

시뮬레이션을 이용한 아연공장의 생산통제 방안의 결정

김준모¹ · 김연민^{2*}

¹울산대학교 자동차 선박 기술 대학원 생산기술 전공 / ²울산대학교 산업정보경영공학부

A Decision of the Production Control Policy using Simulation in Zinc Manufacturing Process

Jun Mo Kim¹ · Yearn Min Kim²

¹Institute of e-Vehicle Technology, University of Ulsan, PhD Candidate

²Department of Industrial Engineering, University of Ulsan, Professor

This paper studied issues in decision making on the production control policy of a cathode plate manufacturing process in zinc refining plant. The present production system has a long lead time from raw materials (aluminum plate) to products (cathode plate) due to many WIP inventories. Because WIP inventories are stocked at each process and moved from one place to another frequently, they are the main cause of inefficiency in the process.

In this paper, to solve this problem, several production control policies have been identified and studied. Several simulation models are used to compare the performances of these production control policies. The output lead time and WIP (Work In Process) of real production system are compared with those of simulation models. PUSH, CONWIP, DBR, KANBAN and CONWIP-DBR models have been used to simulate and review the optimized production control policy that achieves the target output quantities with decreased lead time and WIP.

The simulation results of each production control policy show that CONWIP and CONWIP-DBR models are the good production control policy under the present production system. Especially in present production system, CONWIP with one parameter is easier control policy than CONWIP-DBR with two parameters. Therefore CONWIP has been selected as the best optimum production control policy. With CONWIP, lead time has been reduced by 97% (from 6,653 to 187 minute) and WIP has been reduced from 1,488 to 53, compared to the present system.

Keyword: production control policy, CONWIP, KANBAN, DBR, simulation

1. 서론

1.1 연구 목적

캐소드 플레이트(cathode plate) 공정은 다음과 같다. 전해

공장에서는 전해조 내에 음극(Cathode)과 양극(Anode)이 배열되어 있다. 전해액은 황산아연용액이다. 이 전해액을 전기분해 하면 음극(Cathode)에 아연이 전착된다. 음극(cathode)에 전착된 아연을 박리하여 아연판은 제품으로 회수하고 아연이 벗겨진 음극(cathode)은 다시 전해조로 들어가서 전

*연락처 : 김연민 교수, 680-749 울산시 남구 무거동 산 29 울산대학교 산업정보경영공학부, Fax : 052-259-2180,

E-mail : ymkim@mail.ulsan.ac.kr

투고일(2008년 04월 18일), 심사일(1차 : 2008년 07월 07일), 게재확정일(2008년 10월 15일).

기분해에 의해 아연을 전착시킨다. 이러한 과정을 되풀이 하면 음극(cathode)은 오래 사용될 수가 없어 주기적으로 교체해 주어야 한다. 이 음극(cathode)을 생산하는 공정이 캐소드 플레이트(cathode plate) 공정이다.

현재의 캐소드 플레이트(cathode plate) 공정은 설비능력에 비하여 낮은 산출량과 긴 리드 타임, 그리고 많은 재공품을 가지고 있다. 불합리한 설비배치와 생산통제 방식으로 불필요한 이동이 빈발하고 있다. 또한 많은 재공품 탓으로 인해 공장 내 공간 활용이 비효율적이고, 장기 보관에 따른 품질불량이 초래되고 있다. 또 고객 수요에 생산량을 맞추지 못하여 초과작업시간이 소요되어 인건비 낭비가 발생하고 있다.

개선방안으로서는 새롭게 배치한 생산 시스템을 제시하고, 그 생산 시스템을 운영하기 위한 최적의 생산통제 방식을 찾기 위해서 다양한 생산통제 방식을 비교하기로 하였다. Push, Kanban, DBR, CONWIP 및 CONWIP-DBR 방식으로 운영하였을 경우 산출량, 리드 타임, WIP 등이 어떻게 변하는 지를 알아보고, 그 가운데 가장 효율적 방안을 이용하여 공정을 개선하기로 한다.

이렇게 하기 위해서 새롭게 설계한 생산 시스템을 모델링한 후, 컴퓨터 시물레이션을 통해 여러 변수를 변경하여 가장 나은 생산통제방안을 도출하였다. 시물레이션을 통한 생산시스템 해석과 평가는 생산관리자로 하여금 생산현장의 문제점을 객관적으로 파악하게 하며, 생산 운영의 초점이 무엇인지 보다 정확하게 인지할 수 있도록 하고, 무엇보다도 개선방안에 대한 충분한 검토와 성과예측이 가능하게 한다. 또 시물레이션을 활용하게 되면 문제해결 과정에서 복잡한 수학적 계산에서 벗어나고, 오랜 경험에서 나오는 직관을 용이하게 구현해 볼 수 있다.

1.2 연구 범위 및 방법

아연 제련소는 물리 화학적 반응을 중심으로 배소 → 조액 → 정액 → 전해 → 주조를 거치는 일괄적인 흐름 공정이다. <그림 1>은 아연제련소 공정흐름도이다.

본 논문은 캐소드 플레이트(cathode plate) 제작공정을 개선대상으로 하였다. 캐소드 플레이트(cathode plate) 제작공정은 전해 공정에서 사용되는 양극판(cathode plate)을 제작하는 공정으로 가공 제작 공정이고, 공정의 흐름은 단속적인 흐름생산이다. 여기서 가공된 캐소드 플레이트(cathode plate)는 주 공정인 전해 공정에서 아연 전착에 사용된다. 이 공정은 가공품의 이동이 복잡하여 리드 타임이 길고, 재공품 재고가 많음에도 산출량은 부족하여 개선의 필요성이 시급하였다. 이 공정은 아래와 같은 특징을 지닌다.

- ① 생산에 관련된 데이터를 얻기가 쉽다.
- ② 단계별 가공과정, 재공품의 정체, 대기 행렬 등을 눈으로 확인할 수 있다.
- ③ 복잡하지 않아 다양한 생산 시스템을 적용하기가 용이하다.

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 현재 운영되고 있는 캐소드 플레이트(cathode plate) 제작 공장의 생산량, 설비 별 가동시간, 가공작업시간, 운반시간, 고장시간, 수리시간 등의 데이터를 수집하였다. 데이터 작성 양식을 만들어 현장 작업자의 협조로 기초 데이터를 정확하게 수집하는데 많은 노력을 기울였다. 제 2장 생산통제 방식을 설명하였다. 제 3장 생산 시스템의 모델링 및 시물레이션 비교에서는 캐소드 플레이트(cathode plate) 생산현장에서 얻어진 기초 데이

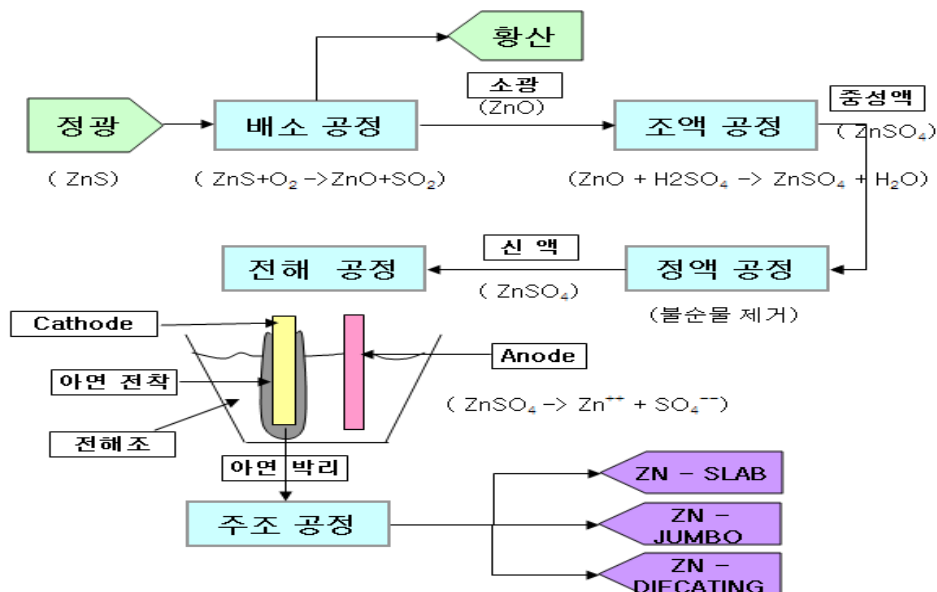


그림 1. 아연제련소의 공정흐름도

터를 근거로 개선 후의 모습인 TO BE 모델을 모델링 하고, 생산관련 매개 변수를 변화시켜 각 생산통제 모델의 시물레이션 결과 값을 분석하였다.

2. 생산통제 방식

2.1 Push, Kanban, DBR, CONWIP 생산통제 방식의 특징

최근의 생산 환경은 대량생산방식 보다 다품종소량생산 방식이 요구되고 있다. 이에 따라 생산운영의 핵심적인 요소는 원가와 함께 신속성, 유연성이 추가되었다. 고객의 다양한 욕구와 수요 변화에 생산 시스템이 어떻게 대응하느냐가 경쟁력의 핵심이 된 것이다. Push 시스템에서 Pull 시스템으로 변화가 그것이다.

전통적인 Push 생산 시스템은 20세기 초 포드자동차에서 컨베이어 라인을 도입하면서 시작되었다. 단순화, 표준화, 전문화를 통해 생산효율을 높였다. 그 후 Push 생산 시스템은 MRP(Material Requirement Planning)로 발전하여 1970년대 까지 생산 시스템의 지배적인 영역을 구축하였다.

<그림 2>는 Push 시스템을 나타낸 것이다. Push 시스템은 미래의 수요를 예측하여 생산계획을 수립하기 때문에 생산의 효율성은 가져올 수 있으며 차질 없는 계획수행이 가능하다. 변경이 잦은 대일정계획(MPS Master Production Schedule)도 수용할 수 있다. 그러나 준비시간 등으로 인해 경제적 발주량 개념으로 로트를 운영하며, 조달기간 중의 재고를 유지해야 하므로 재고가 많다. 주어진 산출량을 위해서는 재공품 재고(WIP Work In Process)가 많고 사이클 타임의 변동성이 커서 긴 리드타임이 필요하다. 또 컴퓨터를 이용한 정보 시스템을 이용할 때 변동 상황을 정확하게 입력해야 하는데 현실적으로 어려움이 많다(Hopp and Mark, 2005).

- KANBAN 생산방식은 1970년대 중반 도요다 자동차에서 처음으로 도입되어 발전하여 왔다.

<그림 3>은 KANBAN 시스템을 나타낸 것이다. JIT(Just In Time 시간) 방식은 필요한 물건을 필요한 때, 필요한 양만큼 공급한다는 Pull 생산방식이다. 고객 수요변화에 신속하고 유연하게 대응하며 각종 낭비제거를 목적으로 원자재, 재공품, 및 제품의 재고 수준을 축소하였다. ‘한 개 흘리기’를 통해 불량을 없애고 생산리드타임을 단축하였다. 그러나 KANBAN 방식은 시스템의 변동요인을 제거하고 흐름 생산으로 만드는 것이 용이하지 않다. 적용 가능한 생산시스템은 변동이 적고 반복적인 제조환경에 적합하다. 공급자가 부품을 제대로 공급하지 못할 때 전체 생산 시스템이 중단될 우려가 있으며, 각 공정마다 각기 다른 KANBAN개수를 사용하여 많은 량의 매개변수를 관리하기가 어렵고, 작업자에게는 많은 스트레스를 준다(Black and Steve, 2003; Hopp and Mark, 2005).

- DBR(Drum-Buffer-Rope) 방식은 제약이론의 창시자인 Eli Goldratt의 OPT(Optimized Production Technology) 소프트웨어의 핵심원리를 체계화한 것이다.

<그림 4>는 DBR 시스템을 나타낸 것이다. 이 시스템은 공정을 병목공정과 비 병목공정으로 나누어 병목공정을 중심으로 생산을 통제하는 것이다. 생산의 효율보다는 흐름을 중심으로 병목공정에 드럼을 설치하고, 전 공정의 생산 흐름은 드럼의 속도박자에 생산속도를 맞추도록 하였다. 일정계획은 병목공정을 중심으로 수립하여 병목공정 보다 앞선 공정의 기계고장 때문에 병목공정에 부품공급이 중단되는 일이 발생하지 않도록 버퍼를 설치하여 병목공정을 보호한다. 병목공정에서 빠져나가는 것을 보고 로프로 연결하여 원료를 투입하는 것이다. 생산 로트와 이동 로트 크기는 가변적으로 운영하고 병목공정의 처리능력 향상에 생

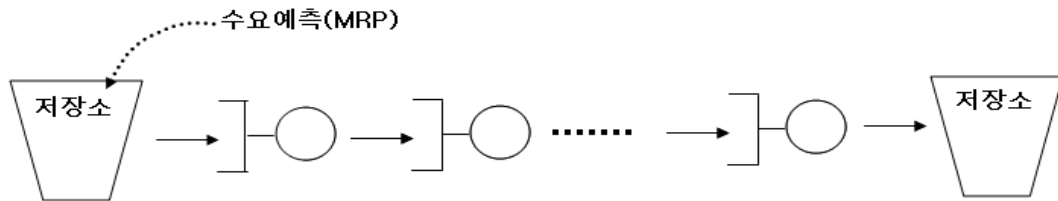


그림 2. Push 시스템

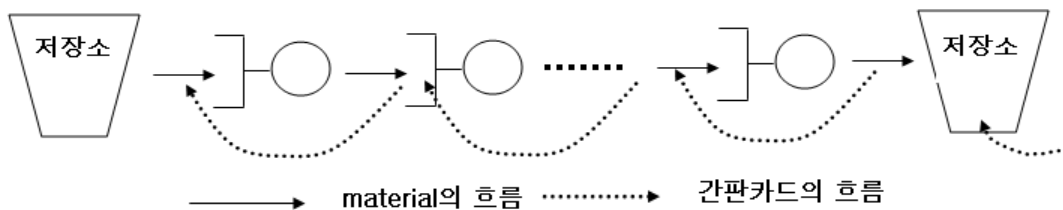


그림 3. KANBAN 시스템

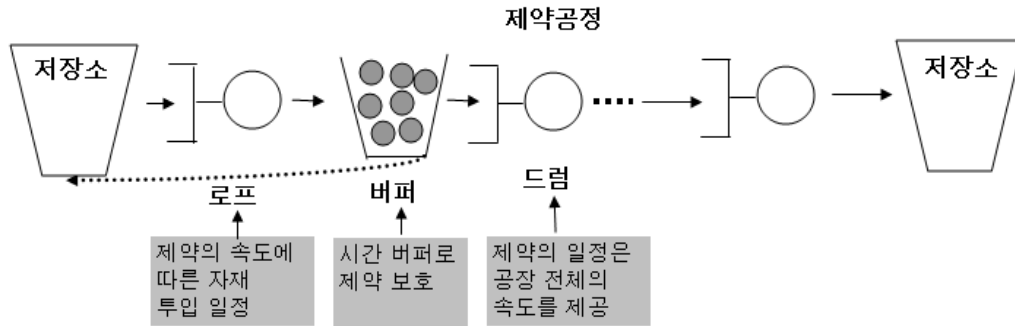


그림 4. DBR 시스템

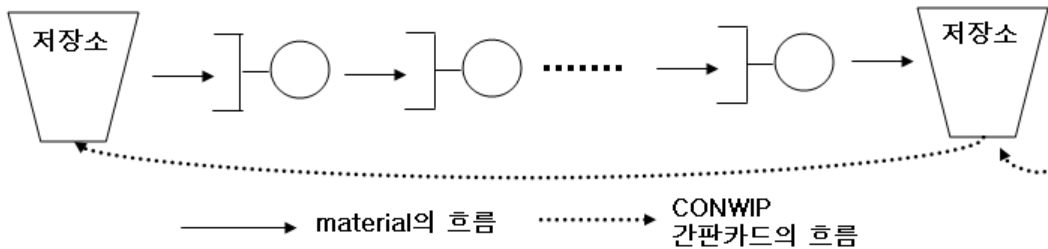


그림 5. CONWIP 시스템

산운영의 초점을 맞춘다(MOKSHAGUNDAML, 2005).

- CONWIP(CONstant Work In Process)은 Hopp(2000)에 의해 연구되었다.

<그림 5>는 CONWIP(CONstant Work In Process) 시스템을 나타낸 것이다. 전 공정에 하나의 카드만 사용하는 생산 통제 방식으로 통제가 아주 쉽다. 전체 공정의 재고는 WIP에 의해 제어되므로 재고가 통제되고 또 생산리드타임이 짧은다는 점에서는 KANBAN과 비슷하다. KANBAN은 생산량이 안정되고 반복제조환경에 적합하지만 CONWIP은 각 공장에서 생산준비기간이 비교적 큰 경우에도 적용이 가능하다. 주어진 산출량을 위해서 필요한 WIP가 적으므로 효율성이 높다. 고객 만족도 측면에서도 우수한 시스템이다. 또 WIP는 관찰가능성이 쉬우므로 통제하기가 용이하다. 변동성에 대해 대응이 용이하고 WIP의 변화에 대해 산출량의 변화가 안정적(Robustness)이다. CONWIP은 DBR에 비하여 제품별로 다른 병목을 가지고 있는 제품믹스혼합에 우수하다(Hopp and Mark, 2005).

2.2 Hybrid 생산통제 방식의 특징

- PUSH, KANBAN, DBR, CONWIP은 각각의 장단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해서 다양한 Hybrid 생산시스템이 연구되어 왔다.

Karin(2005) Extended CONWIP-KANBAN 시스템(ECK)의 통제 및 성과를 연구하였다. KANBAN, CONWIP, BASE STOCK을 기본으로 해서 Hybrid 시스템인 Generalized Kanban(GK),

Extended Kanban(EK), CONWIP Kanban, 더 나아가 Extended CONWIP-KANBAN 시스템(ECK)의 개념을 도입하여 그 성과를 평가하였다.

GK와 EK는 KANBAN과 BASE STOCK을 결합한 시스템으로 간판에 의해서 WIP 한계를 통제하고 BASE STOCK에 의해서 버퍼역할을 수행하여 설비고장 등의 변동에 대비하고 있다.

- EK와 GK의 차이는

- ① EK는 간판과 부품이 함께 움직이지만 GK는 가공 완료된 부품에는 간판이 없다.
- ② EK는 수요가 간판의 흐름과 관계없고, GK는 수요가 간판의 흐름과 일치한다.
- ③ EK는 각 단계에서 K_i (Kanban 수)가 S_i (Base stock 수)보다 커야 하지만 GK는 제한이 없다.

<그림 6>과 같이 Extended CONWIP-KANBAN 시스템(ECK)은 3개의 파라미터가 있다. 각 단계에는 K_i (Kanban 수)와 S_i (Base stock level)가 있고, 전 단계에 걸쳐 C (Total wip)가 있다. EK에 CONWIP을 결합하여 더욱 강력하게 WIP를 통제한다. 시물레이션 결과는 ECK가 프로세스 변동이나 수요 변동에 대응해서 가장 낮은 WIP를 가지고 가장 높은 서비스수준을 달성할 수 있었다. 또 수요변동에 대해 안정적(Robust)이며 비용이 가장 낮음을 증명하였다(Karin, 2005).

2.3 각 생산통제 방식의 시물레이션 결과

각 생산통제 방식의 시물레이션 결과를 비교한 연구는 다

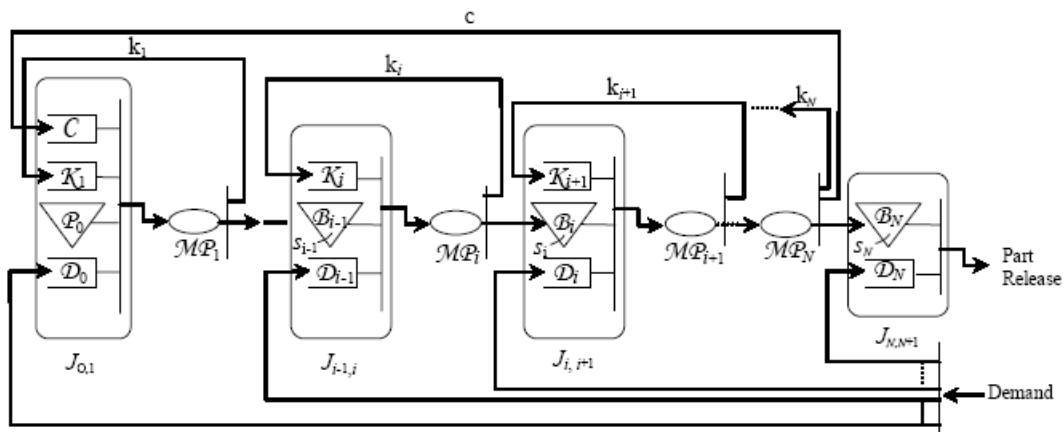


그림 6. CK 시스템 모델(Kelton *et al.*, 2006)

음과 같다. 다음은 시뮬레이션 결과를 비교한 논문들이다.

Marek *et al.*(2001)은 KANBAN과 CONWIP 시스템을 비교하였다. KANBAN과 CONWIP 모두 WIP를 통제함으로써 재료투입량을 제한하여 손실을 줄이고 사이클 타임과 리드 타임의 변동성을 줄일 수 있는 이점이 있다. KANBAN은 생산량과 제품 혼합에서 변동성이 크지 않는 공정, 반복생산 제조환경에 적합하다. 이에 비해 CONWIP은 제품 혼합에 따라 병목이 변하는 제조환경에서도 탄력성을 받는다. 그렇다고 모든 제조공정을 KANBAN이나 CONWIP으로 변경하는 것은 몇 가지 사항을 고려해야 한다고 한다. 고려사항은 디자인 변경횟수, 현 시스템을 Pull시스템으로 바꾸었을 때의 경제적 비용, 리드 타임의 단축가능성, 공급자들의 신뢰성 등이다(Marek *et al.*, 2001).

- Wendell G. Gilland (2002)는 CONWIP과 DBR을 비교하였다.

최소의 WIP로 최대의 산출량을 산출하는 것을 목적으로 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 KANBAN과 CONWIP의 비교에서는 CONWIP이 KANBAN보다 우수하다고 하였고 KANBAN의 경우 최적 관란 수를 찾기 위해서 많은 시뮬레이션이 필요하였다. 또 CONWIP과 DBR은 서로 비슷한 성과를 보이고 있지만, 단일 병목 시스템에서는 DBR이 CONWIP보다 우수하고, 특히 병목의 위치가 시작위치로 바뀔 때마다 DBR이 더욱 큰 이점이 있었다. 그러나 다 병목 시스템이나, 병목과 비 병목의 능력차이가 2% 이내이면 CONWIP이 DBR을 능가한다고 하였다(Gilland, 2002).

- John *et al.*(2004)는 Hybrid Push/Pull과 CONWIP/Pull을 비교하였다.

Hybrid Push/Pull은 어떤 공정을 중심으로 상위 공정은 Push 시스템으로, 하위 공정은 Pull 시스템으로 운영되었다. CONWIP/Pull은 각 단계는 KANBAN으로, 전체는 CONWIP으로 운영되는 시스템이다. 시뮬레이션 결과는 서비스율과 WIP 등 어떤 조건에서도 같은 결과를 가져왔다. 즉 최적의

Hybrid Push/Pull 전략은 CONWIP/Pull과 마찬가지로 안전재고와 재고 수준면에서 차이가 없다는 것이다(John *et al.*, 2004).

Massimo *et al.*(2005)는 Kanban, CONWIP, Hybrid (CONWIP + Kanban)을 비교하였다. Hybrid 시스템이 Kanban, CONWIP에 비해 서비스율, WIP, 리드 타임, 버퍼 크기 등에서 성과가 높다. 또 병목 공정에서 고장이 발생했을 때 병목 공정 앞에 KANBAN break 카드를 도입하면 카드가 없어도 앞 공정에서 계속 생산하여(break 카드 수만큼) 병목공정이 정상운전이 될 때 보다 많은 산출량을 얻을 수 있다. 병목 공정에서 고장이 발생할 때, 뒤 공정의 작업자에게 작업 제한당을 실시하면 어느 경우이든 효과가 높다는 것을 보이고 있다. CONWIP은 변동이 심한 경우라도 산출량에 덜 민감하고 안정적인 결과를 보인다고 하였다(Massimo *et al.*, 2005).

- Qichao *et al.*(2004)은 생산 시스템의 투입변수의 변화에 따른 출력 요소의 영향을 분석하였다.

투입변수는 도착형태, 배치정책(batch policy), 고장시간 형태이고, 출력변수는 사이클 타임, 재공품재고, 산출량, 가동률이다. 입력변수의 변화에 따른 출력요소의 변동성을 살펴보면 도착형태는 포아송(poisson)분포, 정규분포, 램덤분포에 비하여 일양분포가 가장 양호하며, 배치크기는 작을 때가 우수하며, 고장시간 형태는 주기가 길고 긴 수리시간의 예방정비 보다는 주기가 짧고 소요시간이 짧은 예방정비가 보다 효과적이었다. 그러나 어떠한 경우보다도 CONWIP이 입력변수의 변동에 관계없이 가장 우수한 성과를 보이고 있음을 밝혔다(Qichao *et al.*, 2004).

그러나 아직 까지 진행된 연구에서 CONWIP-DBR Hybrid 시스템을 다른 생산통제 방식과 비교한 연구는 없었다. 따라서 제 3장 생산 시스템의 모델링 및 시뮬레이션 비교에서는 이 시스템이 다른 생산 통제 방식에 비해 어떻게 다른지를 살펴보고자 한다.

3. 생산시스템의 모델링 및 시물레이션 비교

3.1 현 캐소드 플레이트(cathode plate) 생산 시스템

(1) 공정 설명

연구 분석 대상은 아연제련소 내 캐소드 플레이트를 제작하는 공장이다. 주 공정은 원료인 알루미늄 판이 들어와서 펀칭 공정 → 용접 공정 → 사출 공정을 거쳐 완성된다. 이 완성된 판은 아연제련소 내 전해 공정에 투입된다. 용접 공정은 자동용접기와 수동용접기 두 개의 설비로 이루어져 있고 나머지 펀칭기와 사출기는 단독설비로 운영된다. 이 공정은 네 사람이 투입되어 각자 하나의 설비를 운전하고 있으며 운반 및 적치는 네 사람 중 한 사람이 담당한다.

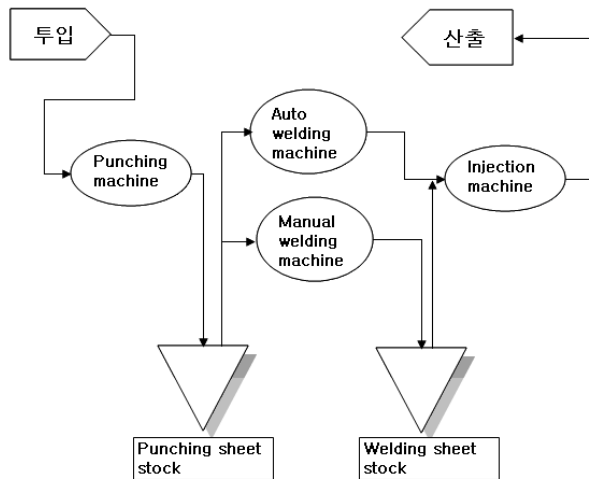


그림 7. 현 생산시스템의 공정 흐름도

공정흐름은 <그림 7>과 같다. 펀칭 완료된 알루미늄 판은 공장 내 별도의 공간에 저장되었다가 자동, 수동 용접기로 이동한다. 자동 용접기에서 나온 용접된 시트는 컨베이어에 의해 사출공정으로 이동되나, 수동 용접기에서 나온 용접된 시트는 별도의 공간에서 보관하다가 사출기 컨베이어에 빈 공간이 생기면 하나씩 사람의 힘으로 옮긴다. 이 과정에서 작업장 내 재공품의 이동이 빈번하게 일어나고 비좁은 작업공간에 재공품이 적치되어 공간 활용이 어려워진다.

이로 인해 재공품 이동에 소요시간이 많이 걸리고 또 보관 중 손상이 발생하여 불량품이 늘어나고 수작업으로 인해 소요공수도 늘어난다.

(2) 공정 데이터 분석

각 공정 별 작업시간의 분포를 알아보기 위해 각각 100개 이상의 데이터를 취득하였다. 다음 <표 1>은 공정 별 작업시간의 분포함수이다. 펀칭 공정은 사람이 원재료를 투입하고 난 다음은 자동으로 순서에 따라 펀칭이 이루어지기 때문에 작업시간은 일정하다.

표 1. 공정 별 작업시간의 분포함수

공정명	분포함수	Expression (분)	평균 작업시간
펀칭공정	Constant	2.625	2.625
자동용접공정	Lognormal	3 + LOGN (2.29, 1.26)	5.27
수동용접공정	Erlang	6 + ERLA (0.241, 10)	8.41
사출공정	Beta	2+2.64*BETA (6.95, 5.15)	3.52

설비 별 고장 데이터를 얻기 위해 고장이력을 정리하여 <표 2>의 결과를 얻었다. 가용도(Availability)는 아래와 같이 정의한다.

$$\text{가용도(Availability)} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

표 2. 설비 별 고장함수

설비명	MTBF(hour)	MTTR(hour)	가용도(Availability)
펀칭기	EXP(9.05)	EXP(2.58)	77.8%
자동용접기	EXP(0.69)	EXP(0.07)	90.8%
수동용접기	EXP(2.36)	EXP(0.29)	89.1%
사출기	EXP(127.33)	EXP(2.3)	98.2%

생산량과 작업시간의 데이터를 얻기 위해서 2007년 2월~4월의 생산실적을 활용하여 <표 3>의 결과를 얻었다.

표 3. 설비 별 생산량

설비명	생산량	작업시간	시간당생산량	생산량(400Hr)
펀칭기	12,882	920	14.00	5,600
자동용접기	8,594	904	9.50	3,800
수동용접기	4,594	800	5.74	2,296
사출기	13,480	1,004	13.42	5,368

<표 3>의 400시간 생산량은 시물레이션 가동시간 400시간과 비교하기 위해서 계산한 값이다. 2007년 2월~4월의 재고현황을 살펴보면, 펀칭 된 제품은 800개, 용접 된 제품은 400개를 안전재고로 가지고 있다. 변동 폭은 펀칭 제품은 800~1200개, 용접 제품은 400~700개이다. 평균 재고는 펀칭이 950개, 용접이 538개이다.

(3) 성과 분석

현 공정의 실제 성과를 분석해 보면
공정 중 재고는 펀칭재고 및 용접재고의 합으로

$$\text{공정 중 재고 WIP} = 950 + 538 = 1,488\text{이며,}$$

산출량은 최종 공정인 사출기에서 생산된 량이므로,

$$\text{산출량 TH} = 13.42 \text{ 개/시간}$$

사이클 타임을 구하기 위해서는 원료투입에서 제품완료 까지 각 제품의 공정 내 머무르는 시간을 측정해야 하나, 공정에서 데이터를 얻기가 쉽지 않아 Little의 법칙을 이용하였다.

Little의 법칙에 의해 사이클 타임 CT를 구해보면

$$\begin{aligned} \text{WIP} &= \text{TH} \times \text{CT} \text{에서 } \text{CT} = \text{WIP} / \text{TH} = 110.88 \text{ 시간} \\ &= 6,653 \text{ 분이다.} \end{aligned}$$

<표 4>의 산출량은 사이클 타임에서 구한 이론 산출량과 고장을 고려한 산출량을 표시한 것이다. 실제의 산출량은 고장을 고려해서 구해야 한다.

원 작업시간 T_0 를 구하면

$$T_0 = 2.625 + (5.27 + 8.41) / 2 + 3.52 = 12.985 \text{ 분}$$

병목 산출량 r_b 는 병목이 고장을 고려할 경우에는 용접공정 이므로

$$r_b = 16.69 \text{ 개/시간} = 0.278 \text{ 개/분}$$

임계 WIP w_0 는 최소의 CT (T_0)을 가지고 최대의 산출량 (r_b)를 얻는 WIP 수준을 말하는 것으로

$$w_0 = T_0 \times r_b = 12.985 \times 0.278 = 3.61 \text{ 개이다.}$$

현실적 최악의 경우(Practical worst case)는 최대의 무작위성을 가지는 경우이다. 실제 생산 시스템이 현실적 최악의 경우보다 나쁜 형태를 보일 경우 그 시스템은 개선의 대상이 된다. 주어진 WIP 재고수준 w 에서 현실적 최악의 경우 사이클 타임은 다음과 같다(John *et al.*, 2004, p.262).

$$\begin{aligned} \text{CT}_{\text{pwc}} &= T_0 + (w - 1) / r_b \\ &= 12.985 + (1488 - 1) / 0.278 \\ &= 5,362 \text{ 분} \end{aligned}$$

현 공장의 사이클 타임은 6,653분으로, 현실적 최악의 사이클 타임 5,362분보다 훨씬 나쁜 상태이다. 그러므로 현 공

정은 개선이 시급한 공정이다.

3.2 개선 후 생산시스템

현재의 생산시스템은 두 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫 번째는 작업장 내 재공품의 이동으로 인한 혼잡과 불필요한 이동시간이 전체의 산출량을 감소시키는 것이고, 두 번째는 재공품이 많아서 리드 타임이 길어진다는 점이다. 불필요한 이동시간을 줄이기 위해서 공장의 레이아웃 변경을 검토해 보았다.

아래 <그림 8>은 개선방안이다. 개선 전에는 펀칭기에서 나온 가공품을 별도의 공간에 보관하고 필요할 경우 용접기로 운반하였는데 개선 후에는 별도의 공간에 보관하지 않고 용접기 앞에 보관하여 이동시간을 없애는 것이고, 또 수동 용접기에서 가공된 가공품은 수작업이 아니라 컨베이어 락을 설치하여 자동으로 적치하도록 한다. 개선 전 단속적인 공정이었던 것이 개선 후에는 연속된 흐름생산이 가능하도록 각 공정을 연결한다. 필요한 공간크기는 여러 가지 생산통제방식으로 시뮬레이션 한 후 결정하기로 한다. 이렇게 함으로써 불필요한 이동이나 수작업으로 인해 발생하는 시간낭비를 줄일 수 있다.

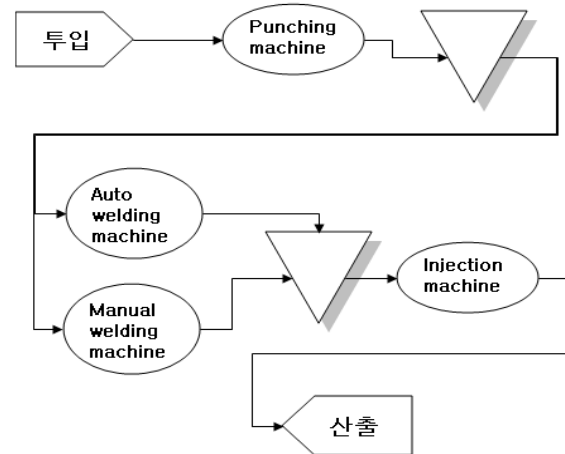


그림 8. 개선 후 생산시스템의 공정 흐름도

재고를 줄이고 제조 리드 타임을 단축하기 위한 다양한 생산통제 방식을 다음 장에서 검토하기로 한다. PUSH,

표 4. 각 설비별 고장을 고려한 이론 산출량

설비명	사이클 타임(시간)	가용도	사이클 타임에서 구한 산출량(개/시간)	고장을 고려한 산출량(개/시간)
펀칭기	2.625	77.8%	22.86	17.78
자동용접기	5.27	90.8%	11.39	10.34
수동용접기	8.41	89.1%	7.13	6.35
사출기	3.52	98.2%	17.05	16.74

CONWIP, KANBAN, DBR, CONWIP-DBR 등의 생산통제 방식을 검토하여 최적의 생산통제 방식을 결정한다. 그렇게 함으로써 현재의 재공품 재고(1488개)와 리드타임(6653분)을 대폭 단축하여 생산시스템의 성과를 높이고자 한다.

3.3 생산통제 방식에 따른 모델링과 시물레이션

(1) 모델링 및 시물레이션 기준 설정
 모델 작성 시 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 시스템은 single part를 생산한다.
- ② 설비의 set up 시간은 없다.
- ③ 정보는 즉시 흐른다.
- ④ 최종 제품에 대한 고객 수요는 무한하다. 즉 최종제품에 대한 재고는 무시한다.

시물레이션 시 반복 수(n), run 시간(r), warm up 시간(w) 등을 결정하기 위해서는 Arena 통계처리 결과에서 산출된 half width(d) 값을 활용한다. Arena에서는 95% 신뢰구간의 폭으로 half width (d)를 사용하고 있다.

측정값이 평균값(μ) \pm 오차한계(d) 범위 내에서 신뢰도 95%가 되기 위해서 d 값은 다음과 같다.

$$d = t(n-1, \alpha) * s / \sqrt{n}$$

t: t 분포 값이다. 자유도는 n-1이고, 신뢰도 α 는 95%이다.

s: 표준편차

n: 반복수

오차한계 d 값을 작게 하려면 표준편차(s)를 작게 하든지

반복수(n)를 크게 하면 된다. 표준편차를 작게 하려면 run 시간과 warm up 시간을 조절하면 가능하다. 오차한계 값을 얼마로 설정하느냐에 따라 반복수, run 시간, warm up 시간이 달라진다.

신뢰도 95%의 오차한계를 평균값의 2%이내로 설정하였다. 오차한계를 2%로 설정한 이유는 현 공정의 일일 산출량이 120개 정도로 오차변동에 대응하기 위해서 하루의 여유면 충분하므로 목표산출량 6,000개의 2% 수준이면 타당하기 때문이다. 산출량 및 리드 타임의 오차한계가 2%이내가 될 수 있도록 반복수, run 시간, warm up 시간을 설정하기 위해 다음과 같이 시물레이션 실험을 하였다.

실험은 CONWIP 모델을 사용하였고 CONWIP 카드 수는 50을 기준으로 시물레이션을 실시하였다. 이 방법으로 반복수, 가동시간, warm up 시간을 설정을 설정한 이유는 여러 생산통제 방식 중에서 염두에 두고 있는 생산 방식이 CONWIP이기 때문이고, 사전 시험 시물레이션 시 카드 수 50부근에서 변동폭이 크므로 거동상태를 살펴보는 데 유리한 조건이 되기 때문이다.

반복수, 가동시간, warm up 시간을 변화 시키며 오차한계를 조사한 결과 결론적으로 반복수 30회, run 시간 410시간, warm up 시간 10시간을 결정기준으로 모든 시물레이션 실시하였다.

(2) 다양한 생산통제 방식에 따른 시물레이션 모델

① PUSH 모델

<그림 9>는 Push 모델의 흐름도이다. 현 생산시스템은 재공품이 증가하면 앞 공정에서 원료투입을 중지하여 과도한 WIP를 억제하는 시스템인데 반하여, Push 모델은 WIP의

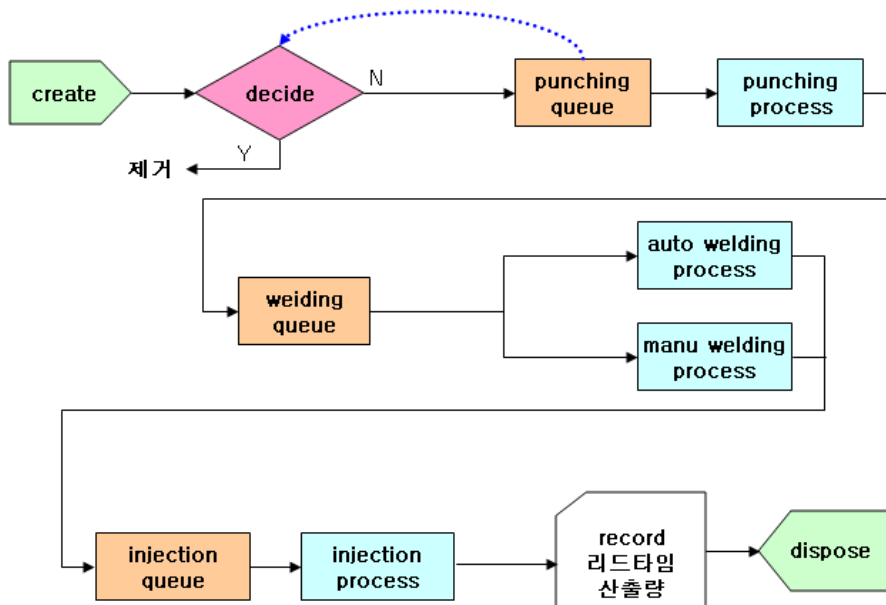


그림 9. push 모델의 흐름도

크기에 관계없이 운영된다한다. 시뮬레이션 결과, 산출량 5,681개, 리드 타임 1,255분, WIP 411개이다. <표 5>는 시뮬레이션의 결과다.

표 5. push 모델시뮬레이션 결과

항 목	Push 모델
산출량	6,581
리드 타임	1,255
WIP(mean)	411
WIP(max)	887
용접 queue(mean)	298
용접 queue(max)	663
사출 queue(mean)	98
사출 queue(max)	391

대기행렬의 길이를 고려하면 현 작업장의 공간에서는 실현 불가능한 생산시스템이다.

② CONWIP 모델

CONWIP 모델은 <그림 10>과 같이 구성하였다.

편칭 공정에 들어오기 전에 CONWIP 카드를 받고 가공이 완료되어 사출 공정을 떠날 때 카드를 놓도록 하였다. CONWIP 카드 수의 변화에 따른 시뮬레이션 결과는 다음 <그림 11>과 <그림 12>와 같다.

CONWIP 카드 수가 110이 넘어가면 산출량은 6,400 부근에서 수렴하나 리드 타임과 WIP는 계속 증가함을 보이고 있다. 목표 산출량을 6,100으로 할 때 CONWIP 카드 수는 70 정도이다.

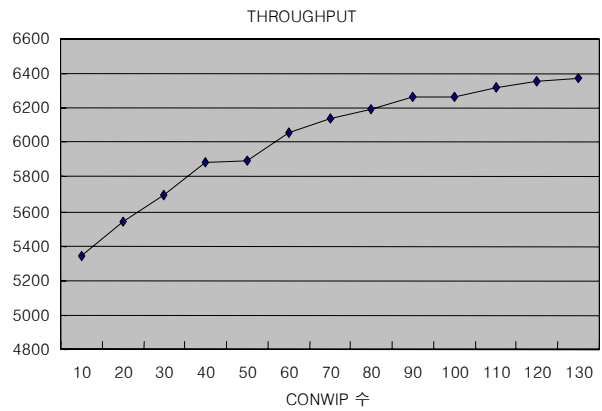


그림 11. CONWIP 카드 수에 따른 산출량 변화

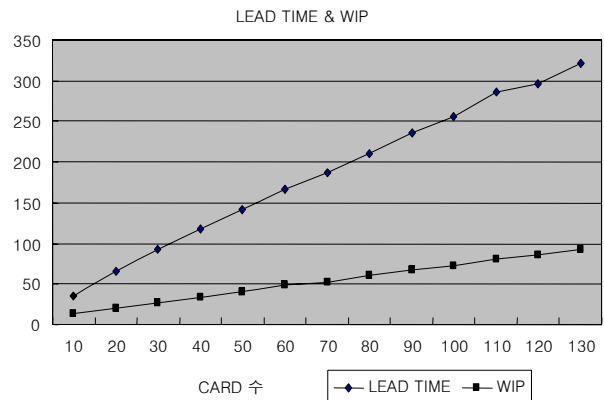


그림 12. CONWIP 카드 수에 따른 리드 타임 and WIP 변화

③ DBR 모델

DBR 모델에서 버퍼의 위치는 병목공정 앞에 두어야 한

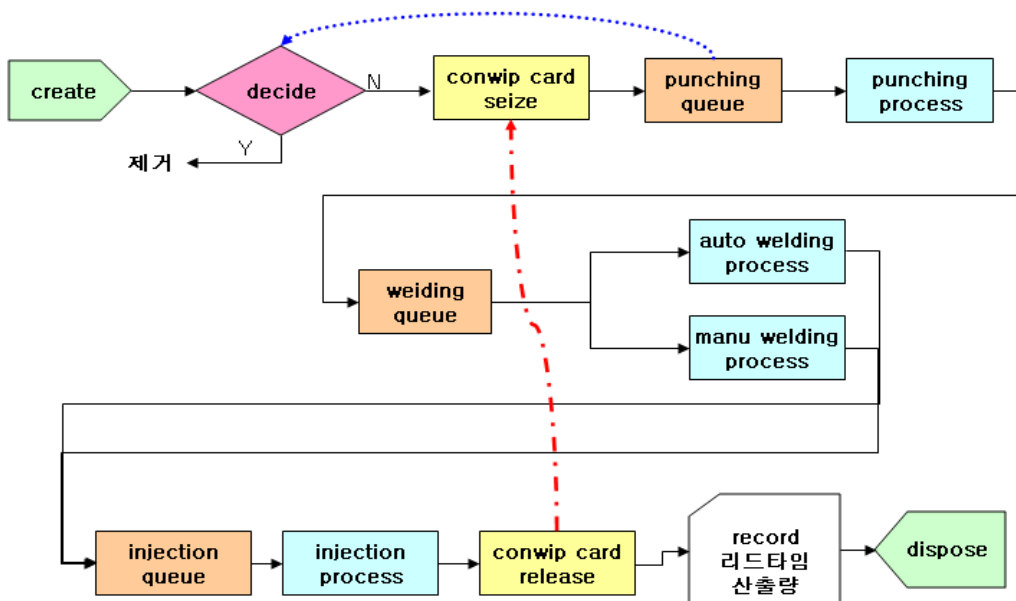


그림 10. CONWIP 모델

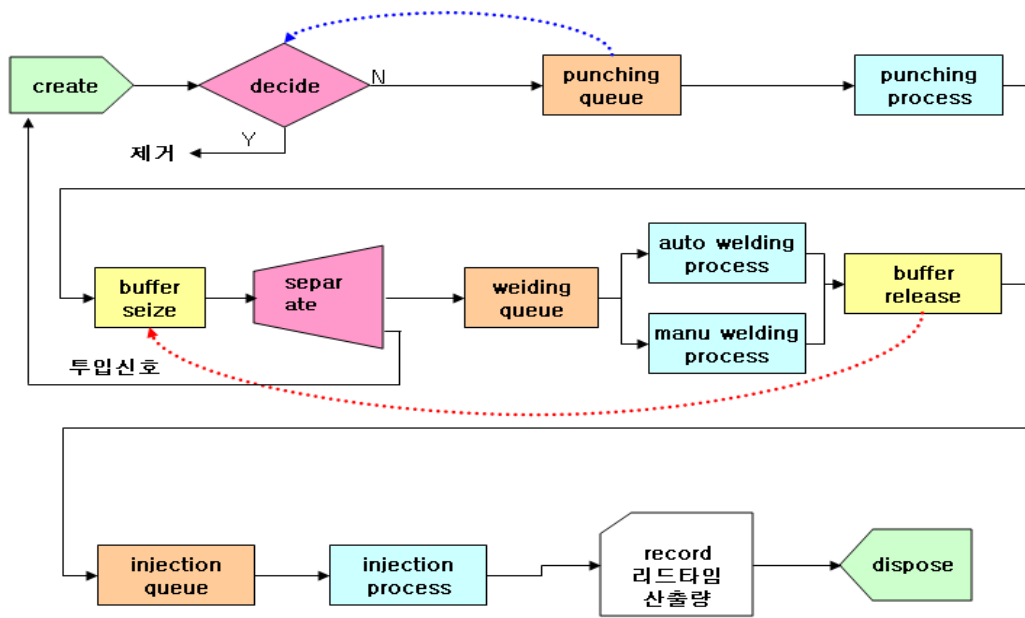


그림 13. DBR 모델

다. <표 4>의 산출량을 보면 용접공정의 산출량이 가장 적어 병목공정이 된다. 아래 <그림 13>은 버퍼 위치를 용접 공정 앞에 설치하였고, 버퍼에서 빠져 나올 때 펀칭 공정에 원료투입을 하도록 하였다.

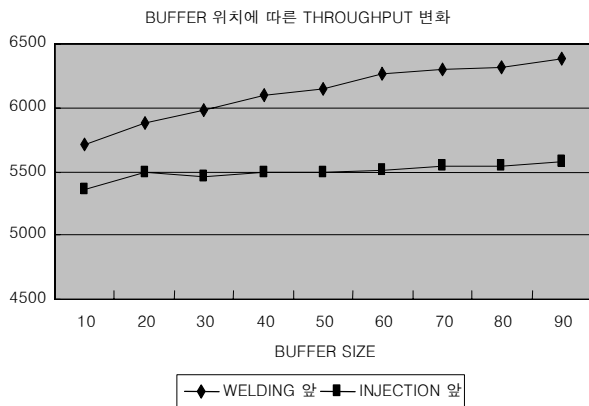


그림 14. 버퍼 위치에 따른 산출량 변화

DBR 모델을 시뮬레이션 하기 위해서 여러 가지 조건을 검토하였다. 먼저 버퍼를 설치하는 위치에 따라 산출량과 리드 타임의 변화는 어떠한지 살펴보기 위해서 버퍼 크기

를 변화시키면서 시뮬레이션을 실시하였다. <그림 14>는 버퍼를 용접 공정 앞에 설치하는 경우와 사출 공정 앞에 설치하는 경우를 버퍼크기를 변화시키면서 산출량의 변화를 비교한 것이다.

<그림 14>에서 보듯이 용접공정이 병목공정이므로 이곳에 버퍼를 설치하는 것이 사출공정 앞에 설치하는 경우보다 산출량이 훨씬 높다. 또 버퍼 크기가 60까지는 버퍼의 크기에 비례하여 산출량이 증가하나 버퍼 크기가 70이 넘는 경우에는 산출량 증가가 미미하다.

④ KANBAN 모델

KANBAN 모델은 3개의 간판을 사용한다. 펀칭 프로세스에 K1 간판을, 용접 프로세스에 K2 간판을, 그리고 사출 프로세스에 K3 간판을 사용한다. K1, K2, K3의 간판 수의 변경을 통해서 어떤 변화가 있는지 시뮬레이션을 실시하였다. KANBAN 모델을 표시한 것이 <그림 15>이다.

K1, K2, K3 간판 수는 다음 <표 6> 과 같이 하였다.

시뮬레이션 결과는 <그림 16>과 같다.

전체 카드 수가 증가함에 따라 산출량과 리드 타임은 증가한다. 하지만 카드 수 40에서 60까지는 산출량의 변화는 없고 리드 타임만 증가하는 현상을 보인다. 이것을 분석하

표 6. KANBAN 카드 구성

총 계	10	20	30	40	50	60	70	80	90
K1	3	5	10	10	10	20	20	20	20
K2	4	10	10	20	20	20	30	30	40
K3	3	5	10	10	20	20	20	30	30

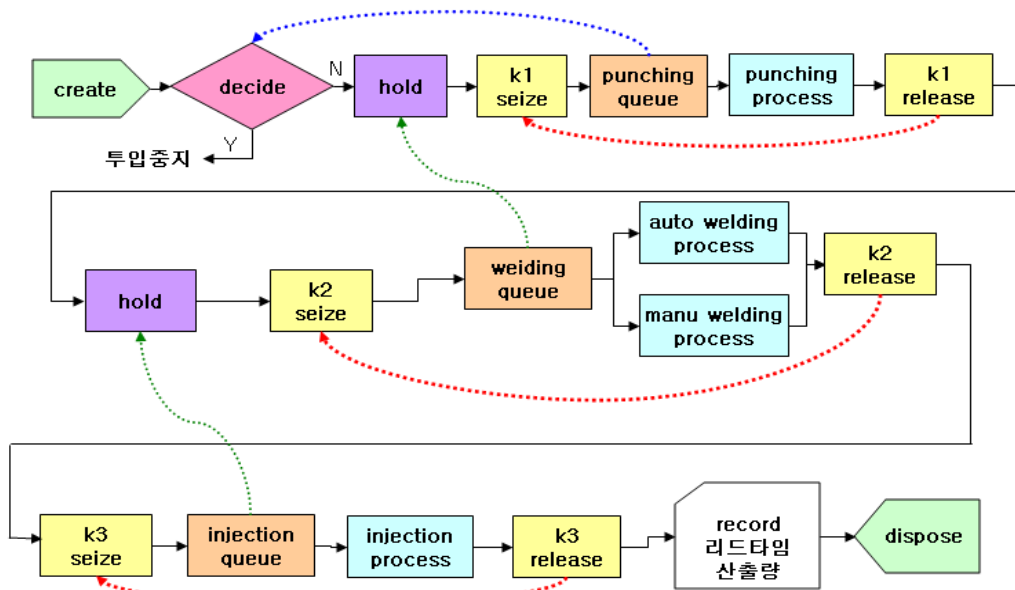


그림 15. KANBAN 모델

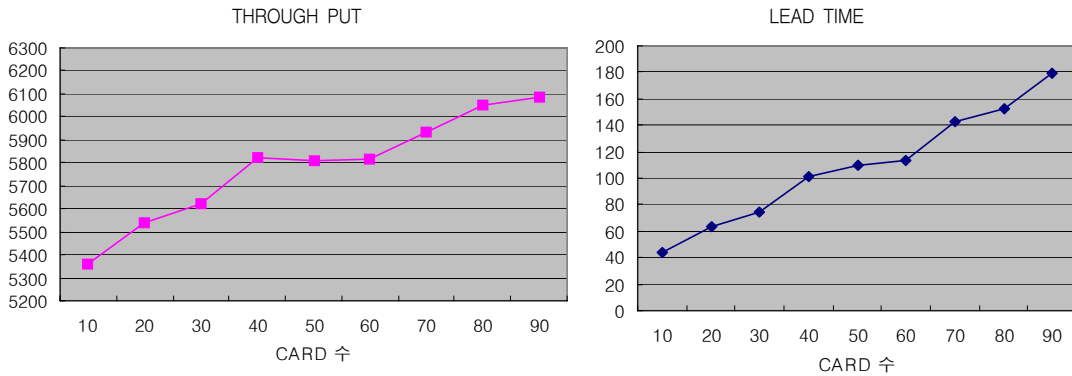


그림 16. KANBAN 카드 수에 따른 산출량 및 리드 타임 변화

표 7. 카드 수 조합

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
K1	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	15	15	15	15
K2	15	20	25	30	35	10	15	20	25	30	10	15	20	25
K3	30	25	20	15	10	30	25	20	15	10	25	20	15	10

기 위해 다음의 실험을 하였다.

전체 카드 수는 동일하게 한 다음 K1, K2, K3의 카드에 따른 산출량과 리드 타임의 변화를 보기 위해서 총 간판 수를 50으로 고정하여 놓고, <표 7>과 같이 카드 수의 조합으로 시뮬레이션을 실시하였다.

<그림 17>는 그 결과를 도표로 나타낸 것이다.

전체 카드 수 50을 가지고 K1, K2, K3 카드 수 조합에 따라 산출량은 5,600~6,000, 리드 타임은 80~140분의 값을 갖는다. 최대의 산출량을 위해서는 K1 값이 5~10, K2 값이 25~35, K3 값이 10~15이다. 또 총 카드 수 60을 가지고 여

러 조합으로 시뮬레이션 한 결과 산출량은 5,800~6,000, 리드 타임은 100~165분의 값을 갖는다.

그러나 이 논문에서는 최적 KANBAN 카드 수를 결정하는 것이 아니므로 카드 수의 조합에 따라 산출량과 리드 타임이 달라진다는 점만 밝힌다.

⑤ CONWIP-DBR 모델

본 논문에서는 Hybrid 모델인 CONWIP-DBR 모델을 새롭게 제안하고 이를 분석해 보았다. CONWIP-KANBAN Hybrid 모델에 대한 연구 실적은(Kelton et al., 2006) 상당히 있으나

CONWIP-DBR Hybrid 모델의 연구 결과는 없다. 이 모델은 CONWIP의 장점과 DBR의 장점을 결합하여, CONWIP과 DBR의 단점을 보완하는 방식이다. 즉 DBR은 병목공정에 버퍼를 설치하여 병목공정의 변동성에 좋은 대응을 보이거나 WIP가 증가하고 리드타임이 늘어나는 문제가 있다. 반면에 CONWIP은 전체의 WIP를 통제하기 때문에 리드타임이 줄어드나 병목공정의 변동성에 대응하기에는 취약한 구조다. 이러한 점을 CONWIP-DBR Hybrid 모델은 에서는 보완하여

최소의 WIP로 병목공정의 변동성에 대응하면서 목표 산출량을 얻게 되리라 예상하였다.

<그림 18>은 본 논문에서 제안한 CONWIP-DBR Hybrid 모델을 보여 준다.이다.

이 모델을 시뮬레이션을 하기 위해서 CONWIP 카드 수를 30, 50, 70, 90으로 변화시켜 보고, 각각의 CONWIP 카드수에 버퍼 크기를 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 등으로 변화시켜 보면서 성과를 측정하였다.

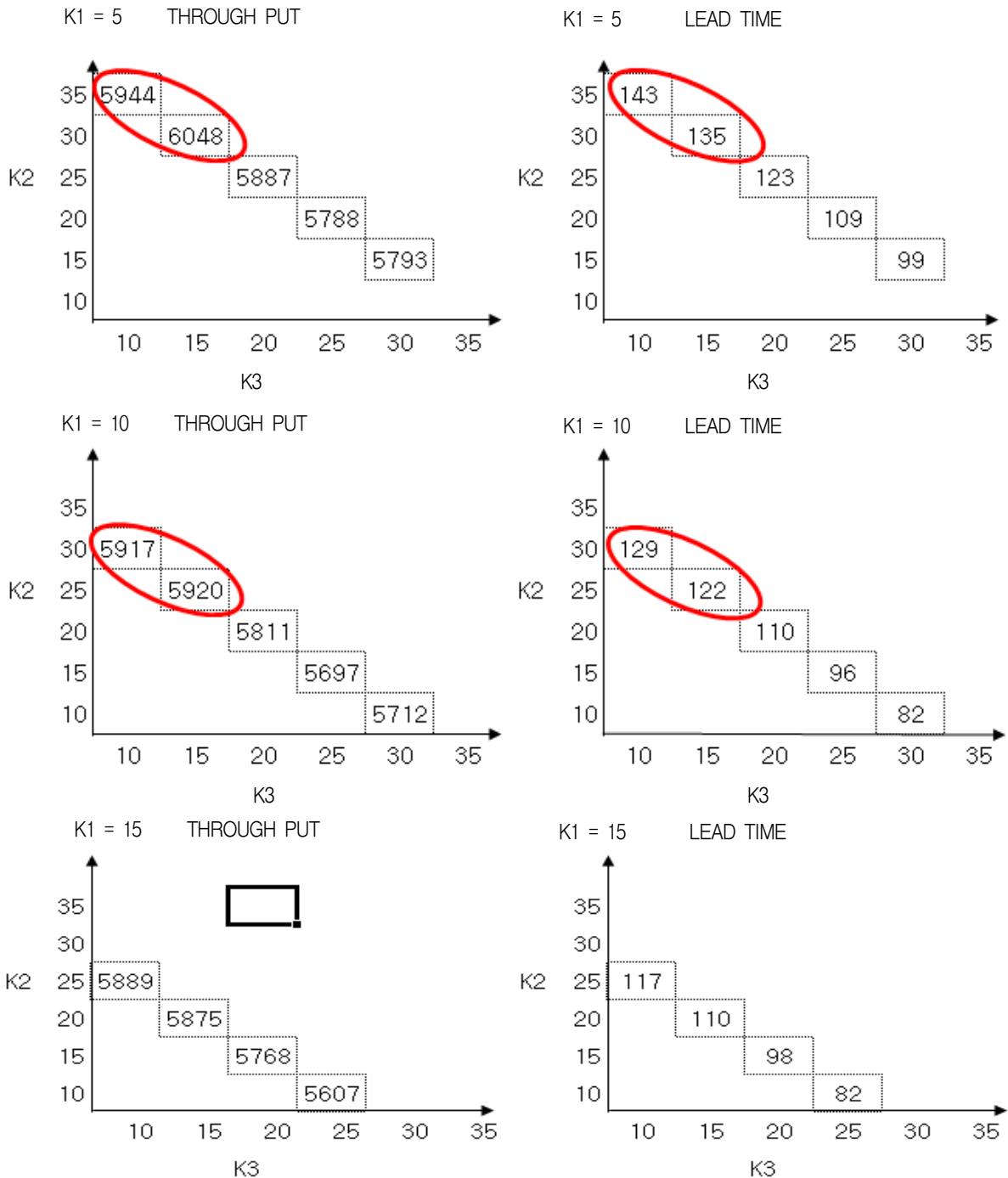


그림 17. 간판 조합에 따른 산출량 및 리드 타임 변화

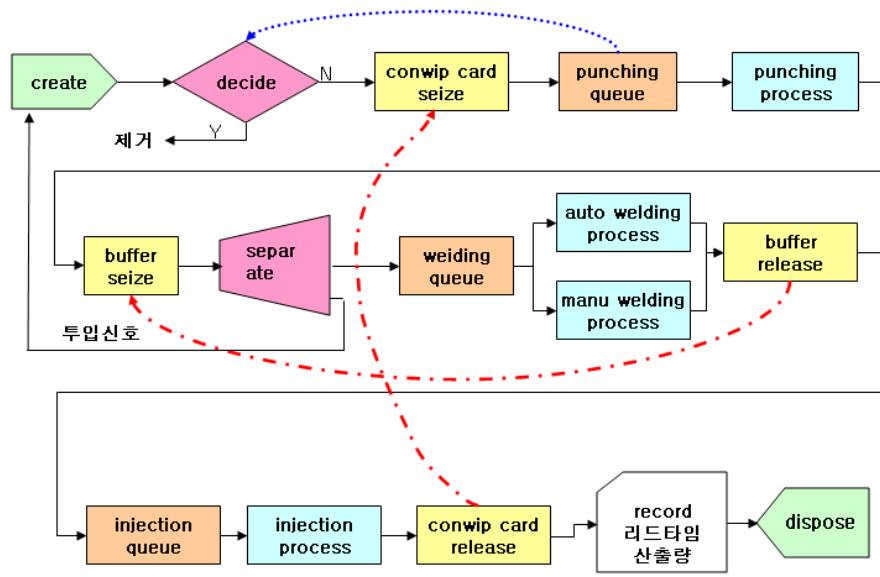


그림 18. CONWIP-DBR Hybrid 모델

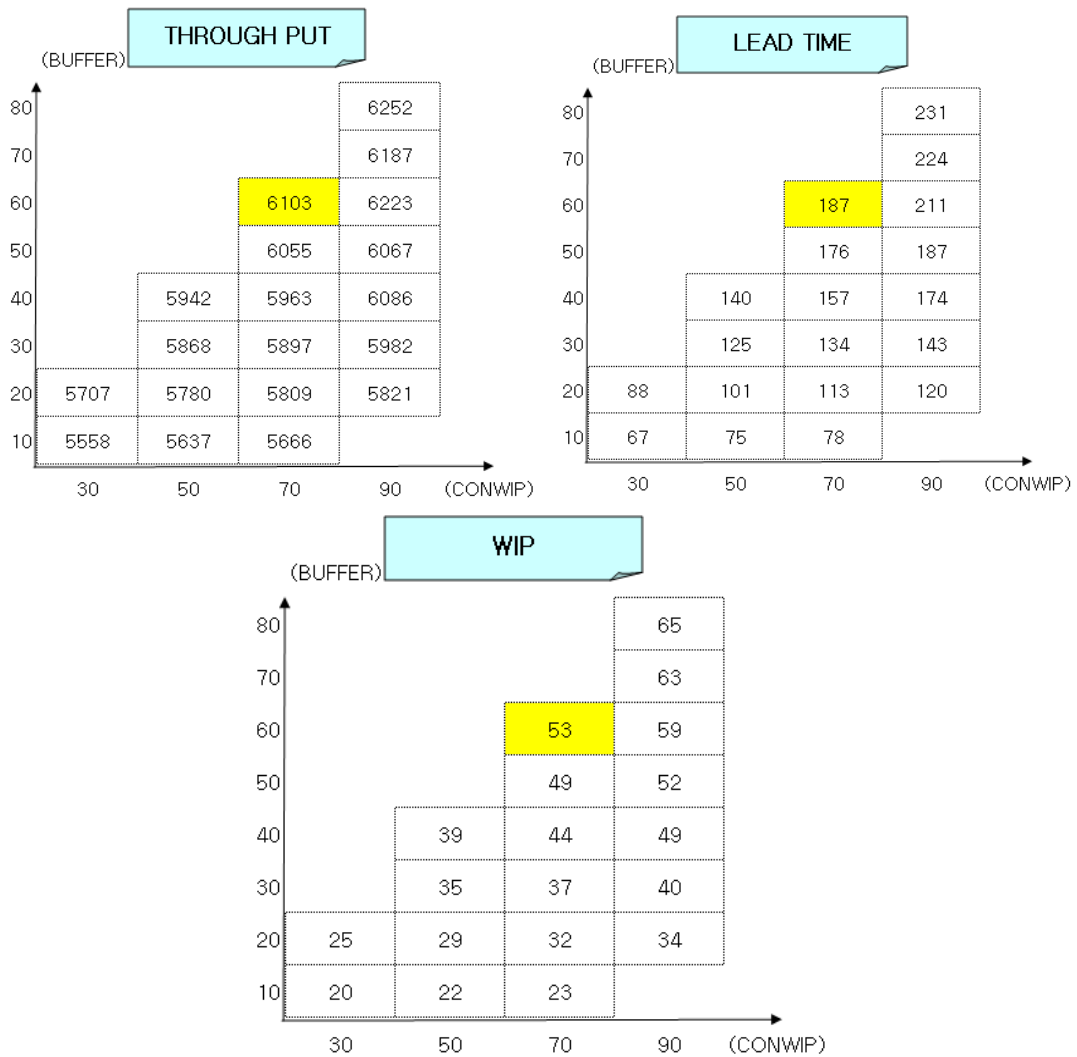


그림 19. CONWIP-DBR 모델의 산출량, 리드 타임, WIP 변화

<그림 19>는 그 결과이다.

CONWIP 카드 수와 버퍼 크기가 늘어남에 따라 산출량은 증가하지만 이에 따라 리드 타임과 WIP도 늘어나게 된다. 목표 산출량을 6,100으로 할 때 리드 타임과 WIP를 줄이는 조합은 CONWIP 카드 70, 버퍼 크기 60이었다.

(3) 각 시물레이션 모델의 비교

① CONWIP, KANBAN, DBR 비교

CONWIP의 경우 conwip 카드수, KANBAN의 경우 총 간판수, DBR의 경우는 버퍼사이즈 크기의 변화에 따라서 각 생산통제 방식의 산출량, 리드 타임, WIP의 비교를 그래프로 표시한 것이 <그림 20>이다.

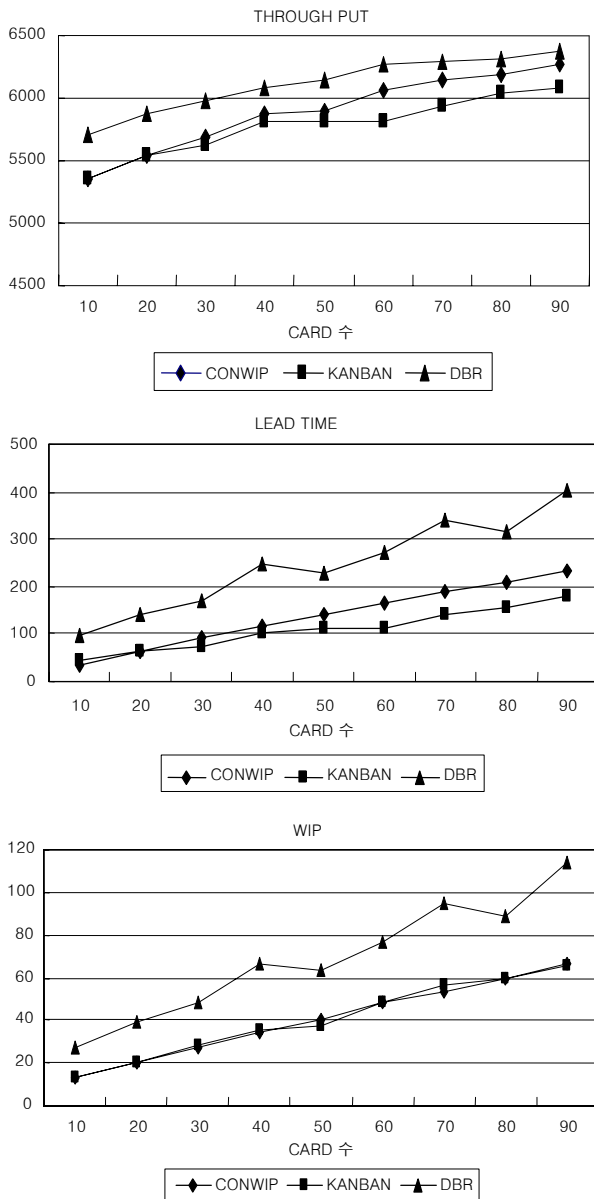


그림 20. CONWIP, KANBAN, DBR의 산출량, 리드 타임, WIP 비교

카드 수가 증가함에 따라 산출량, 리드 타임, WIP는 증가한다. <그림 20>의 WIP를 보면 CONWIP과 KANBAN은 카드수가 WIP와 일치하나, DBR은 버퍼사이즈의 크기보다 WIP가 20~50 더 많다. 동일한 카드수에 대한 산출량을 비교하기 위해서는 DBR의 경우는 CONWIP과 KANBAN보다 20이상 큰 카드수의 산출량을 비교하여야 한다. 이를 고려하면 DBR은 CONWIP과 산출량은 비슷한 수준이지만 리드 타임은 오히려 더 많이 소요된다. 리드 타임이 가장 짧은 것은 KANBAN이다.

② CONWIP과 CONWIP-DBR 비교

CONWIP과 CONWIP-DBR 시물레이션 결과를 비교하면 다음 <표 8>과 같다.

표 8. CONWIP, CONWIP-DBR 비교

통제방식	CONWIP	CONWIP-DBR	
	CONWIP 카드 : 70	CONWIP 카드 : 70	
		버퍼크기 : 60	버퍼크기: 50
산출량	6,136	6,103	6055
리드 타임	187	187	176
WIP(mean)	53	53	49

<표 8>은 목표 산출량 6,100을 산출하도록 시물레이션 한 결과이다. 버퍼크기가 60인 CONWIP-DBR의 경우 리드 타임, WIP, 및 산출량은 CONWIP 모델과 차이가 없었다.

공정 내의 대기행렬의 길이를 비교하기 위해서 카드 수 70에서 conwip, kanban, DBR, conwip-DBR의 각 통제방식의 모델을 시물레이션 하였다. 그 결과는 <그림 21>과 같다.

전체 공정의 WIP 및 각 공정 별 대기행렬 길이를 파악하기 위해서 대기행렬의 평균값과 최대값을 구하였다. 각 공정에서 WIP의 변동은 CONWIP과 CONWIP-DBR 모델에서는 거의 없고, DBR이 변동이 제일 크며, KANBAN도 약간의 변동 폭을 가지고 있다.

이러한 점을 고려해 보면 CONWIP과 CONWIP-DBR은 거의 차이가 없다. 다만 카드 관리방식이 CONWIP쪽이 CONWIP-DBR보다 쉽다. 그러므로 현재의 생산운영조건에서는 CONWIP 생산통제 방식이 더 적합한 것으로 보인다.

3.4 최적 모델의 설정

(1) 효과의 파악

앞 절에서 검토해 보았듯이 현재의 생산시스템에서 선택한 가장 적합한 생산통제 방식은 CONWIP 모델이었으며 목표 산출량 6,100을 달성하려면 CONWIP 카드 70으로 운영하면 되었다. 이런 상태로 생산을 하였을 경우 각 설비의 여유율 상태와 작업시간의 변화를 각 모델별로 분석해 보았다.

먼저 이론적인 가용도(availability)는 다음 식에 의해서 구했다.

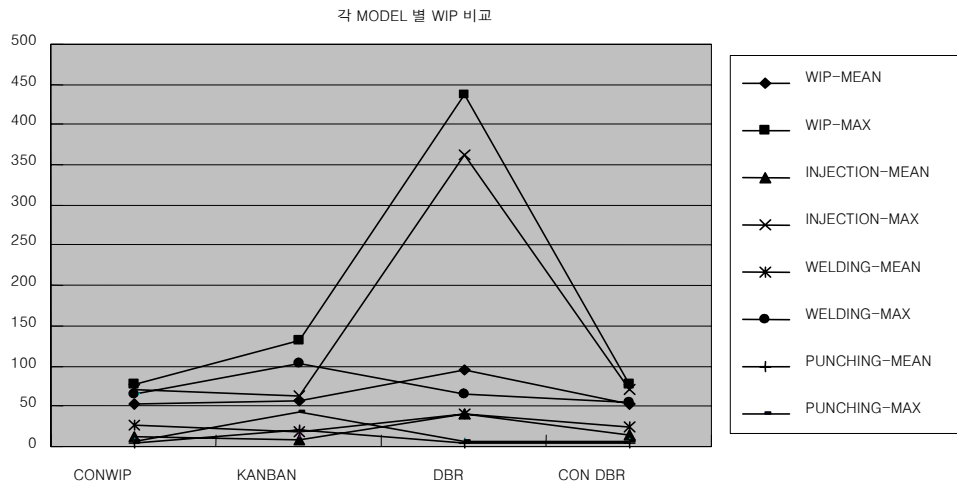


그림 21. 각 모델 별 대기행렬 비교

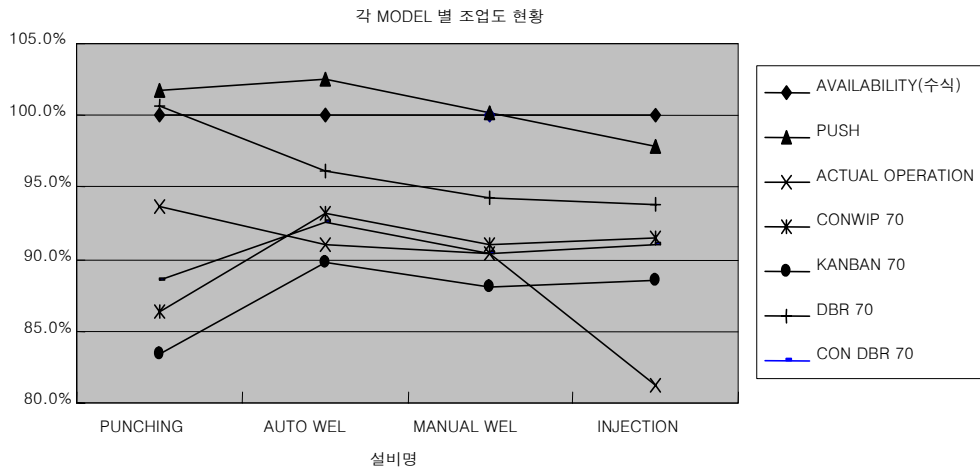


그림 22. 각 모델 별 조업도 비교

가용도 Availability = $MTBF / (MTBF + MTTR)$

표 9. 각 모델 별 설비의 가동률

	편칭기	자동 용접기	수동 용접기	사출기
가용도	77.8%	90.8%	89.1%	98.2%
PUSH 모델	79.2%	93.1%	89.2%	96.1%
ACTUAL 운영	72.9%	82.6%	80.5%	79.8%
CONWIP 70	67.2%	84.6%	81.1%	89.9%
KANBAN 70	64.9%	81.6%	78.4%	87.0%
DBR 70	78.3%	87.3%	83.9%	92.2%
CON DBR 70*	68.9%	84.1%	80.5%	89.4%

*: 버퍼 크기는 60임.

카드 수 70을 기준으로 각 모델 별로 시뮬레이션 하여, 설

비 별 가동률을 구하면 <표 9>와 같다.

Push 모델의 각 설비 별 가동률은 이론적인 가용도와 비슷한 값을 가지고 있다. 실제로 운영되고 있는 생산현장의 설비의 가동률은 가용도에 비해서 상당히 낮은 값을 가지고 있다. 또 CONWIP, KANBAN, DBR, CONWIP-DBR 모델의 설비 별 가동률 값은 서로 비슷한 형태를 보이고 있다.

가용도에 대한 각 모델 별 조업도의 비교 결과는 <그림 22>와 같다.

조업도는 다음과 같이 정의한다.

조업도 = 가동률/가용도

긴급대응과 변동성을 고려해서 설비능력의 90% 수준에서 조업도를 유지하는 것이 생산관리 측면에서 효율적이다. 이런 측면에서 볼 때 CONWIP과 CONWIP-DBR은 90%의 조업도로 좋은 여유율을 유지하고 있으며, PUSH와 DBR은 약간 높은 조업도로 여유율이 부족하며, KANBAN의 경우

는 너무 많은 여유율을 유지하고 있다. 실제 운영되고 있는 생산시스템은 설비 별 불균형이 심하며, 사출기의 가동률 수준은 매우 낮다.

CONWIP(카드 수 70) 모델로 400시간 가동 시 산출량은 6,136이 된다. 수요량이(현재의 량인 5,368)의로 변화가 없다면 CONWIP(카드수70)모델의 운전시간은 350시간으로(현재수요/400시간 산출량×400) 현 수요량을 충족시킬 수 있다.

그 결과 운전시간이 12.5% 절감된다.

(2) 랙의 공간

CONWIP(카드 수 70) 생산통제 방식 운영 시 용접 프로세스와 사출 프로세스 앞에 어느 정도의 공간이 필요한 지 알아 보았다.

용접 프로세스와 사출 프로세스의 대기행렬 길이 변화에 대하여 30회 반복 시험 결과를 분석하였다. <그림 23>은 용접 프로세스이고, <그림 24>는 사출 프로세스이다.

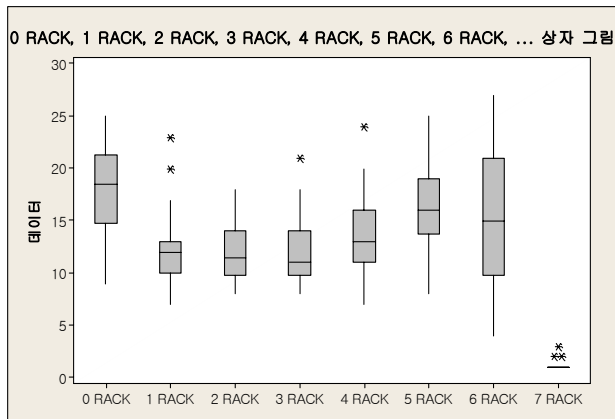


그림 23. 용접 프로세스의 대기행렬 길이 변화

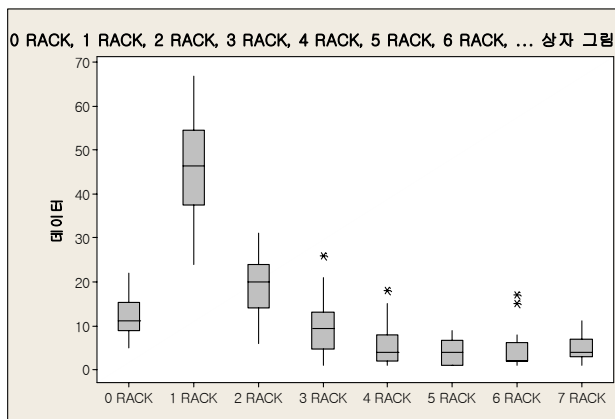


그림 24. 사출 프로세스의 대기행렬 길이 변화

<그림 23>과 <그림 24>는 10개 단위로 1개의 랙이 필요할 때 랙 개수에 대한 확률분포를 박스플롯으로 표시한

것이다. 용접 프로세스 앞에는 60개의 재공품을 놓을 수 있는 공간이 필요하고, 사출 프로세스 앞에는 70개의 재공품을 놓을 수 있는 공간이 필요하다.

4. 결론 및 향후 과제

4.1 결론

생산 공정의 공정관리 상태가 객관적으로 어느 정도의 수준인지를 판단하기 위해서 시물레이션 모델을 활용하였다. 즉 실제 생산시스템의 산출량, 리드 타임, WIP과 시물레이션의 산출량, 리드 타임, WIP를 비교하였다. 산출량을 향상시키면서, 리드 타임과 WIP를 감소할 수 있는 생산통제 방안을 찾기 위해서 KANBAN, CONWIP, DBR, CONWIP-DBR 모델을 비교하였다. 현 생산시스템에서는 CONWIP과 CONWIP-DBR은 비슷한 성과를 나타내고 있었다. 그러나 생산 통제 방식이 하나의 파라미터인 CONWIP 방식이 CONWIP-DBR 보다 통제가 쉬워 최종안으로 선택하였다.

CONWIP 방식은 다른 생산통제 방식에 비해 리드타임과 WIP가 더 적다. 그 결과를 현재의 생산시스템과 비교해 보면 CONWIP 방식이 리드 타임을 97% 감소시켰으며 WIP는 96% 감소시켰다.

4.2 향후 과제

향후 과제는 다음과 같다.

첫째, 본 논문에서는 제품에 대한 수요의 변동성을 고려하지 않았다. 본 공정에서 생산하는 제품은 공장 내 다른 공정에 투입되는 제품으로 생산을 하면 재고 없이 소비되는 것으로 하였다. 물론 미납주문도 발생하지 않는 것으로 하였다. 이러한 모델은 이상적인 것으로 실제로 고객 주문품에는 맞지 않는 모델이다. 고객 수요의 변동에 따라서 어떤 생산 통제 방식이 우수한 지는 앞으로 더 연구해야 할 분야이다. 고객 수요 변동에 따른 서비스율과 재고 및 미납주문에 따른 손익관계를 고려해서 KANBAN, CONWIP, DBR, CONWIP-DBR 모델을 시물레이션을 할 필요가 있다.

둘째, 본 논문에서 다룬 공정이 너무 단순하다. 3개 공정으로 이루어져 병목의 문제를 충분히 고려하지 못하였다. 다수의 공정으로 이루어지고, 서로 다른 제품이 제작되는 공정을 대상으로 하였으면 CONWIP-DBR 모델에 대해서 좋은 결과를 보였을 것이라 예측된다. 공정이 너무 단순하여 KANBAN, CONWIP, DBR, CONWIP-DBR 모델의 비교가 충분하지 못했다. 또 CONWIP-Kanban, ECK과의 비교 연구가 필요하다.

셋째, 본 논문은 단속공정을 대상으로 일부의 공정만을 연구하였다. 아연 제련소의 공정은 연속 흐름 공정으로 이

루어진 장치산업이다. 아연 제련소 전체 공정을 대상으로 시뮬레이션 모델을 만들어 공장의 문제점을 시뮬레이션을 통해서 파악, 개선 모델을 수립하고 후, 시뮬레이션을 실행하여 보다 효율적인 공장운영방안을 모색해야 한다.

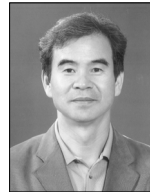
참고문헌

- MOKSHAGUNDAML.SRIKANTH, PHD (2005), Synchronous Management, Dongyangbooks,
- Black, J. T. Black and Steve L. Hunter (2003), Lean Manufacturing Systems and Cell Design.
- Gilland, Wendell G. (2002), A simulation study comparing performance of CONWIP and Bottleneck-based release rules, *Production planning and control*, 13.
- Hopp, Wallace J. and Mark L. Spearman (2005), Factory Physics, Hankyungsa.
- John, Geraghty and Cathal, Heavey (2004), A comparison of Hybrid PUSH/PULL and CONWIP/PULL Production inventory control policies, *production economics* 91.
- Karin, Boonlertvanich (2005), Extended CONWIP-KANBAN System : control and performance Analysis, Georgia Institute of technology.
- Kelton, Sadowski, Sturrock (2007), Simulation with ARENA, McGrawHill, 4th Ed.
- Kelton, Sadowski, Sturrock (2007), Simulation with ARENA, McGrawHill, 4th Ed.
- Marek, Richard P., Elkins, Debra A., and Smith, Donald R. (2001), Understanding the fundamentals of KANBAN and CONWIP PULL systems using simulation, Department of Industrial Engineering, Texas A&M University, Proceeding of the 2001 winter simulation conference.
- Massino, Bertolini, Maurizio, Bevilacqua, and Andrea Grassi (2005), Advanced Manufacturing Control Systems : A simulation comparative Analysis, sixteen annual conference of POHS.
- Qi, Chao and Appa, Iyer Sivakumar (2004), Simulation based cause and effect analysis in semiconductor wafer, Fabrication, *Journal of The Institution of Engineers*, 44(4).



김준모

서울대학교 기계공학과 학사
울산대학교 자동차선박 대학원 석사
품질관리 기술사
공장관리 기술사
현재: 울산대학교 자동차선박대학원
산업경영공학 박사과정
고려아연(주)



김연민

서울대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 경영과학과 석사
한국과학기술원 경영과학과 박사
현대중공업 조선사업부 시스템개발부 근무
미국 Ohio 주립대학 경영과학과 객원 교수
미국 Alabama Auburn 대학 산업공학과 객원교수
현재: 울산대학교 산업공학부 교수
관심분야: 생산전략, 기술경영, 시뮬레이션