 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7081-7567> / sjjeong@kw.ac.kr)

2002 해양대학교 물류시스템공학과 학사
2004 연세대학교 산업시스템공학과 석사
2009 연세대학교 산업시스템공학과 박사
2010~ 현재 광운대학교 경영학과 교수

관심분야 : Supply Chain Management, Simulation, Operation Research



윤 성 옥 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4495-2364> / giantguard@naver.com)

2013 광운대학교 경영학과 학사
2015 광운대학교 경영학과 석사
2019 광운대학교 경영학과 박사
2019~ 현재 현대경제연구원 연구위원

관심분야 : Simulation and Operation, Closed Loop Supply Chain, Marketing Strategy