

A Case Study on Lead Time Improvement Using a Simulation Approach

Wonju Ro · Jaehun Sim[†]

Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

시뮬레이션 방식을 이용한 리드 타임 개선 사례 연구

노원주 · 심재훈[†]

창원대학교 스마트제조융합협동과정

During the shift from gasoline vehicles to electric ones, auto parts manufacturing companies have realized the importance of improvement in the manufacturing process that does not require any layout changes nor extra investments, while maintaining their current production rate. Due to these reasons, for the auto part manufacturing company, I-company, this study has developed the simulation model of the PUSH system to conduct a process analysis in terms of production rate, WIP level, and logistics work's utilization rate. In addition, this study compares the PUSH system with other three manufacturing systems -KANBAN, DBR, and CONWIP- to compare the performance of these production systems, while satisfying the company's target production rate. With respect to lead-time, the simulation results show that the improvement of 77.90% for the KANBAN system, 40.39% for the CONWIP system, and 69.81% for the DBR system compared to the PUSH system. In addition, with respect to WIP level, the experimental results demonstrate that the improvement of 77.91% for the KANBAN system, 40.41% for the CONWIP system, and 69.82% for the DBR system compared to the PUSH system. Since the KANBAN system has the largest impacts on the reduction of the lead-time and WIP level compared to other production systems, this study recommends the KANBAN system as the proper manufacturing system of the target company. This study also shows that the proper size of moving units is four and the priority allocation of bottleneck process methods improves the target company's WIP and lead-time. Based on the results of this study, the adoption of the KANBAN system will significantly improve the production process of the target company in terms of lead-time and WIP level.

Keywords : Batch Size, CONWIP, DBR, KANBAN, Scheduling, Simulation

1. 서론

소품종 대량생산 체제에서 다품종 소량생산 체제로의 제조 패러다임의 전환시기에 있는 대부분의 중소기업들은 경쟁력 강화를 위하여 최소의 투자를 통한 최대의 이익을

달성할 수 있는 방법으로서 공정개선의 중요성을 인식하고 있다. 또한 국내 동종기업들 간의 수주 경쟁과 해외 기업들과의 가격경쟁력 심화라는 현 비즈니스 환경하에서 공정개선을 통한 제품 생산을 최대화, 재고수준 최소화, 운영비용 최소화는 기업의 수익성 향상과 경쟁 우위를 확보하기 위한 생산측면에서의 중요한 경쟁전략이다[1].

특히, 자동차부품 제조기업들은 자동차 원청업체들의 지속적인 단가인하요구, 고품질수준요구, 원자재인상 등의 압력에 의하여 인력난과 자금부족이라는 경영상의 어려움을

Received 9 March 2021; Finally Revised 13 April 2021;
Accepted 20 April 2021

[†] Corresponding Author : jaehunsim88@hotmail.com

겪고 있다[2]. 자동차부품 제조기업인 I사 역시 동종업체의 경쟁심화에 따른 주문량 감소로 인한 수익 부족으로 필요 인력확보와 기술투자에 실패하여 자체 경쟁력 강화를 위한 방법을 모색하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 별도의 자금투자 없이 현 생산시스템을 이용하여 생산성 향상과 원가절감이 가능한 공정개선을 추진하고 있다.

일반적으로 제조생산시스템은 Push 시스템과 Pull 시스템으로 구분되어진다[9]. Push 시스템은 예측된 최종수요를 충족시키기 위하여 생산 공정의 생산 시기와 생산량을 결정하는 생산통제방식이다. 이에 반하여, Pull 시스템은 보유하고 있는 일정 수준의 재고를 유지하며 발생한 수요를 만족시키기 위하여 생산 시기와 생산량을 정하는 생산통제방식이다[2]. Pull 시스템의 대표적인 방법인 적시 생산시스템(Just in Time, JIT)의 하부 시스템인 KANBAN 시스템은 재공품재고를 일정수준이하로 유지하며 수요변화에 유연하게 대응하기 위해 생산량을 결정하는 생산통제방식이다[3].

한편, KANBAN 시스템의 대표적 방식인 CONWIP (Constant WIP)은 Pull 시스템과 Push 시스템이 혼재된 시스템으로 공정 내에 일정수준의 재공품(Working In Process, WIP)을 유지하며 생산량을 결정하는 생산통제방식이다[11]. 또한 Pull 시스템과 Push 시스템이 혼재된 시스템인 DBR (Drum-Buffer-Rope) 시스템은 모든 공정이 아닌 제약 공정을 중심으로 생산량을 결정하는 생산통제방식이다[12].

따라서, 본 연구에서는 자동차부품 제조기업인 I사의 공정 문제점들을 해결하기 위하여 대상 기업의 실제 생산시스템을 구현한 시물레이션 모델을 개발하였다. 개발된 시물레이션 모델을 이용하여 가장 보편적인 네 가지의 생산통제 방식인 Push 시스템, KANBAN 시스템, DBR 시스템, 그리고 CONWIP 시스템 하에서의 산출량, Lead time, WIP 등의 분석을 통하여 대상 기업에 가장 적합한 생산통제 방식을 제시하였다. 또한 As-Is 시물레이션 모델 분석을 통하여 확인된 공정상의 문제점을 개선한 To-Be 시물레이션 모델 분석을 통하여 효율적인 공정개선 방법을 제안하였다.

2. 문헌연구

그동안 제조 생산시스템에서의 공정개선에 관한 다양한 연구가 수리적 방법, 휴리스틱 방법, 메타 휴리스틱 방법, 그리고 시물레이션 방법 등을 이용하여 진행되어져 왔다. 본 연구에서는 Pull 시스템과 Push 시스템의 혼재 시스템인 DBR 시스템과 CONWIP 시스템에서의 공정개선을 수행한 기존 연구들에 관하여 분석을 수행하였다.

CONWIP 생산시스템에서의 공정개선과 관련된 주요 연구는 다음과 같다. Lee and Seo는 라인 생산시스템의 평균 안정 대기시간을 평가 기준으로 KANBAN 시스템과 CONWIP 시스템의 성능을 비교하였다. 이 연구에서 주어진 다양한 서비스 품질 조건 하에서 기존의 연구결과처럼 CONWIP 시스템이 KANBAN 시스템 보다 우월하다는 것을 확인하였다[6]. Park 등은 CONWIP 방식으로 운영되는 다품목 생산시스템 및 TOS(Total Order Service) 방식과 POS(Partial Order Service) 방식으로 운영되는 조달시스템의 성능평가를 위한 근사기법을 개발하였다. 개발된 근사법과 시물레이션 모형의 결과 비교를 통하여 개발된 근사법이 경제적 설계 및 효율적 운영 측면에서 효과적인 평가방법임을 보여주었다[9].

Kim과 Kim은 캐소드 플레이트 제작 시스템의 공정개선을 위해 Push 시스템, KANBAN 시스템, DBR 시스템, CONWIP 시스템, 그리고 CONWIP-DBR 시스템의 시물레이션 모델을 개발하였다. 이 연구에서는 각 생산통제방식의 효율성을 검증하기 위하여 산출량, Lead time, 그리고 WIP 수준을 분석하여 캐소드 플레이트 제작 시스템에 적합한 최적의 생산 방식을 제안하였다[2]. Quan 등은 시물레이션 방법을 이용하여 단추공장 생산시스템의 효율성과 수익성 개선을 위한 생산방식을 비교분석 하였다. 연구 결과에 의하면 CONWIP 시스템과 DBR 시스템을 사용할 때 두 생산방식 모두 병목 공정의 대기시간, WIP 수준, 그리고 생산비용이 모두 감소하였으며 CONWIP 시스템과 DBR 시스템의 뚜렷한 차이점이 없음을 보여주었다[3].

Kim 등은 한국 제조업의 특성에 적합한 생산방식을 제안하기 위하여 세 가지 생산방식인 JIT 시스템, CONWIP 시스템, 그리고 Push 시스템을 고려하였다 이 연구에서 각 시스템에서의 재고 수준과 가동률을 비교 분석하여 CONWIP 시스템이 한국 제조업의 특징인 동적인 생산환경에 더욱 적합하다는 것을 보여주었다[11]. 또한, Park과 Ha는 시물레이션 모델을 이용하여 5가지의 생산시스템(Push 시스템, Pull 시스템, CONWIP 시스템, G-MaxWIP 시스템, CWIPL 시스템)의 성능 비교를 위하여 세 가지 평가기준인 WIP, 산출률, 생산 Lead time 을 이용하여 평가하였다. 동일한 시물레이션 실험 환경에서 가장 단순한 형태인 CONWIP 시스템이 가장 효과적인 생산시스템임을 보여주었다[12].

Lee와 Lee는 흐름공정에서의 다수 애로공정을 통제할 수 있는 생산시스템 개발을 위하여 CONWIP과 DBR를 결합한 Mix DBR-CONWIP 시스템을 사용한 시물레이션 모델을 개발하였다. 이 연구의 결과에 따르면 DBR 시스템은 산출량 달성에 가장 적합한 시스템이며 Mix DBR-CONWIP 시스템은 Lead time과 WIP 감소에 적합한 시스템임을 보여주었다[10].

DBR 생산시스템에서의 공정개선과 관련된 주요 연구는 다음과 같다. Koh는 세 단계로 이루어진 직렬 생산라인의 생산시스템에 DBR 시스템을 적용하여 재고와 버퍼공간 유지비용을 최소화할 수 있는 이론적 모형을 제시하였다[8]. Lee와 Kim은 KANBAN 시스템과 DBR 시스템을 혼합하여 공정 버퍼의 효율적 운영방법을 이론적으로 제시하였다[7]. Yang 등은 재투입을 고려한 DBR 기반 루프 스케줄링 기법을 적용한 시물레이션 모델을 개발하여 적정 재고수준과 생산성을 유지하기 위해 필요한 자재 투입 시점, 적절 투입량, 공정별 여러 작업의 우선순위 결정방법을 제시하였다[5].

Jeon 등은 Job Shop 작업장에 DBR 시스템을 적용한 시물레이션 모델을 개발하여 최대 납기 준수율을 달성할 수 있는 다섯 가지 인자들(준비시간, 고장 시간, 공정시간, 작업시간, 기계 대수)의 최적 인자 수준을 결정하는 방법을 제시하였다[14]. 한편, Yoshida와 Park은 PCB 생산라인의 효과적인 스케줄링을 개발을 위해 복수 DBR 시스템을 적용하였다. 이 연구에서 단수 DBR 시스템과 비교하여 복수 DBR 시스템은 대기시간 및 이동거리의 단축에 의하여 20% 이상의 제조 Lead time 단축 효과를 보여주었다[13].

선행연구를 통하여 시물레이션을 이용한 생산시스템 연구에서는 물류측면을 고려한 공정개선에 관한 많은 연구는 진행되지 않은 것을 보여준다. 그러므로 네 가지의 생산시스템(Push 시스템, KANBAN 시스템, DBR 시스템, 그리고 CONWIP 시스템)을 이용하여 자동차 부품업체 생산시스템에서 물류요인을 고려하여 산출량, Lead time, WIP 등의 분석을 실시하여 공정개선 방향을 제시하는 것이 학문적 가치가 있는 것을 보여준다.

3. 자동차 부품업체의 공정 현황 및 문제

3.1 대상기업 현황

I사는 슬리브(Sleeve), 아우터 레이스(Outer race), 클러치 기어(Clutch gear), 샤프트(Shaft), 하우징(Housing) 등의 부품을 생산하는 자동차 부품제조기업이다. 3개동 공장으로 구성된 I사는 등속조인트 조립 부품을 주력으로 생산하는 기업으로서 1공장에서는 슬리브와 클러치 기어를 2공장에서는 아우터 레이스와 하우징을 그리고 3공장에서는 플레이트와 샤프트를 생산하고 있다.

3.1.1 I사 현황

슬리브 제품과 등속 제품을 주력제품으로 생산하던 I사는 수동변속기에서 자동변속기로의 자동차 변속장치

전환에 따른 슬리브 부품의 급격한 물량 감소에 의하여 현재는 등속 제품을 회사의 주력제품으로 생산하고 있다. 이에 따라서 자동차의 회전과 조향을 담당하는 자동차 부품인 등속조인트 조립 부품을 생산하고 있으며 주로 아우터 레이스와 플레이트 제품군을 생산하고 있다.

다음 <Figure 1>은 대상 기업의 주력 제품인 아우터 레이스와 플레이트를 보여주고 있다. 아우터 레이스 제품은 부품들이 회전하면서 일어나는 운동 마찰을 최소화하기 위해 사용되는 베어링으로 회전축을 원활하게 회전시켜 축에 걸리는 하중을 지지하는 역할을 하는 제품이다. 또한 플레이트 제품은 전달된 각 단의 변속을 기어로 전달하는 역할을 하는 제품이다.



<Figure 1> Target Company Main Products

3.1.2 I사 생산공정

본 연구에서는 대상 기업의 주력 제품인 아우터레이스 제품과 플레이트 제품을 생산하는 2공장과 3공장의 공정을 연구 대상 공정으로 정하였다. 현재 2공장에서는 아우터 레이스 제품이 생산되며, 3공장에서는 플레이트 제품이 생산되고 있다. 대상 제품은 제품의 특성에 따라서 트랙밀링, 전조, 연삭, 브로치, 드릴, 열후가공, 치질, 홈가공, 디버링 공정 등의 9가지 공정을 거쳐서 생산되며 각 제품은 흐름라인 생산시스템을 따라서 생산되고 있다. 다음은 주력 제품이 거치는 9가지 공정에 대한 설명이다.

(1) 트랙밀링공정(Milling)

트랙밀링공정은 회전하는 절삭공구에 이송된 가공물을 고정시켜 밀링커터, 엔드밀 등의 툴을 이용하여 절삭하는 가공이다. I사의 밀링공정은 밀링머신에 컨베이어를 연결하여 공정작업자가 로딩포트에 공작물을 적재하면 기계가 스스로 로딩/언로딩하는 기계를 사용하여 밀링공정이 진행되고 있다.

(2) 전조(Form Rolling)

전조 공정은 소재나 공구를 회전시켜 공구의 표면형을 각인하는 일종의 특수압연이라 볼 수 있는 가공이다. 공구의 표면에 치형에 따라 파 놓은 소재에 강한 힘으로 밀어붙이면서 회전시켜 표층부분에 소성 변형을 일으켜 형을 만드는 가공법이다.

(3) 연삭공정(Grinding)

연삭공정은 절삭 공정 중에서 가장 정밀한 작업으로서 고속으로 회전하는 스톨을 이용하여 가공물의 표면을 절삭가공을 통해 평활하게 하는 기계가공의 일종이다.

(4) 브로치공정(Broaching)

브로치공정은 내측 브로칭 머신을 사용하여 구멍의 내면을 가공하는 것으로 공작물의 구멍으로 공구를 끌어들여 당기거나 눌러 절삭 날의 형상과 반대의 형상으로 가공하는 가공법이다.

(5) 드릴공정(Drilling)

드릴공정은 드릴 비트를 이용하여 단단한 재료에 단면이 원형인 구멍을 내는 절삭 공정으로 원형의 구멍을 만들거나 기존의 구멍을 확장시키는 가공법이다.

(6) 열후가공공정(Hard Turning)

열후가공공정은 금속가공을 위한 가장 일반적인 공정으로 통이나 원추형 외부 표면을 가공하는 공정이다.

(7) 치절공정(Gear Cutting)

치절공정은 브로치 및 기어 성형의 대안으로 사용되는 가공법으로 연속적이고 동일한 평면 회전 절단을 포함하는 기계 공정이다.

(8) 홈가공공정(Grooving)

홈가공공정은 정밀하게 홈을 파는지가 가장 중요한 요소로서 공작물의 외경 또는 내경에 여러 가지 폭과 깊이를 갖게 홈을 가공하는 공정이다.

(9) 디버링공정(Deburring)

디버링공정은 기계 가공 시에 발생하는 칩이나 버(Burr) 등을 제거하는 공정으로 제품의 조립성에 영향을 주는 공정이다.

3.1.3 I사 세부공정

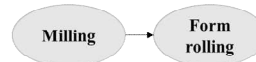
대상 기업 I사는 서로 다른 제품이 같은 공정을 공유하여도 제품별 전용 라인을 통해 서로 다른 공정 흐름과 공정시간을 갖는 흐름라인 생산시스템을 이용하여 제품을 생산하고 있다. <Figure 2>은 아우터 레이스와 플레이트 2개의 제품군에서 대표 품목에 대한 공정흐름도이다.

아우터 레이스 제품군은 C/V Outer race와 D/O Outer race로 구별되며, <Figure 2>의 첫 번째 공정흐름도는 아우터 레이스 제품군 중에서 대표 제품인 CG Outer의 공정흐름도이다. CG Outer 제품은 트랙밀링 공정을 통해 표면을 가공한 후 다음 공정인 전조 공정을 통하여 표면을 거칠게

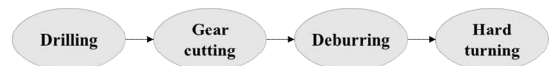
❖ CG OUTER



❖ CV OUTER RACE



❖ PLATE,FR



❖ PLATE,RR



<Figure 2> Target Company Main Production Processes

각고 내경에 홈을 판 후 다음 공정인 연삭공정을 통해 표면을 매끄럽게 하고 검사포장공정으로 마무리한다. 플레이트 제품군은 Plate RR(소형), Plate FR(소형), Plate RR(중형)으로 구별되며, 네 번째 공정흐름도는 그 중 하나인 Plate RR(소형)의 공정흐름도이다. Plate RR(소형)은 드릴공정을 통하여 공작물에 구멍을 뚫은 후 브로치공정을 통하여 구멍난 홈에 내경을 가공하며, 홈가공을 거치고 열후가공공정을 수행한 후 검사포장공정을 거쳐서 마무리된다.

3.2 I사 공장 문제점

내연기관 자동차에서 전기 자동차로 전환되는 자동차산업 패러다임의 전환시기에 대응하여 자동차 원청업체는 전기 자동차 생산비중을 증가시키고 있다. 이러한 변화에 의하여 자동차부품 제조기업 I사의 주력 상품 또한 영향을 받아 전체 생산량의 20%에 해당하던 등속 기어가 최근 2년 동안 전체 생산량의 54%를 차지하고 있다. 하지만 이전 주력 제품이었던 슬리브와 비교하면, 등속 제품은 소재비와 가공비의 비중이 높아 비록 매출액은 증가하였지만 영업이익은 감소하여 회사의 경영구조가 악화되고 있는 상황이다.

주력 제품의 변화에 따른 각 제품의 생산량 변화에도 I사는 비용적 부담 때문에 이전 주력 제품이었던 슬리브 위주의 생산 시스템을 여전히 운영하고 있다. I사의 생산 라인은 제품별 전용라인으로 구성되어 있기 때문에 전용 제품 이외에는 다른 제품들을 생산할 수 없어 유희설비비율이 증가하고 있다. 또한 I사는 현재 Push 생산방식을 이용하고 있기 때문에 공장 안의 재공품재고가 지속적으로 누적되고 있으며 이 재고는 공정대기와 로트대기를 증가시켜서 제품의 Lead time을 증가시키는 원인이 되고 있다.

그리고 지속적으로 증가하는 재공품재고는 물류 작업자의 작업부하를 증가시켜 병목공정에 대한 공급지연을 유발시키고 있다. 또한 작업장에서 작업을 하기 위해 설정하는 작업배치와 다음작업장으로 이송하기 위해 설정한 이송배치의 불일치에 의하여 이송배치에 의한 제품의 Lead time이 증가하는 상황이다. 그러므로 현재의 설비 배치와 추가 설비투자 없이 I사의 애로공정 해소를 통한 효율적 생산이 가능한 공정개선이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 I사의 공정개선을 통한 Lead time 감소와 생산을 향상을 위하여 I사의 주력제품을 생산하는 2공장과 3공장으로 대상으로 시뮬레이션 모델을 통한 공정개선을 실행하였다.

4. 시뮬레이션을 활용한 생산시스템 개선

현재 I사는 공장 내 재공품을 고려하지 않는 Push 생산 방식으로 인하여 공장 내 재공품의 증가에 따른 물류 작업자의 작업부하 증가와 제품 Lead time 증가 그리고 작업 배치와 이송배치의 불일치에 의한 비효율적 생산을 문제를 겪고 있다. 그러므로 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 I사의 현재 생산율을 만족시키면서 공장 내 재공품의 최소화 및 물류이송 시간의 감소가 가능한 최적의 이송배치 크기 결정과 Lead time 최소화를 통한 공정개선이 가능한 생산시스템을 제안하는 것이 이 연구의 목적이다.

4.1 시뮬레이션 기준정보

본 연구에서는 현재 Push 생산방식을 사용하고 있는 대상기업의 공정개선 분석을 위해 ARENA 시뮬레이션 모델과 관련된 기준 정보는 다음과 같다.

4.1.1 생산품목 정보

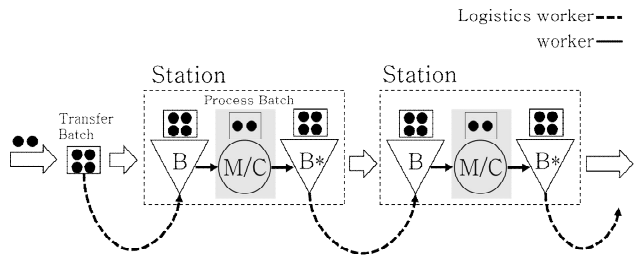
본 연구의 대상 제품은 2공장과 3공장에서 생산하는 I사의 주력제품인 아우터 레이스와 플레이트 제품군에서 각 두 개의 제품들 -CG 아우터(CG Outer), CV 아우터 레이스(CV Outer race), 플레이트 FR(Plate FR), 그리고 플레이트 RR(Plate RR)-을 선정하였다.

4.1.2 시스템 구성

대상 제품은 하나의 설비로 이루어진 배치 흐름라인 생산방식이며 배치 흐름라인 생산방식에서는 작업배치와 이송배치는 항상 같지는 않다. <Figure 3>에서 보여지듯이 제품이 도착하면 이송배치(Transfer Batch) 단위로 구성된 뒤 구성된 배치를 다음 공정(Station)으로 이송한다. 공정에 제품이 공급되면 기계는 작업배치(Process Batch)

단위로 제품을 구성하여 동시에 처리한다. 각 공정(Station)은 설비 앞 버퍼(B)와 설비(M/C), 그리고 설비 뒤 버퍼(B*)로 구성돼있다. 설비 앞 버퍼는 설비가 작업이 가능할 때까지 제품이 대기하는 공간이며, 설비 뒤 버퍼는 작업을 완료한 후 다음 공정의 설비 앞 버퍼에 물류 작업자가 운반이 가능할 때까지 대기하는 공간이다

<Figure 3>을 보면 제품이 공급될 때 물류 작업자는 이송배치 단위로 설비 앞 버퍼에 제품을 운반하고 공정 작업자는 버퍼에서 작업배치 단위로 설비에 로딩, 작업이 끝난 부품은 언로딩하여 설비 뒤 버퍼로 운반한다. 설비 뒤 버퍼에 이송배치 수량만큼 제품이 구성되면 물류 작업자는 해당 제품의 다음 공정으로 제품을 이송한다.



<Figure 3> System Configuration

4.1.3 공정작업자 및 물류작업자

공정 작업자는 각 공정 별로 한 명씩 배치되어 있으며 물류 작업자는 각 공장 별로 한 명씩 배치되어 있다. 2공장 물류 작업자는 CG Outer, CV Outer Race, 3공장 물류 작업자는 Plate FR, Plate RR 제품의 운반과 공급을 담당한다.

4.1.4 가공 시간 및 고장

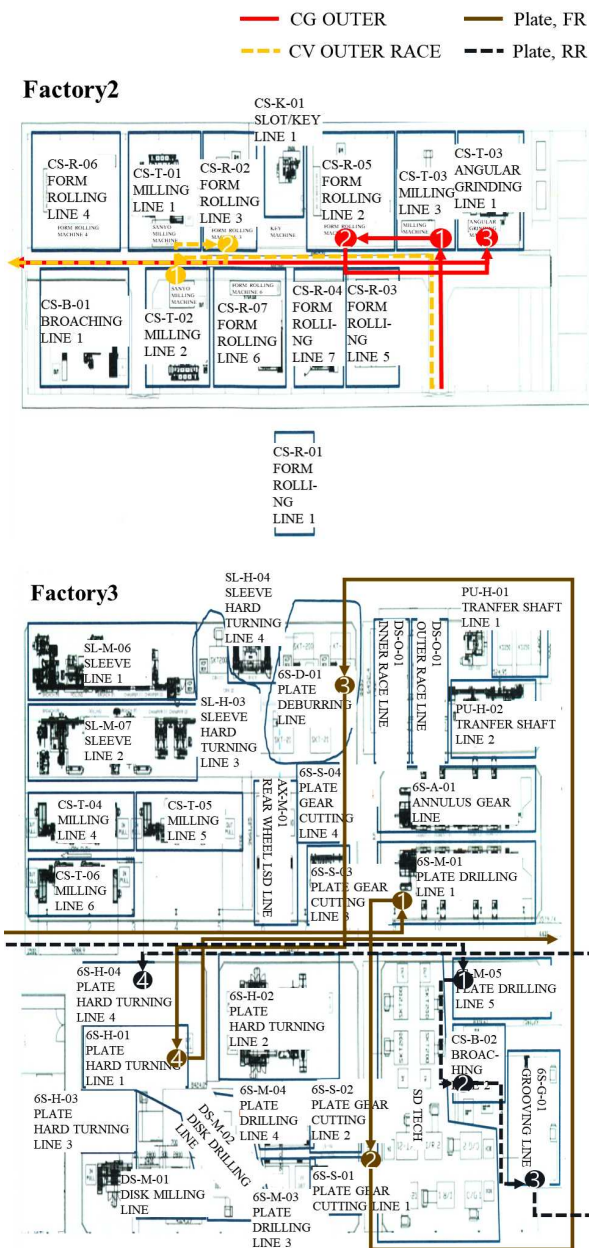
가공 시간에는 공정 작업자가 제품을 로딩/언로딩하는 시간이 포함되어 있으며 작업배치단위로 가공하는 데 걸리는 시간을 의미한다. 가공 시간은 평균과 표준편차의 비율인 변동 계수(CV, Coefficient of Variation)가 0.3인 정규분포를 따르는 것으로 가정하였다. 예를 들어 CG Outer의 트랙밀링 공정은 작업배치 크기가 2인 배치를 가공하는 데 걸리는 시간은 평균 110초인 정규분포를 따른다.

설비가 가동되지 않는 시간인 유휴시간은 현장에서 발생하는 기계의 유휴시간을 고장 시간으로 입력하였다. 실제 현장에서는 설비의 고장 이외에도 작업자 태만, chip 제거, 기계 cool down 등에 의해 평균적으로 3시간에 한 번씩 기계의 유휴시간이 발생하며 평균적으로 20분 동안 복구작업이 일어나고 있다. 하지만, 본 연구의 목표는 리드타임을 개선하기 위한 생산방식의 성능 비교이므로 고장시간 및 유휴시간을 상수로 단순화하였다. 또한, 본 연구에서는 이송시간을 고려하지 않고 물류 작업자만을 고려하였기 때문에 이송시간 또한 상수로 하여 단순화하였다.

따라서, 시뮬레이션 모델에서는 대상기업의 공정현실을 반영하여 본 연구에서는 평균 발생 시간을 MTBF와 MTR의 값으로 가정하여 MTBF는 180분으로 간주하였으며, 고장을 일으켰을 때부터 다시 동작하기까지의 고장 복구 시간인 MTR = 20분으로 가정하였다. 또한 모든 장비의 MTBF와 MTR이 동일하다고 가정하였다.

4.1.5 운반 시간

물류작업자는 아래 <Figure 4>처럼 제품을 이송한다. 대상 공정의 면적을 고려하여 평균적으로 2공장은 40초, 3공장은 45초라고 가정한다.



<Figure 4> Logistics Worker Flow

4.1.6 시스템 평가척도

본 연구에서 제시한 세 종류의 생산방식 -KANBAN 생산방식, CONWIP 생산방식, 그리고 DBR 생산방식-과 I사에서 현재 운영하고 있는 Push 생산방식과의 비교분석을 위하여 생산율, Lead time, 재공품(WIP)의 세 가지 항목을 평가척도로 사용한다. <Table 1>은 시뮬레이션 모델에서 사용한 기준정보들을 보여준다.

<Table 1> The Model Input Data

Product name	Process	Process time(sec)	CV	Process batch size
CG Outer	Milling	110	0.3	2
	Form rolling	40	0.3	1
	Grinding	57	0.3	1
CG Outer Race	Milling	85	0.3	2
	Form rolling	25	0.3	1
Plater FR	Drilling	270	0.3	4
	Gear cutting	80	0.3	1
	Deburring	43	0.3	4
	Hard turning	55	0.3	1
Plater RR	Drilling	674	0.3	12
	Broaching	37	0.3	1
	Grooving	38	0.3	2
	Hard turning	60	0.3	1

4.1.2 시뮬레이션 실험 설계

(1) 시뮬레이션 가정

대상기업 I사의 제2공장과 제3공장의 공정에 대하여 현 생산방식인 Push 생산방식과 비교 생산방식인 KANBAN 생산방식, CONWIP 생산방식, 그리고 DBR 생산방식의 시뮬레이션 모델을 상용 소프트웨어 Arena를 이용하여 개발하였다.

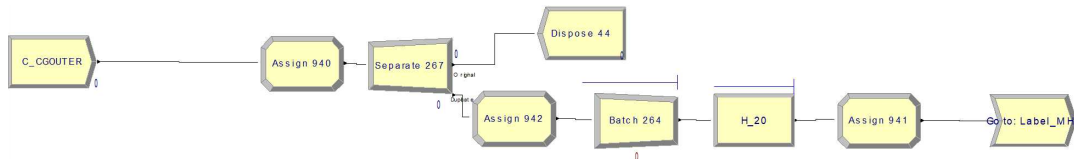
시뮬레이션은 안정 상태에서 결과값을 계산하기 위해서 warm up시간은 1,440분으로 설정하고 실험결과와의 오차한계값을 줄이기 위해 시뮬레이션 반복 횟수를 10회로 하였다. Run시간은 대상기업의 5개월 물량을 생산하는 144,000분을 기준으로 모든 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션 모델은 다음과 같은 가정을 한다.

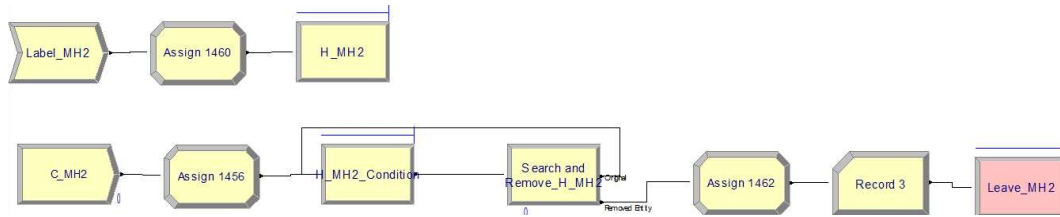
- 공정작업자 setup시간을 고려하지 않는다
- 작업시간은 24시간 3교대로 휴식시간은 고려하지 않는다.
- 한 달 작업일수는 20일로 한다.

(2) 시뮬레이션 모델

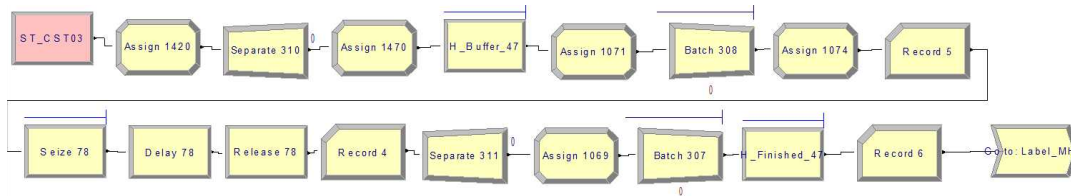
대상기업 I의 주력 부품을 생산하는 2공장과 3공장의 Push 생산방식, KANBAN 생산방식, CONWIP 생산방식, 그리고 DBR 생산방식을 개발하였다. <Figure 5>와 같이



<Figure 5> The Product Input Model



<Figure 6> The Logistics Process Model



<Figure 7> The Manufacturing Process Model

제품이 부품단위로 투입된 후 이송배치 단위로 구성되면 다음 공정으로 이송 가능할 때까지 대기한다. 4가지 생산 방식에서 제품별 투입방식은 <Figure 5>에서처럼 동일하다.

물류작업자는 대기하는 제품이 있으면 <Figure 6>처럼 대기하는 제품을 선택하여 다음 공정으로 이송한다.

<Figure 7>과 같이 물류작업자가 제품을 공정에 투입하면 공정작업자가 가공이 가능할 때 제품 가공을 시작하고, 가공이 완료되면 다음 공정으로 이송가능할 때까지 대기한다. 각 공정별로 물류작업자 제품 이송 방식이 동일하다.

다음은 본 연구에서 사용한 4가지 생산방식에 대한 간략한 설명이다

① Push 방식

Push 모델은 공장 안의 WIP을 고려하지 않고 제품별로 생산율을 만족시킬 수 있도록 투입량을 결정한다. 흐름 라인 생산방식에서는 병목공정이 전체 공정의 생산량과 Lead time을 결정하는 중요한 요인이기때문에 본 연구에서는 4가지의 생산방식에서 병목공정을 우선으로 투입하는 것으로 가정하였다.

② KANBAN 방식

KANBAN 모델은 각 공정의 버퍼 크기만큼 투입하기 때문에 간판 수를 버퍼 수로 간주한다. 각 공정에는 이송배치 단위만큼 투입되기 때문에 간판 크기는 이송배치 크기를

기준으로 한다. 예를 들어 이송배치 크기가 4이면 간판 크기는 4, 8, 12같이 4의 배수로 증가한다. 또한 Starvation 현상이 발생하지 않도록 제품은 항상 투입할 수 있도록 가정하였다.

본 연구에서는 이송배치가 작업배치보다 크거나같으므로 간판 수는 이송 배치 크기를 기준으로 설정 하였으며 이송 배치를 구성하는 부품 수를 간판 수로 산정하였다. 각 공정 별로 동일한 수의 간판을 사용한다고 가정하였다. 공정별 간판 수는 공정 앞과 공정 후의 간판 수의 합으로 나타냈으며, 공정 전 간판 수와 공정 후 간판 수는 동일하게 설정하였다.

③ CONWIP 방식

CONWIP 모델은 CONWIP 수만큼 투입하도록 제품 투입단계에서 통제하였으며, CONWIP수는 이송배치 크기를 기준으로 한다. 또한 CONWIP 생산방식에서도 Starvation 현상이 발생하지 않도록 제품은 항상 투입할 수 있도록 가정하였다. CONWIP수는 간판 수와 마찬가지로 부품 수로 산정한다.

④ DBR 방식

DBR 생산방식은 병목공정 앞에 다른 공정 대비 큰 버퍼 크기를 가지고 있으며 버퍼 크기는 이송배치 크기를 기준으로 한다. DBR 생산방식에서도 Starvation 현상이 발생하지 않도록 제품은 항상 투입할 수 있도록 가정하였다.

DBR 생산방식은 각 공정 버퍼 크기만큼 투입 가능하여 병목공정의 생산속도 따라 생산흐름이 결정된다는 점에서 KANBAN과 비슷하다. 그러나 DBR 생산방식은 전체 공정을 병목공정과 비병목공정으로 구분하여 병목공정의 버퍼를 관리하는 점이 KANBAN 생산방식과 다르다. 또한 병목공정 앞에 버퍼 크기를 늘림으로써 첫 공정과 병목공정까지 Push 방식, 병목 공정에서 제품이 완료되었을 때 투입하는 Pull 방식의 혼합이 가능한 점은 Pull 방식만 가진 KANBAN과는 차이점을 가진다.

(3) 시뮬레이션 실험

현재 생산방식인 Push 방식과 KANBAN, CONWIP, DBR 방식을 세 가지의 평가척도를 이용하여 비교분석을 수행한다. 그리고 Lead time에 영향을 미치는 이송배치 크기가 생산율에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 물류 작업자의 물류처리 우선순위인 선입선출 규칙(FIFO)와 병목공정을 우선으로 처리하는 물류처리방식을 비교한다.

① 병목공정

제품은 흐름라인 생산시스템에서 생산되기 때문에 제품별 가공시간이 제일 큰 공정이 병목공정이 된다. 공정의 가공시간은 같은 변동계수를 가지므로 분산을 고려하지 않고 평균 가공시간만을 고려하였다. 각 공정별로 다른 작업배치 크기를 가지므로 가공시간을 작업배치 크기로 나누었다. <Table 2>에서 보여지듯 Product 1(CG Outer race)은 연삭공정의 부품당 가공시간이 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서 분석결과 Product 1, Product 2(CV Outer race), Product 3(Plate FR), Product 4(Plate RR)의 병목공정은 각각 연삭공정(57초), 트랙밀링공정(42.5초), 치절공정(80초), 열후가공공정(60초)이다.

<Table 2> Processing Time Per Unit(sec)

Product name	Process name	Process time/ Process batch
CG Outer	Milling	55
	Form rolling	40
	Grinding	57
CG Outer Race	Milling	42.5
	Form rolling	25
Plater FR	Drilling	67.5
	Gear cutting	80
	Deburring	10.75
	Hard turning	55
Plater RR	Drilling	56.2
	Broaching	37
	Grooving	19
	Hard turning	60

② 이송배치

각 공정은 작업배치 크기만큼 병렬로 제품을 처리하기 때문에 이송배치 크기는 각 공정의 최대 작업배치 크기의 배수 단위로 정하였다. 이송배치 크기는 제품별로 결정하였으며 각 제품의 공정 별 이송배치 크기는 동일하다고 가정하였다. 예시로 <Table 1>처럼 Product 1의 작업배치 크기가 2, 1, 1로써 최대 작업배치는 2가 된다. 따라서 Product 1의 이송배치 크기는 2, 4, 8로 2의 배수 단위로 결정한다.

4.1.3 시뮬레이션 실험 분석

(1) 생산방식 비교

제품별 이송배치 크기는 8, 8, 8, 24 단위로 사용하였다. 이송배치 크기가 작으면 물류작업자의 물류 처리 횟수가 늘어나서 제품의 생산성에 영향을 미치며 배치 크기가 크면 Lead time에 영향을 미치기 때문에 최대 작업배치 크기의 2배를 기준으로 결정하였다. 또한 Product 1, 2는 작업배치가 2로 매우 작기 때문에 생산율이 낮아 이송배치 크기를 작업배치의 4배로 하였다.

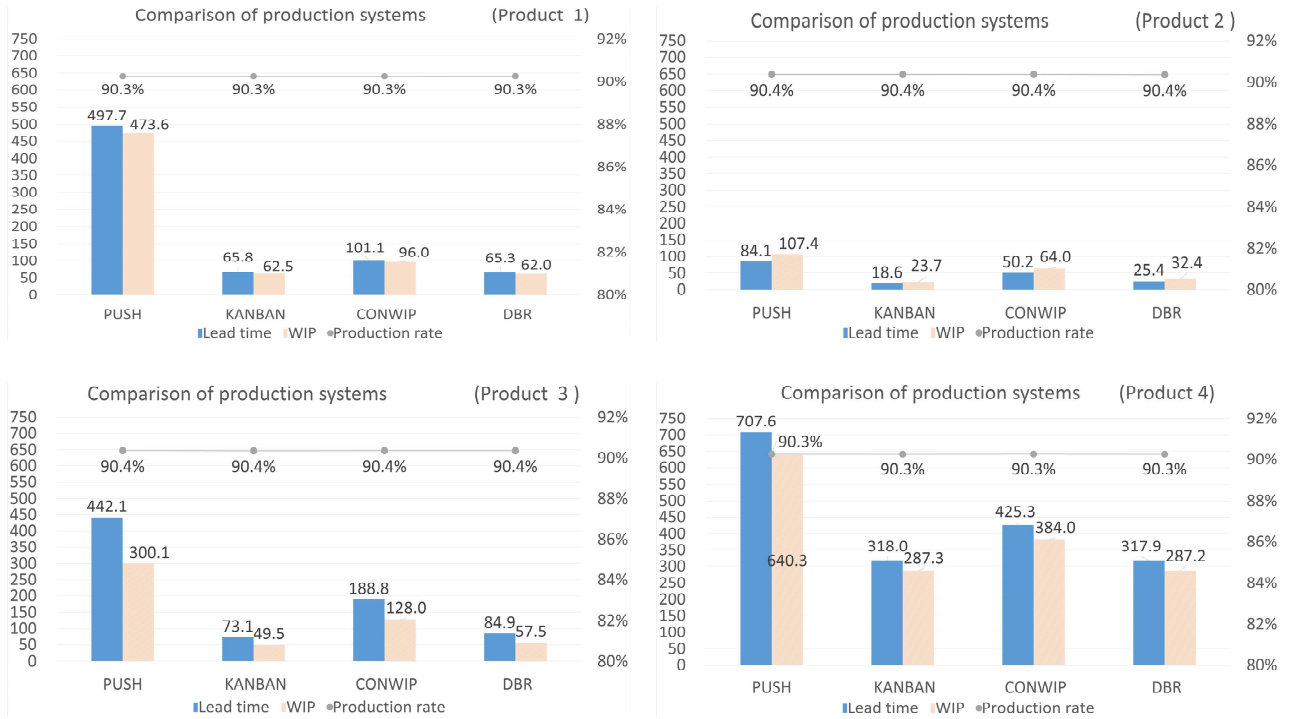
Push 방식은 생산율 100%를 기준으로 투입하였다. 예를 들어, Product 1의 경우에는 병목공정(57초)*이송배치 크기(8) = 456초 간격으로 제품을 투입한다. 또한 KANBAN 방식은 제품별로 각 공정의 간판 수를 32개, 32개, 32개, 96개로 하였다. 따라서 총 간판수는 제품별로 32*공정수(3) = 96개, 32*공정수(2) = 64개, 32*공정수(4) = 128개, 96*공정수(4) = 384개이다.

CONWIP 생산방식 모델에서는 KANBAN과 동일하게 비교하기 위해서 제품별로 모든 공정의 간판 수의 총합을 CONWIP수로 정하였다. 따라서 제품별로 각각 96개, 64개, 128개, 384개로 결정하였다. 또한 DBR 생산방식에서는 KANBAN과 동일하게 WIP를 비교하기 위해서 병목공정 앞 버퍼를 한 개를 증가시켰으며 제품별로 가공시간이 제일 작은 공정 앞 버퍼의 수를 한 개 감소시켰다.

<Figure 8>은 Push, KANBAN, CONWIP, DBR의 생산방식을 세 가지 척도 Lead time, WIP, 생산율을 사용하여 비교한 것이다.

<Figure 8>처럼 평균적으로 Product 4의 WIP와 Lead time이 가장 크고, Product 2의 WIP와 Lead time이 가장 작다. Product 4는 배치 크기가 24로 이송배치 크기가 8인 다른 제품에 비해서 가장 크기 때문에 WIP와 Lead time이 가장 크며, Product 2는 제품 중에서 공정 수가 2개로 제일 작기 때문에 WIP와 Lead time이 가장 짧다.

제품별 생산율은 고장률 10%을 고려한 90%로 가정하였다. 따라서 제품별로 최대 생산율은 90%가 되며 Push, KANBAN, CONWIP, DBR 방식이 최대 생산율 90%을 만족했음을 분석결과 확인하였다.



<Figure 8> Comparison of Production Systems

각 생산방식을 비교해보면 Push 생산방식이 WIP와 Lead time이 가장 큰 것으로 나타났다. Product 1은 DBR 생산방식, Product 2는 KANBAN 생산방식, Product 3은 KANBAN 생산방식, Product 4는 DBR 생산방식이 가장 적합한 생산방식임을 보여준다. 평균적으로 4가지의 생산방식 중에서 KANBAN 생산방식이 대상 기업의 생산 시스템으로 가장 적합하다. <Table 3>처럼 현 생산 방식인 Push 생산방식과 다른 세 가지의 생산방식을 Lead time과 WIP 기준으로 비교하였다. Kim과 Kim[4]의 선행 연구 결과와 비슷하게, Product 2의 Lead time 기준으로, KANBAN 생산방식은 현 생산방식과 비교하여 77.90%의 개선율을, CONWIP 생산방식은 40.39%의 개선율을, 그리고 DBR은 69.81%의 개선율을 보여주었다. 또한, Product 2의 WIP 기준으로, KANBAN 생산방식은 현 생산 방식과 비교하여 77.91%의 개선율을, CONWIP 생산방식은 40.41%의 개선율을, 그리고 DBR은 69.82%의 개선율을 보여준다.

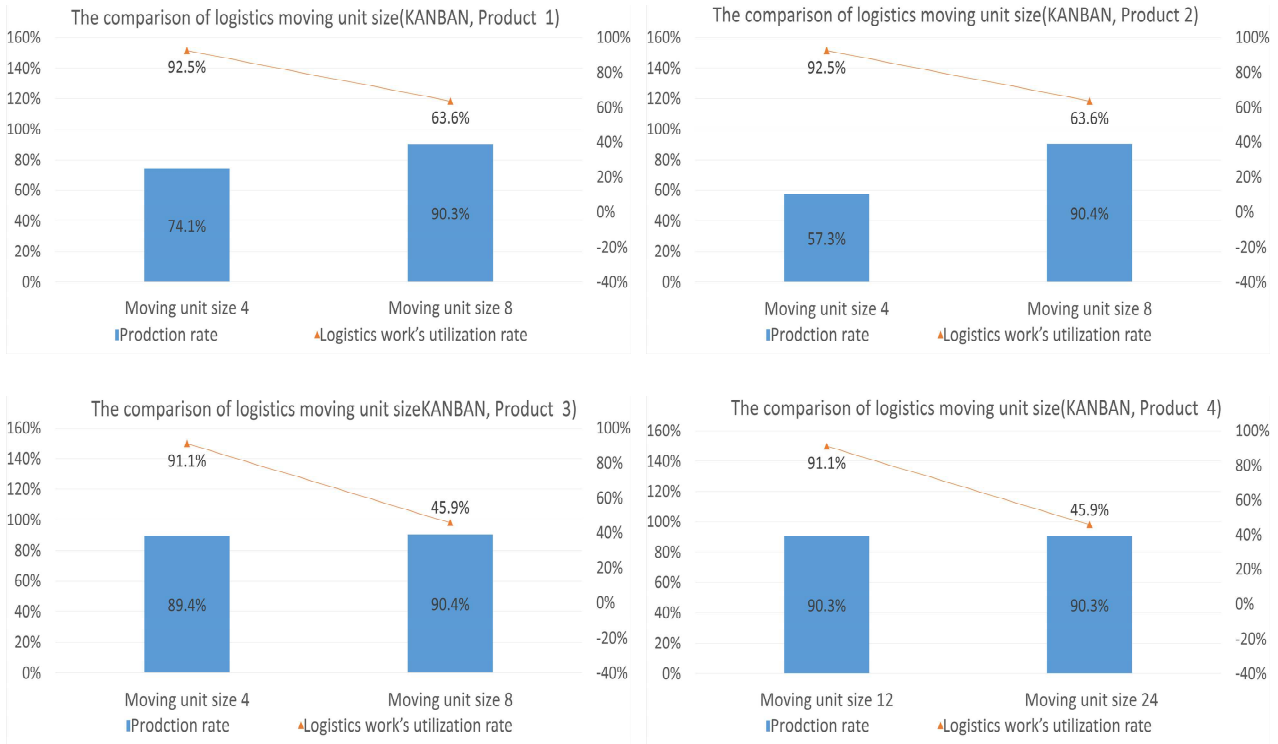
(2) 이송배치 크기

세 가지 생산방식 중에서 KANBAN 생산방식이 대상 업체의 공정개선에 가장 적합한 생산방식으로 나타났기 때문에, 가장 적합한 이송배치 크기는 KANBAN 생산방식에서만 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 이송배치 크기가 클수록 Lead time이 늘어나기 때문에 제품별 최대 작업배치 크기를 기준으로 배수만큼 증가하여 실험하였다. Product 1, 2는 작업배치의 작은 크기를 고려하여 작업배치 4부터 시작하였다.

<Figure 9>처럼 Product 1, 2, 3은 이송배치 크기가 4에서 8로 증가되었을 때 생산율은 증가하였으며 물류작업자의 가동률은 감소하였다. 또한 물류작업자의 가동률이 증가할수록 생산율이 증가하지만 Product 1, 2, 3의 경우에는 이송배치 크기가 4일 때 최대 생산율인 90%를 만족하지 않아도 이미 물류작업자의 가동률이 90%를 넘는 것을 보여주었다. 이는 물류작업자의 최대 능력 범위에서의 제품 최대 생산율이라고 볼 수 있다.

<Table 3> Comparisons of Production Systems

	PUSH		KANBAN		CONWIP		DBR	
	Lead time	WIP	Lead time	WIP	Lead time	WIP	Lead time	WIP
Product 1	497.71	473.57	65.76	62.48	101.07	96	65.28	62.03
Product 2	84.146	107.4	18.60	23.73	50.16	64	25.40	32.41
Product 3	442.11	300.11	73.10	49.54	188.77	128	84.91	57.54
Product 4	707.62	640.34	318.03	287.28	425.2	384	317.86	287.16



<Figure 9> The Comparison of Moving Unit Sizes

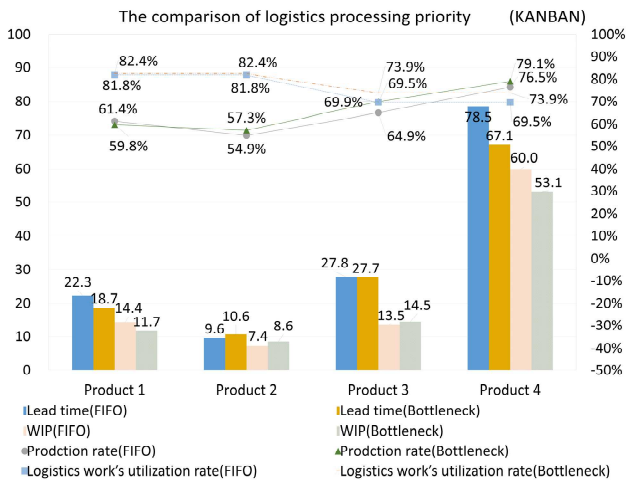
물류작업자가 공정에 제품을 공급해야 제품이 생산되므로 물류작업자의 가동율이 높을수록 제품의 생산율이 증가한다고 할 수 있다. <Figure 9>의 Product 1, 2, 3을 보면 이송배치 크기가 4인 경우 물류 작업자의 최대 가동율내에서의 최대 생산율의 경우에도 물류작업자에 의한 생산율 Loss가 발생하지 않은 것으로 볼 수 있습니다. 한편, 이송배치 크기가 8인 경우 이송배치 크기가 4인것에 비해 가동율은 줄어들며, 생산율은 더 높아진다. 이는 물류 작업자의 이송량이 줄어들었지만 이송 배치 크기가 4인 경우보다 더 많은 양의 부품이 공정에 공급되어 생산율이 높아진 것으로 볼 수 있다. 그러나 물류 작업자의 가동율이 최대 가동율보다 낮아지는 경우에는 물류 작업자의 가동율이 더 높아진다면 더 많은 양의 제품을 생산할 수 있다. 따라서, 물류 작업자에 의한 생산율 Loss가 발생한 것으로 볼 수 있습니다.

물류작업자의 작업 부하가 높지 않고 생산율을 만족시킬 수 있는 최적의 이송배치 단위는 8임을 확인하였다. Product 4는 이송배치 크기가 12에서 24로 증가되었을 때 생산율은 조금 증가하였으며 물류작업자의 가동률은 감소함을 보여주었다. 생산율과 Lead time의 증가범위를 고려할 때, 각 제품들의 이송배치 크기는 12가 최적 이송배치 단위이다. 따라서 시뮬레이션 결과분석에 의하면, Product 1, 2, 3 그리고 Product 4의 이송배치 단위는 각각 8, 8, 8, 12일 때 최적임을 나타낸다.

(3) 물류처리우선 순위

KANBAN 생산방식에서 물류처리 할당방식이 생산율에 어떤 영향을 미치는 지에 관한 실험을 실시하였다. 물류작업자에 의한 지연이 있을 때 물류작업자가 어떤 제품을 이송하느냐에 따라 제품의 생산율에 영향을 미친다. 특히 병목공정에 제품을 바로 공급해주지 않는다면 제품의 생산율이 감소하게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 선입선출(FIFO) 방식과 병목공정 우선 할당방식의 물류처리방식을 수행하였다. 물류작업자는 대기 중인 제품들 중에서 다음 공정이 병목공정일 경우 그 제품에 우선순위를 주어 처리하였으며 서로 다른 제품의 병목공정이 있을 경우와 병목공정이 아닌 제품의 경우에는 FIFO 방식으로 물류를 처리하였다. 제품별 이송배치크기는 4, 4, 4, 12이고 공정별 간판 개수는 8, 8, 8, 24개로 가정하였다. 물류작업자에 의한 지연을 잘 드러내주는 상황을 보여주기 위해 이송배치크기와 간판 수를 최소 단위로 설정하여 분석하였다.

<Figure 10>처럼, Product 1은 생산율이 줄었지만 물류작업자 한 명이 Product 1, 2를 담당하기 때문에 물류작업자의 가동률 측면에서 분석하였다. 병목공정 우선 할당 방식에서는 물류작업자의 가동률이 증가한 것으로 보아 전체적인 생산이 증가했다고 추론할 수 있다. 또한 평균적으로 병목공정 우선 할당방식이 FIFO 방식보다는 재공품과 Lead time 감소를 보여주었다. 그러므로 대상 공정에서는 병목공정 우선 할당 방식이 적합한 물류처리방식이다.



<Figure 10> The Comparison of Logistics Processing Priority

5. 결론 및 연구방향

자동차 부품제조업체 I사의 공정개선을 위하여주력제품을 생산하는 2공장과 3공장을 대상으로 생산시스템 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 현재 대상기업이 사용중인 Push 생산방식과 세가지의 생산방식인 -KANBAN 생산방식, CONWIP 생산방식, 그리고 DBR 생산방식과의 비교 분석을 통하여 대상기업에 적합한 생산방식을 제안하였다. 또한 Lead time에 영향을 미치는 이송배치 크기가 생산율에 미치는 영향을 분석하고 물류작업자의 물류처리 우선순위인 선입선출 규칙(FIFO)와 병목공정을 우선으로 처리하는 물류처리방식을 비교하였다.

분석결과에 따르면, 고장율 10%를 고려한 생산율 90%를 충족할 때, Product 1은 DBR 생산방식을, Product 2는 Kanban 생산방식을, Product 3은 Kanban 생산방식을, 그리고 Product 4는 DBR 생산방식을 사용할 때 고장율 10%를 고려한 생산율 90%를 충족하면서 Lead time과 WIP 기준으로 가장 적합한 생산방식으로 분석되었다. 평균적으로는 4가지 제품을 대상으로 Kanban 생산방식이 현재 생산방식인 Push 생산방식보다 가장 좋은 결과를 보여주었기 때문에 대상기업은 Kanban 생산방식이 최적의 생산방식으로 제안되었다.

또한, 시뮬레이션 실험 결과는 Kanban 생산방식에서는 생산율과 Lead time을 기준으로 각 제품들아 8, 8, 8, 12의 이송배치 크기를 사용할 때 가장 좋은 물류작업자의 가동율을 보여주었다. 그리고, 본 연구에서는 물류처리 방식이 생산율에 미치는 영향을 분석하기 위해 FIFO 방식과 병목공정 우선 할당방식을 비교분석하여 대상기업은 병목공정 우선 할당 방식이 대상기업의 공정개선에 더욱 더 좋은 영향을 미치는 것을 확인하였다.

본 연구는 시뮬레이션 분석을 통하여 대상기업인 I사가 현재 사용하고 있는 Push 생산방식보다는 Kanban 생산방식이 Lead time의 감소, 생산율 증가, 그리고 물류운반자의 가동율을 높이는 것을 알게 되었다. 그러므로 대상기업은 현재의 생산방식을 Kanban 생산방식으로의 전환이 필요함을 알게 되었다.

본 연구에서 고려한 사항들은 배치생산을 하는 산업군에 적용할 수 있으며 최근 제조업의 고도화로 인해 물류 이송의 중요성이 대두되고 있어 이송장비가 많이 사용되는 산업군에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 제안한 정책은 기계도입, 인력 고용과 같은 별도의 비용투자 없이도 재고 감축, 리드타임 단축, 생산율 향상에 중요한 역할을 할 것으로 기대되며 그에 따른 생산비용 절감에 의해서 기업이 경쟁력을 갖추는 데 도움을 줄 것으로 사료된다.

또한, 본 연구에서는 2공장, 3공장의 대표 제품만 고려하였지만, 현재 1공장에서 생산하고 있는 제품을 고려할 필요가 있기 때문에 향후 연구에는 1공장 제품까지 확장하여 1공장, 2공장, 3공장에 대한 새로운 운영방식에 대해 연구할 것이다.

Acknowledgement

This work(Grants No. S2897329) was supported by project for Cooperative R&D between Industry, Academy, and Research Institute funded Korea Ministry of SMEs and Startups in 20.

References

- [1] Kim, B.J., Kim, D.H., Lee, I.S., and Jun, C.S., A Study on a Smart Factory Layout Design based on TOC-DBR, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 2017, Vol. 43, No. 1, pp. 12-18.
- [2] Kim, J.M. and Kim, Y.M., A Decision of the Production Control Policy using Simulation in Zinc Manufacturing Process, *IE Interfaces*, 2008, Vol. 21, No. 4, pp. 418-434.
- [3] Kim, T.H., Na, S.H., Park, J.H., and Kang, K.S., A Study on Determining CONWIP System Model, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, 1998, Vol. 1, pp. 1-4.
- [4] Ko, S.G. and Kim, J.H., Implementation of DBR System with KANBAN in a Production Line of Static Demand, *IE Interfaces*, 2002, Vol. 15, No. 1, pp. 99-106.
- [5] Koh, S.G., Implementation of DBR System in a Serial

- Production Line with Three Stages, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2002, Vol. 28, No. 4, pp.3 44-350.
- [6] Lee, D.G. and Kim, W.J., DBR(Drum Buffer Rope)'s Buffer Control with Applied KANBAN System, *Proceedings of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering Fall Meeting*, 2004, pp. 314-316.
- [7] Lee, H. and Seo, D., Comparison of CONWIP with KANBAN in a Production Line with Constant Processing Times, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, 2011, Vol. 36, No.2, pp.51-65.
- [8] Lee, J.H. and Lee, J.H., The Development of the Optimal Manufacturing System Controlling Multiple Bottleneck Operation, *Proceedings of Society of Korea Industrial and System Engineering Fall Conference*, 2014, pp. 41-46.
- [9] Park, C.W., Lee, H.S., and Kim, C.G., Performance Evaluation of a Multi-Item Production System Operated by the CONWIP Control Mechanism, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineering*, 2002, Vol. 28, No. 1, pp. 1-13.
- [10] Park, S.G., Park, S.H., and Ha, C., Selection Method for Optimal Shop Floor Control According to Manufacturing Environment, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2013, Vol. 36, No. 2, pp. 81-90.
- [11] Park, S.K. and Ha, J.H., Performance Comparison between Material Flow Control Mechanism Using Simulation, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2012, Vol. 35, No. 1, pp. 115-123.
- [12] Quan, G.S. and Chang, B.Y., A Simulation Study on S-Button Factory Production System, *Journal of the Korean Society for Simulation*, 2014, Vol. 23, No. 4, pp. 229-235.
- [13] Shim, Y.S., Byeon, J.H., Hwang, S.H., and Jeon, T.B., Job Shop System Analysis through DBR Simulation, *Journal of Industrial Technology*, 2011, Vol. 31, No. B, pp. 51-58.
- [14] Yang, H.J., Jeong, S.K., and Yoon, S.W., An Application Method and Effect Analysis of the DBR(Drum-Buffer-Rope) Method under the Re-entrant Process, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 2020, Vol. 29, No. 1, pp. 57-69.
- [15] Yoshida, A. and Park, J.H., Development of an Effective Manufacturing Scheduling System for PCB Manufacturing Line Using Dual DBR Method, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2009, Vol. 10, No. 10, pp. 2935-2944.

ORCID

Wonju Ro | <http://orcid.org/0000-0002-8808-5592>

Jaehun Sim | <http://orcid.org/0000-0003-3519-8136>

<Appendix>

<Table A1> Experiment Results

Product	KPI	Comparisons of production systems															
		Push			KANBAN			CONWIP			DBR						
		Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.
Product 1	Lead Time	497.71	0.82989	495.44	499.46	65.76	0.16714	65.31	66.17	101.07	0.08005	100.91	101.25	65.28	0.15532	64.92	65.59
	WIP	473.57	0.70899	471.86	475.22	62.48	0.12194	62.16	62.76	96.00	0.00000	96.00	96.00	62.03	0.12147	61.79	62.30
	Production rate	0.90	0.00003	0.90	0.90	0.90	0.00004	0.90	0.90	0.90	0.00004	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90
Product 2	Lead Time	84.15	0.04268	84.05	84.23	18.60	0.00960	18.58	18.62	50.16	0.03823	50.03	50.20	25.40	0.01477	25.37	25.44
	WIP	107.40	0.01166	107.37	107.42	23.73	0.01122	23.71	23.75	64.00	0.00000	64.00	64.00	32.41	0.02681	32.36	32.50
	Production rate	0.90	0.00007	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90	0.90	0.00009	0.90	0.90	0.90	0.00009	0.90	0.90
Product 3	Lead Time	442.11	0.35839	441.49	443.08	73.10	0.04397	72.98	73.18	188.77	0.10468	188.53	188.97	84.91	0.07305	84.77	85.06
	WIP	300.11	0.17179	299.63	300.47	49.54	0.01504	49.51	49.58	128.00	0.00000	128.00	128.00	57.54	0.01942	57.48	57.57
	Production rate	0.90	0.00008	0.90	0.90	0.90	0.00003	0.90	0.90	0.90	0.00007	0.90	0.90	0.90	0.00007	0.90	0.90
Product 4	Lead Time	707.62	0.59372	706.56	709.01	318.03	0.52545	317.08	318.98	425.27	0.29273	424.55	425.74	317.86	0.57166	316.70	318.90
	WIP	640.34	0.40151	639.32	641.27	287.28	0.37428	286.39	287.93	384.00	0.00000	384.00	384.00	287.16	0.34049	286.48	287.79
	Production rate	0.90	0.00003	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90	0.90	0.00004	0.90	0.90

Product	KPI	Logistics moving unit															
		Moving unit size 4			Moving unit size 8			Moving unit size 12			Moving unit size 24						
		Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.
Product 1	Production rate	0.74	0.00041	0.74	0.74	0.90	0.00004	0.90	0.90	0.90	0.00000	0.90	0.90	0.90	0.00000	0.90	0.90
	Logistic work's utilization rate	0.92	0.00007	0.92	0.93	0.64	0.00030	0.63	0.64	0.64	0.00000	0.63	0.64	0.64	0.00000	0.63	0.64
Product 2	Production rate	0.57	0.00043	0.57	0.57	0.90	0.00005	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90
	Logistic work's utilization rate	0.92	0.00007	0.92	0.93	0.64	0.00030	0.63	0.64	0.64	0.00000	0.63	0.64	0.64	0.00000	0.63	0.64
Product 3	Production rate	0.89	0.00039	0.89	0.89	0.90	0.00003	0.90	0.90	0.90	0.00003	0.90	0.90	0.90	0.00003	0.90	0.90
	Logistic work's utilization rate	0.91	0.00038	0.91	0.91	0.46	0.00020	0.46	0.46	0.46	0.00000	0.46	0.46	0.46	0.00000	0.46	0.46
Product 4	Production rate	0.90	0.00006	0.90	0.90	0.90	0.00006	0.90	0.90	0.90	0.00006	0.90	0.90	0.90	0.00005	0.90	0.90
	Logistic work's utilization rate	0.91	0.00038	0.91	0.91	0.91	0.00038	0.91	0.91	0.91	0.00038	0.91	0.91	0.91	0.00020	0.46	0.46

Product	KPI	Logistics processing priority											
		FIFO			Bottleneck								
		Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.	Aver.	Half Width	Min.	Max.
Product 1	Lead Time	22.28	0.03615	22.23	22.36	18.66	0.03102	18.61	18.75	18.66	0.03102	18.61	18.75
	WIP	14.40	0.02453	14.35	14.45	11.74	0.02464	11.69	11.79	11.74	0.02464	11.69	11.79
	Production rate	0.61	0.00037	0.61	0.61	0.60	0.00065	0.60	0.60	0.60	0.00065	0.60	0.60
Product 2	Logistic work's utilization rate	0.82	0.00017	0.82	0.82	0.82	0.00034	0.82	0.82	0.82	0.00034	0.82	0.82
	Lead Time	9.58	0.00649	9.57	9.60	78.49	0.28800	77.85	79.35	78.49	0.28800	77.85	79.35
	WIP	7.42	0.00296	7.42	7.43	60.01	0.20109	59.55	60.59	60.01	0.20109	59.55	60.59
Product 3	Production rate	0.55	0.00041	0.55	0.55	0.76	0.00024	0.76	0.77	0.76	0.00024	0.76	0.77
	Logistic work's utilization rate	0.82	0.00017	0.82	0.82	0.70	0.00030	0.69	0.70	0.70	0.00030	0.69	0.70
	Lead Time	27.80	0.02219	27.76	27.84	27.68	0.01932	27.62	27.73	27.68	0.01932	27.62	27.73
Product 4	WIP	13.54	0.01053	13.51	13.56	14.51	0.01199	14.48	14.53	14.51	0.01199	14.48	14.53
	Production rate	0.65	0.00046	0.65	0.65	0.70	0.00041	0.70	0.70	0.70	0.00041	0.70	0.70
	Logistic work's utilization rate	0.70	0.00030	0.69	0.70	0.74	0.00041	0.74	0.74	0.74	0.00041	0.74	0.74
Product 4	Lead Time	78.49	0.28800	77.85	79.35	67.11	0.44182	66.10	68.26	67.11	0.44182	66.10	68.26
	WIP	60.01	0.20109	59.55	60.59	53.08	0.36432	52.15	54.02	53.08	0.36432	52.15	54.02
	Production rate	0.76	0.00024	0.76	0.77	0.79	0.00075	0.79	0.79	0.79	0.00075	0.79	0.79
Product 4	Logistic work's utilization rate	0.70	0.00030	0.69	0.70	0.74	0.00041	0.74	0.74	0.74	0.00041	0.74	0.74