

신발 제조 시스템 운영 전략에 관한 연구

권오훈^{1*} · 구평희²

¹부경대학교 기술경영 전문대학원 / ²부경대학교 시스템경영공학부

A Study on Operational Strategies for Footwear Manufacturing Systems

Oh Hun Kwon¹ · PH Koo²

¹Pukyong National University Graduate School of Management of Technology,

²Pukyong National University Division of Systems Management and Engineering

In footwear manufacturing systems, the upper parts of the shoes are manually sewed on a sub-line while bottom parts are produced by machines such as injection and molding machines on a sub-line before these two parts are combined into complete shoes on a final assembly line. The manual operations for the upper parts lead to a large variability in processing times, resulting in higher work-in-process inventory. In most footwear industries, production lines have been controlled by MRP-based push systems. Some industries attempt to introduce Kanban-based pull systems. This paper identifies the characteristics of the footwear manufacturing processes, and discusses the problems of the current control systems. As an operational alternative, a CONWIP-based control strategy is presented. Simulation experiments are performed to examine the performance of the control strategies.

Keywords: Footwear Manufacturing, CONWIP, Kanban System, Pull System

1. 서론

신발은 모델, 재질 및 치수에 따라 다른 생산 방식이나 공정이 적용될 수 있으므로 생산시스템이 복잡하고 관리가 어렵다. <Figure 1>은 신발제조과정을 간단히 묘사하고 있다. 신발은 바닥(BTM : Bottom)부분인 밑창과 윗(UPR : Upper)부분인 갑피를 별도의 생산라인에서 만든 후 이를 조립라인에서 완성한다. 밑창을 생산하는 라인(BTM sub-line)은 사출성형 장비를 이용하여 제품을 생산하므로 장치산업의 특징을 갖는다. 갑피 부분을 생산하는 라인(UPR sub-line)에서는 작업자가 재봉틀을 이용해 재단기에 의해 잘려진 부품을 결합하는 수작업공정을 행한다. 이 때, 작업자에 의해 수행되는 수작업 공정은 기계에 의한 작업보다 변동성이 크다는 특징이 있다.

전통적으로 신발제조 시스템은 MRP를 기반으로 하는 Push 생산 전략을 사용해왔다. 그러나 MRP는 수요에 대한 예측생

산 방식이므로 소비자 요구가 수시로 변하는 최근의 시장 환경에서 주문이나 생산 공정 등의 변화에 대한 적응성 부족, 완제품 장기재고 등의 문제가 중요한 약점으로 작용한다. 특히 대다수 공정이 작업자의 수작업으로 이루어지는 신발제조라인에서는 기계화되고 자동화된 생산라인보다 생산시간의 변동성이 크다는 특징이 있다. 이러한 큰 변동성을 흡수하기 위해서는 높은 수준의 WIP(Work-In-Process)을 유지해야 하고 그 결과 사이클타임을 증가시켜 여러 가지 부수적인 문제를 발생시킨다. 이러한 문제들을 해결하고자, 최근에는 JIT(Just In Time)을 목표로 Pull 시스템인 Kanban 시스템의 도입이 시



Figure 1. Configuration of Footwear Manufacturing

* 연락처: 권오훈, 48547 부산광역시 남구 신선로 365, 부경대학교 3공학관 304-1호, Tel : 051-629-5656, Fax : 051-629-5659, E-mail : ohkwon11@nate.com

2016년 7월 11일 접수; 2016년 9월 19일 수정본 접수; 2016년 11월 28일 게재 확정.

도되고 있다. 그러나 JIT을 성공적으로 구현하기 위해서는 시스템에 내재해 있는 낭비요소의 제거 및 표준화가 선결되어야 하는데 단순히 Kanban이라는 형식만을 차용하고 있어 엄밀한 의미에서의 Kanban 시스템이라고 말할 수 없다. 즉 현재 신발 공장은 Card를 발행하여 Kanban과 유사한 표식을 사용하기는 하나 Pull 시스템의 트리거로 작용하지 못하고 생산 실적 관리의 역할만을 함으로써 형식적으로만 Kanban 방식이라는 이름을 쓰고 있을 뿐이다. 이렇게 선결작업이 완결되지 않은 구조적인 Kanban 방식은 효과가 크지 않거나 오히려 관리의 어려움만 더 커지는 현상을 초래한다. 변동성이 많은 시스템에서는 JIT의 효과를 얻기가 어려운데, 신발 산업 뿐 아니라 국내의 많은 기업에서 JIT 구현을 위해 Kanban 시스템을 적용하는 노력을 했지만 성공적으로 실현한 사례가 많지 않은 이유 중에 핵심이 되는 것은 큰 변동성을 개선하지 않고 막연히 Kanban 시스템의 형식만을 도입했기 때문이라고 여겨진다.

본 논문은 실측 데이터 분석을 통해 신발 갑피 생산 공정은 변동성이 매우 크다는 것을 밝히고, 현재 채택하고 있는 MRP 기반의 Push 방식이 갖는 문제점을 파악하며, 이에 대응하여 생산성을 향상시킬 수 있는 CONWIP(CONstant WIP) 방식의 Performance를 Kanban 방식과 비교하고 검증한다.

2. 생산시스템 운영 방안 및 문헌 연구

2.1 생산시스템 운영 방안

생산을 통제하는 방식은 크게 Push형 운영전략과 Pull형 운영전략으로 나눌 수 있다. Push형 운영전략은 수요예측 기반의 생산량 계획에 의한 생산방식이고, Pull형 운영전략은 공정의 후반부에서 제품을 인출해 가면 시작부에 부품이 투입되는 형태로 시스템을 운영하여 시스템내의 WIP을 통제하는 생산 방식이다. MRP 시스템이 대표적인 Push형 운영시스템으로 많은 기업들이 이 방식으로 라인을 운영하고 있다. 그러나 MRP 방식은 생산계획에 의한 밀어내기 생산 방식이므로 공정이 복잡하고 라인밸런싱이 맞지 않은 경우에는 WIP이 폭발적으로 증가하며 이에 따라 생산 사이클타임이 크게 증가하는 문제가 있다. MRP Push 방식의 이러한 약점을 보완하기 위한 대표적인 방법이 도요타의 Kanban을 이용한 Pull 방식이다. 이 방식은 각 공정별로 필요한 수만큼의 Kanban을 배정하여 WIP 수준을 통제하며 생산 사이클타임을 관리한다. 그러나 Kanban 시스템은 모든 낭비가 사전에 제거되고 라인밸런싱이 완벽한 상태에서 온전히 운영된다는 특징이 있다. 따라서 여러 가지 불확실성과 낭비가 존재하고 변동성이 큰 생산시스템에는 적용하기가 쉽지 않다. 오히려 이러한 불확실성과 낭비가 해결되지 않은 상태에서 Kanban 시스템의 적용은 시스템의 효율성을 낮추는 역효과를 가져올 수 있다.

이에 비해 전체 시스템 내의 WIP을 통제하여 Kanban의 관리가 보다 유연하도록 고안된 Pull 방식이 CONWIP 방식이다 (Spearman, 1990; Spearman and Zazanis, 1992). CONWIP 방식

은 제한된 수의 Container가 페루프의 생산 시스템을 순환하며 전체 WIP을 통제하는 운영방식이다. CONWIP 시스템에서는 컨테이너가 생산 라인의 마지막 부분에 도달하면 다시 첫 부분으로 이동하여 새로운 부품이 생산 시스템에 투입되도록 하여 전체적으로 WIP을 일정하게 유지하도록 한다. 따라서 첫 공정은 Pull에 해당하지만 시스템 내에서는 Push로 밀어내게 하여 한정된 WIP으로 생산성을 극대화 하는 방식이다. CONWIP 방식은 전체 시스템의 WIP을 제한하기 때문에 매 공정마다 WIP을 통제하는 Kanban 방식과 대비된다. 또한 CONWIP 방식은 가장 느린 기계에 WIP이 자연스럽게 쌓이도록 하여 병목의 이동을 조절할 수 있으며, 보다 유연한 체계로 인해 작업자가 받는 스트레스가 작다는 장점이 있다. CONWIP 방식은 운영의 단순함에도 불구하고 고생산성을 달성 할 수 있다는 장점으로 인해 여러 생산 환경으로 적용이 확대되고 있다.

2.2 문헌 연구

생산운영관리 분야에서 MRP, Kanban 및 CONWIP 시스템에 대해 수많은 연구가 진행되고 있다. Gstettner *et al.*(1996)은 서비스 시간이 지수분포인 경우에 대하여 WIP과 생산량 측면에서 Kanban 방식과 CONWIP 방식을 시뮬레이션으로 비교 분석하여 Kanban의 분포가 적절히 되어있는 경우 Kanban 방식이 CONWIP 방식보다 적은 WIP으로 동일 생산성에 도달함을 보였다. Lahadotiya *et al.*(2013)은 단일 제품 제조 공정에서 서비스 시간 분포가 지수 분포이며 시장이 무한한 경우에 있어 Kanban이 공정별로 최적으로 결정되어 있다면 Kanban 방식이 CONWIP 방식보다 더 유연하며 동일 생산성 대비 적은 WIP으로 생산이 가능하여 성능 측면에서 더 나음을 주장하였다. Sato *et al.*(2012) 및 Khojasteh-Ghamari(2009)는 모든 경우에 대하여 Kanban이나 CONWIP이 일방적으로 우세해진 않으며 Station별로 Kanban 수를 적절하게 배치하면 Kanban 방식이 CONWIP 방식보다 우수한 시스템의 예를 들어 이를 뒷받침하였다.

반면 Spearman *et al.*(1990, 1992)은 동일한 공정시간과 투입률 하에서 동일한 품질 요건을 만족하기 위해 CONWIP 시스템이 Kanban 시스템보다 적은수의 Kanban이 요구된다고 하며 간반 시스템의 대안으로 Bottleneck에서 WIP이 자연스럽게 쌓이기 때문에 더 높은 이용률을 나타내는 CONWIP이 우수하다고 주장하였다. Jodlbaur *et al.*(2008)은 안전재고, Kanban 수, 버퍼 수 등 각 모수 변화에 따른 Stability는 MRP가 가장 우수하지만 기계 고장, 셋업 타임, 수요 변동성 등 생산 환경의 변화에 따른 생산시스템의 강건성 측면에서는 CONWIP 방식이 가장 우수하다고 주장하였다. Li(2011)는 주문생산 환경에서 JIT와 CONWIP을 비교 하면서 JIT 방식에는 일방향 흐름 생산, Zero 셋업, 단일 제품 공정 등의 제약사항이 있는데 반해 CONWIP은 이러한 제한 조건과 무관하게 사용이 가능하며 특히 동적 환경에서도 사용할 수 있음을 보였다. Dar-El *et al.*(1999)은 복수의 병목공정이 있는 경우에 사이클 타임의 평균값 외에 분산 측면에서도 예측이 가능한 CONWIP 모델을 개발할 수 있음을 보였다. Lee *et al.* (2011)도 상수 공정시간을 갖는 라인 생산시스템에서 CONWIP과 Kanban 방

식을 시뮬레이션과 수학적 계산으로 비교하였는데 CONWIP 시스템이 Kanban 시스템보다 우수하다는 결론을 내었다. Onyeocha *et al.*(2015)은 Bonvik *et al.*(1997)에 의해 제안된 최종 단계를 제외한 매 공정에서 WIP 수준을 관리하는 방식인 HK(Hybrid Kanban) CONWIP과 기본 재고 모형인 BK(Basestock Kanban) CONWIP 방식을 시뮬레이션으로 비교하였다. 3개의 공정을 갖는 복수 제품을 생산할 수 있는 연속 라인에서 작업 시간을 정규 분포로 가정한 경우 BK-CONWIP이 HK-CONWIP 방식보다 효율적으로 CONWIP 통제가 가능함을 보여 CONWIP이 더욱 상세히 분화되어 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다. Gong *et al.*(2014)은 시스템 운영방식별로 처리해야 할 데이터양을 비교하였는데 MRP 방식이 Kanban 방식이나 CONWIP 방식보다 처리해야 할 정보가 많으며 CONWIP 방식에서 데이터양이 가장 적음을 보여 생산 결정에 소요되는 시간 측면에서 CONWIP이 가장 유리하다고 하였다. Chong *et al.*(2013)은 모델 믹스가 많고 모델 패밀리가 서로 다른 공정을 갖는 반도체 제조에 CONWIP 방식을 적용하여 현재 생산량 수준에서 보다 적은 WIP으로 생산이 가능함을 보이는 한편 단일 루프 CONWIP과 다중 루프 CONWIP을 비교하여 다중 루프가 단일 루프 보다 사이클 타임에서 보다 유리함을 보였다. Pettersen *et al.*(2009)은 WIP이 제한된 5개의 기계로 구성된 시스템에서 기계마다 동일 변동성을 갖는 확률 분포로 묘사하여 동일 WIP에서 CONWIP 방식이 Kanban 방식보다 높은 생산량을 가짐을 보이고 이론적으로는 CONWIP 방식이 Kanban보다 유리하지만 실제로 시스템에 CONWIP을 어떻게 적용할지 Guideline을 제공하는 것이 매우 중요하다는 것을 강조하였다.

기존의 연구들은 주로 자동화 기반으로 공정마다 변동성이 크지 않은 반도체, PCB, 자동차, 철강 금속 산업 등을 대상으로 하였다. 본 연구에서는 사람의 손이 절대적이어서 생산시간에 대한 변동성이 매우 크고 분석이 까다로운 신발 공정에도 CONWIP 방식이 적용 가능함을 시뮬레이션으로 보이고 Kanban 방식과 MRP 방식에 비하여 성능이 더 우수함을 검증하고자 한다. Kanban 방식이 CONWIP보다 우수하다는 기존의 연구들의 결과는 Kanban 수를 Station 별로 최적으로 관리해야 한다는 조건이 있는데, 신발 공장과 같이 매 Station에서 매일 작업자가 바뀌어 작업 시간의 특성이 변화하는 시스템에서는 매 Station마다 Kanban의 수를 수시로 관리할 수 없기 때문에 적용이 쉽지 않다. 또한 모델이 하

루 중에도 수시로 바뀔 수 있는 환경이기 때문에 Station 종류 및 배치 자체가 바뀌어 Kanban 수를 그때마다 Station 별로 최적화하기가 불가능한 실정이다. 본 연구는 변동성이 매우 큰 신발 공장의 특성을 파악하고 작업자나 Station이 매일 바뀌어 Bottleneck이 수시로 변화하는 신발 생산라인에 CONWIP 방식을 적용하는 경우의 효과를 연구하고자 한다.

3. 대상 시스템 및 새로운 운영전략

3.1 대상공정 설명

<Figure 2>는 현재의 신발 공정을 나타낸다. 신발 밑창은 IP(Injected Phylon), PU(Poly Urethane), CMP(Compression Moulded Preform) 중 하나가 고무 재질인 Outsole과 함께 결합이 되어 구성된다. 이렇게 신발의 밑창을 만드는 공정을 StockFIT이라고 부른다. 갑피의 부분품은 염색이나 Coating 작업 등의 선 처리 및 재단 작업을 거친 후 여러 재질의 Part들을 Hot Frequency 공정이나 열을 이용해 붙여서 만든다. 이렇게 만들어진 갑피 부분품은 Stitching 공정에서 재봉틀 등으로 결합된다. 완성된 갑피와 StockFIT 공정을 거친 밑창부분은 Assembly 공정에서 조립되어 신발로 완성된다.

본 논문은 위의 신발제조 공정에서 변동성이 비교적 큰 Stitching 공정을 대상으로 한다. <Table 1>은 Stitching 생산라인을 구성하는 공정명과 각 공정을 담당하는 작업자 수를 나타내고 있다. 대상 시스템은 24개의 공정으로 이루어져 있고 총 작업자는 32명이며 시간이 많이 걸리는 공정은 복수의 작업자가 동시에 맡고 있다. 모든 공정은 작업자의 수작업으로 진행되며 이러한 수작업은 생산시간에 대하여 많은 변동성을 유발하고 있다. 현재 Stitching 공정은 MRP를 기본으로 하는 Push형 생산방식으로 운영되고 있다. 일일 작업시간은 8시간이 기준이며 일정한 시간 간격(예 : 2시간 간격)으로 일정한 양의 자재가 공급된다. 시스템의 상태를 고려하지 않고 자재가 공급되기 때문에 시스템 내에 있는 WIP의 변동성이 크고, 생산 사이클타임이 너무 길어 생산라인의 통제가 어려운 상황이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Pull형 생산방식의 도입이 시도되고 있다.

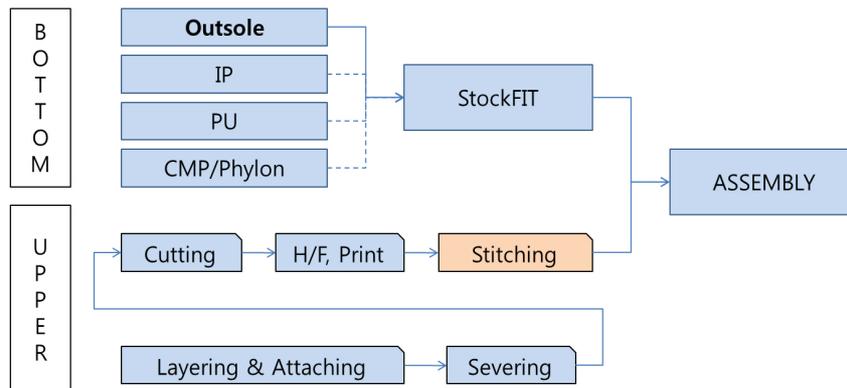


Figure 2. Footwear Manufacturing Process of the Target Factory

Table 1. Process name, production time and number of workers

No.	Process	# Workers
1	2 row stitch Tip to Vamp	1
2	Attach Eyestay lace loop and stitch Q'tr O'lay Med/Lat to upper	1
3	Insert Eyestay lace loop and stitch Q'tr O'lay Med/Lat to upper	1
4	Stitch Q'tr O'lay window to upper 1	2
5	Stitch Q'tr O'lay window to upper 2	2
6	Stitch Q'tr O'lay window to upper 3	2
7	Stitch Collar lining to upper	3
8	Stitch Collar lining both side	1
9	Zigzag Collar in to out	1
10	Zigzag stitch Foxing to Upper	2
11	Stitch middle line of zigzag	1
12	Hotmelt spray to tail of Vamp lining	1
13	Stitch Q'tr O'lay top edge to upper	2
14	Stitch Q'tr O'lay top edge to top	2
15	Stitch Counter to upper backside	1
16	Apply HMT spray on upper backside	1
17	Collar foam and then attach it	1
18	Apply HTM spray on Collar lining both side and Collar foam & Turn over	1
19	Hammering	1
20	Stitch upper bottom	1
21	Punching holes ID	1
22	Stitch Tongue to upper	1
23	Cleaning shoe lace	1
24	Insert shoe lace	1

3.2 Stitching 공정 시간 분석

본 논문의 연구를 수행하기 위한 선 작업으로 실제 재봉공정에서 작업하는 작업자의 시간분석을 수행하였다. 작업시간의 특성을 분석하기 위하여 개별 작업자의 작업 시간을 30회씩 측정하여 데이터를 얻고 이를 확률분포로 Fitting하였다. <Table 2>는 실측하여 얻은 각 작업장별 작업시간의 분포와 평균 시간 및 변동계수(CV, Coefficient Of Variation)를 나타낸다. 변동계수는 작업시간의 평균과 표준편차의 비율로 정의된다. 예를 들어 1번 공정의 경우 작업시간은 Lognormal 분포를 따르며 평균 작업시간은 32.4초이고 변동계수는 0.64이다. 3명의 작업자가 담당하는 7번 공정의 경우, 세 작업자의 생산시간 평균과 변동계수 및 Fitting된 확률분포가 서로 상이함을 알 수 있다. 재봉 공정에서 모든 작업자의 작업시간을 분석해본 결과 평균 변동계수는 0.315로 전반적으로 변

Table 2. Probability Distribution of Sewing Process

No	Distribution of process time	Mean	CV
1	15+LOGN(18.5, 29.4)	32.4	0.64
2	19+LOGN(6.29, 7.39)	25.4	0.30
3	18+GAMM(4.18, 1.7)	25.1	0.26
4A	48+LOGN(31.4, 52.3)	77.0	0.47
4B	NORM(78.5, 15.7)	78.5	0.20
5A	30+LOGN(24.5, 52.9)	56.3	0.75
5B	35+GAMM(66.8, 0.825)	90.12	0.65
6A	36+LOGN(29.5, 55.1)	60.83	0.42
6B	36+GAMM(47.5, 0.81)	74.51	0.54
7A	65.5+WEIB(28, 1.61)	90.70	0.18
7B	55.5+73×BETA(0.826, 2.08)	76.27	0.22
7C	55.5+WEIB(16.5, 1.48)	70.47	0.14
8	19+32×BETA(0.519, 2.71)	24.14	0.24
9	28.5+GAMM(11.1, 1.22)	42.00	0.27
10A	40.5+47×BETA(0.945, 1.44)	59.10	0.21
10B	36.5+GAMM(8.77, 1.5)	49.63	0.21
11	32.5+GAMM(10.6, 1.24)	45.60	0.30
12	20.5+WEIB(6.18, 1.53)	26.07	0.15
13A	33.5+LOGN(21, 33.4)	52.13	0.32
13B	NORM(44.4, 16.1)	46.73	0.34
14A	24.5+WEIB(19, 1.33)	42.00	0.32
14B	33+WEIB(26.8, 1.18)	58.35	0.36
15	NORM(25.3, 5.35)	25.31	0.21
16	18+LOGN(8.88, 11.2)	26.74	0.35
17	18+18×BETA(1.06, 1.96)	24.31	0.18
18	18+18×BETA(1.24, 2.24)	24.40	0.17
19	NORM(30.3, 10.9)	30.26	0.37
20	16+ERLA(2.84, 3)	24.51	0.21
21	19+24×BETA(1.05, 1.37)	29.40	0.22
22	20+LOGN(13.2, 18.8)	33.33	0.70
23	17+16×BETA(1.35, 1.56)	24.43	0.17
24	18+29×BETA(1.35, 1.56)	25.55	0.23

동성이 크게 나타나고 있어 WIP이 각 작업 사이마다 과도하게 쌓이는 근본적인 원인으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 시간분석 결과, 이 시스템의 병목공정(Bottleneck)은 11번 공정으로 하루 8시간 작업을 기준으로 할 때 최대 생산량은 631.6족임을 알 수 있다(최대생산량 = 8시간×60분×60초/45.6초 = 631.6).

<Figure 3>은 Stitching 공정에서 직접관측에 의한 작업시간 데이터를 확률분포에 Fitting한 예를 나타낸다. 여기서 작업자

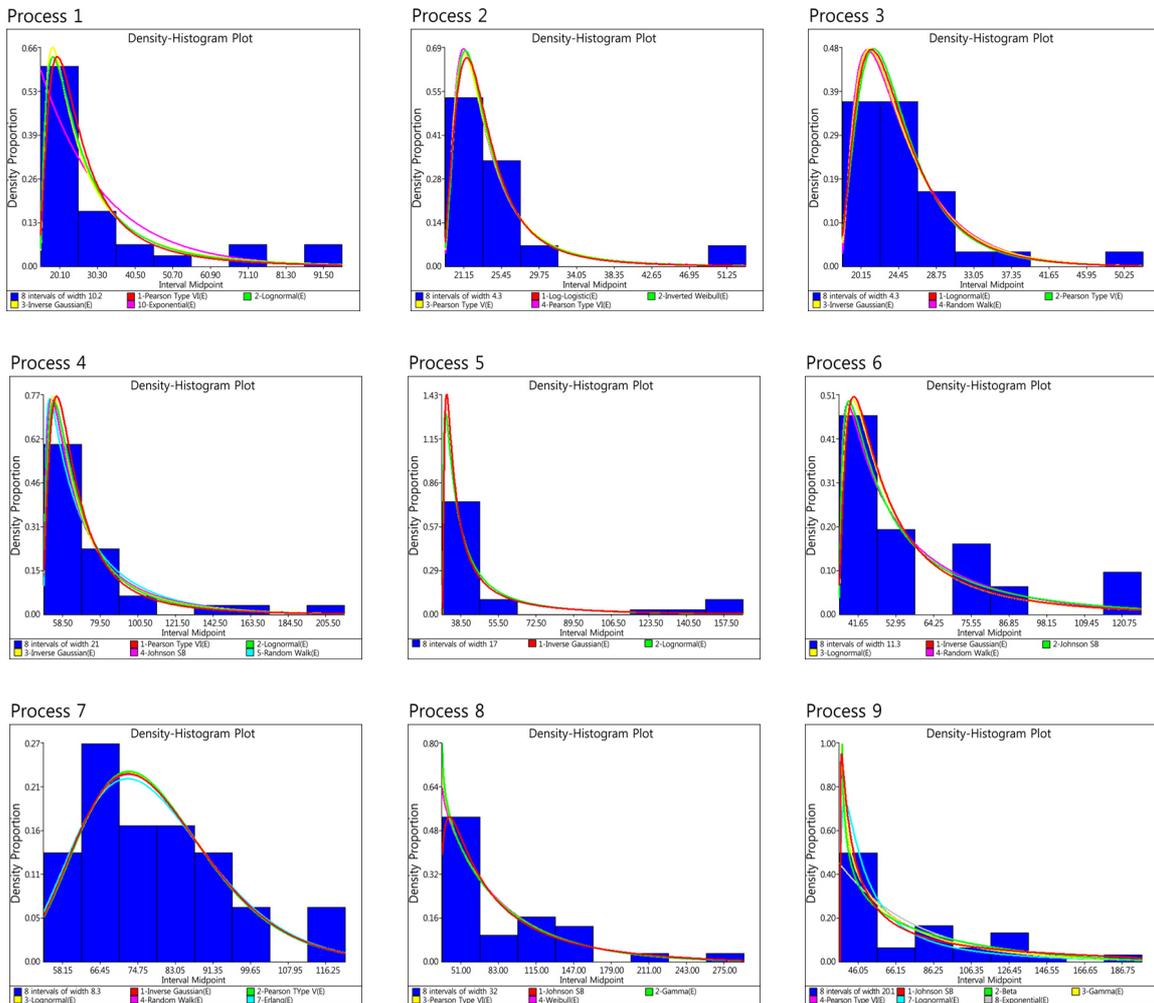


Figure 3. Examples of Production Time Distribution

의 작업시간 특성이 정규분포 곡선을 나타내기 보다는 Log-normal, Gamma, Beta, Weibull과 같은 우측 편 분포(Skewed right) 특성을 나타내어 예상치 못한 긴 작업으로 인해 큰 변동성이 발생함을 알 수 있다. 작업시간의 큰 변동은 WIP을 증가시키는 요인이 되며 버퍼가 충분하지 않다면 산출량의 감소로 이어진다. 이는 달리 말하면 변동성을 커버하기 위해서는 적정 수준 이상의 버퍼가 확보되어야 함을 보여준다. 만일 생산 사이클타임을 줄이기 위해 버퍼를 제한하면 산출량의 감소를 감수해야만 한다. 신발 공장에서 변동성이 크게 나타나는 주요 원인은 잦은 생산 계획의 변경, 자재 미확보, 불량으로 인한 재작업, 기계 고장에 미 대응, 작업자 작업의 미숙, 유틸리티 설비 문제, 혼류생산 등이다.

4. 시뮬레이션 실험 분석

4.1 시뮬레이션 실험 설계

CONWIP 방식과 Kanban 방식 및 MRP Push 방식을 적용하

는 경우의 생산성을 비교/분석하기 위하여 대상공정을 상용 소프트웨어인 ARENA를 이용하여 모델링하고 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 안정 상태에서의 산출량을 계산하기 위해 Warmup 시간을 늘려가면서 WIP 수준과 사이클 타임을 관찰하여 각 지표가 충분히 수렴하는 시간인 80시간의 Warmup 시간으로 정하였고 10일치 물량이 생산될 수 있는 80시간을 시뮬레이션하였다. 실험결과 통계적 오류를 제거하기 위하여 시뮬레이션 실험을 30회 반복하였다. 재봉 공정의 하루 근무 시간은 8시간이며 각 공정의 작업시간은 <Table 2>에서 보여준 측정된 분포와 동일하게 설정하였다. <Figure 4>는 재봉 공정의 Arena Model로, CONWIP 방식으로 시뮬레이션이 수행되는 예를 보여준다. 시뮬레이션 결과에서 WIP은 공정 내에 들어있는 모든 부품의 수이다. 즉 매 순간에 산출되는 양에서 투입된 양을 차감한 값이다. Kanban 방식이나 CONWIP 방식에서는 부품이 한 개씩 투입되므로 사이클타임이 순수하게 공정에서 보내어지는 시간이 되지만 Push 방식의 경우는 2시간마다 동시에 2시간 분량이 투입되므로 실제상황과 마찬가지로 WIP과 사이클타임이 과도하게 산출될 수 있다.

4.2 Push 방식의 생산성 평가

MRP를 기반으로 하는 Push 전략은 생산계획에 대응하기 위하여 투입량을 조절한다. 대상 공장에서는 2시간마다 한 번씩 자재를 공급하고 있다. 이를 시뮬레이션에 반영할 경우 8시간 작업시간 기준 하루 최대 가능 생산량인 631.6족의 1/4인 157.9 족을 넘어가는 경우 시뮬레이션 결과는 수렴할 수 없게 되므로, 병목 공정에서의 가동률(Utilization)이 100% 넘지 않는 수준에서 각기 다른 가동률의 3가지 시나리오로 시뮬레이션을 수행하였다. 병목 공정에서의 능력이 시스템의 능력이므로 위의 병목 공정에서의 가동률은 시스템의 가동률로도 볼 수 있다. <Table 3>은 일일 생산량과 WIP 수준을 나타낸다. Push 방식에서 가동률을 99.4%, 97.5%, 95.0% 수준을 확보하기 위하여 2시간 간격으로 157개, 154개, 150개를 각각 투입하였다. Push 방식에서의 생산량은 가동률이 100%를 넘지 않으면 투입량과 동일하다는 것을 알 수 있다. 즉 생산량이 통제할 수 있는 인자이다. Arena 모델링 시 실제 상황과 유사하게 2시간마다 가동률을 만족하는 수준의 자재를 일시에 생성하여 첫 공정 앞에 두었다. 생성된 자재들은 각 공정 시간만큼 시스템에서 시간을 보낸 뒤 마지막 공정을 마친 후 싸이클타임이 기록되며 소멸한다.

Table 3. Performance of MRP-based Push System

Utilization(%)	Production rate(day)	WIP
99.4	628.2	112.7
97.5	616.1	101.3
95.0	600.0	95.6

4.3 Kanban 방식의 생산성 평가

Pull 방식에서는 Push 방식과는 달리, 통제가능 인자가 생산량이 아닌 WIP 수준이다. Kanban 방식에서는 Kanban 수가 시스템의 WIP을 결정하고 생산성에도 직접적인 영향을 준다. Table 4는 각 공정별 허용 Kanban 수에 따른 일일 산출량과 WIP의 결과이다. 모든 공정은 동일한 수의 Kanban을 허용한다고 가정하였다. 실험결과를 보면, WIP 수준은 Kanban 수가 증가하면 비례적으로 증가하는 반면에, 일일 생산량은 Kanban 수를 늘리면 어느 정도까지는 증가하지만 일정 수준 이상에서는 Kanban 수를 늘려도 시간당 산출량이 더 이상 늘지 않는 것을 알 수 있다. 여기서는 Kanban 수 세 개까지는 산출량이 증가하다가, 그 이상에서는 기울기가 매우 완만하거나 정체되는 결과를 나타내고 있다. 따라서 생산량과 WIP 수준을 감안한 적절한 Kanban 수가 존재함을 알 수 있다. 만일 작업시간이 상대적으로 긴 11번 공정에서 Kanban 수를 더 늘리는 방법을 택했다면 전체적으로 Kanban 수를 크게 늘리지 않고도 생산량이 증가하는 최적의 값을 찾을 수 있을지도 모른다. 다만 여기서는 수시로 작업자나 모델이 바뀌는 신발 공장의 특성 상 현장에서 취할 수 있는 방법인 Kanban 수를 매 공정마다 동일한 수준으로 유지하는 방법을 택하였다. 이는 작업자마다 숙련도가 다르고 모델마다 공정이 달라지기 때문에 올바른 가정이다. Arena 모델링은 각 단계 앞에 버퍼(Buffer)를 두고 버퍼의 수를 가변하며 이를 Kanban의 수로 간주한다. 이 버퍼의 한계치만큼만 공정 앞에는 쌓일 수 있도록 하여 Kanban의 수를 통제한다.

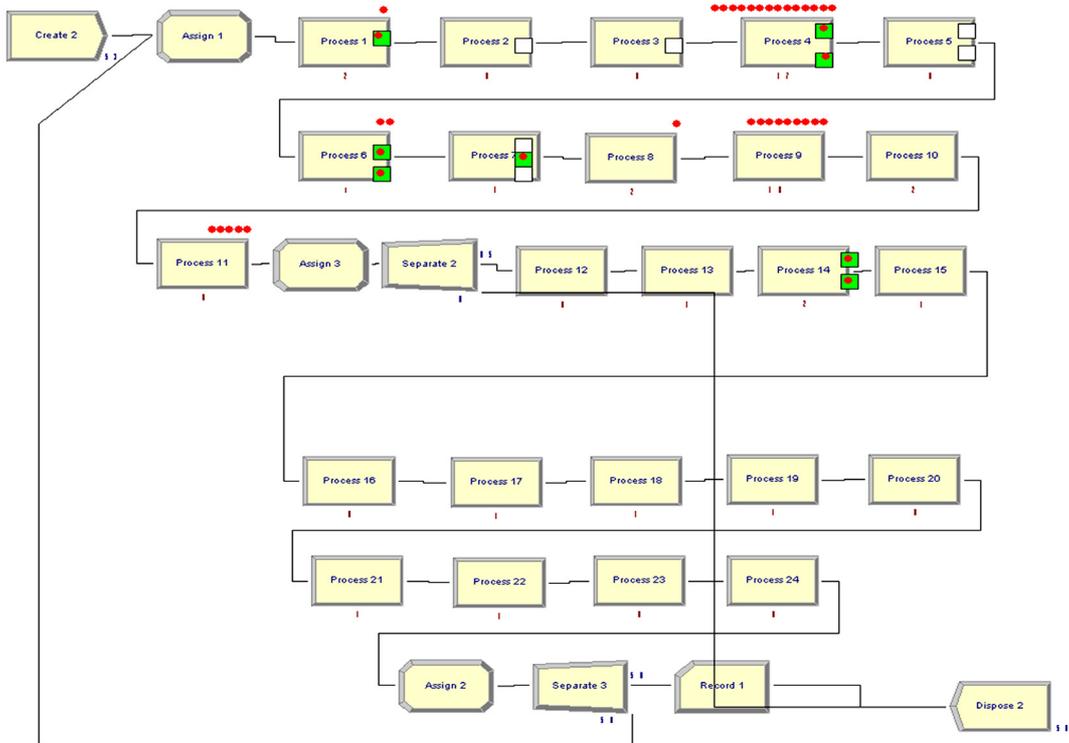


Figure 4. Arena Model for Stitching Process for CONWIP System

Table 4. Performance of Kanban-based Pull system

# Kanban	Production rate(day)	WIP
1	619.2	33.3
2	629.5	43.1
3	630.7	53.4
4	630.8	63.6
5	630.8	73.9
6	631.3	83.5

4.4 CONWIP 방식의 생산성 평가

재봉라인의 새로운 운영 방식으로 CONWIP을 적용하는 경우 첫 공정의 투입만을 통제하면 된다. 따라서 CONWIP 운영 방식은 재봉 라인과 같이 사람이 의한 변동성이 큰 생산 라인에서 생산 통제 측면에서는 Kanban 방식에 비해 간편한 방식이다. CONWIP 방식을 적용하기 위해서는 우선 적절한 CONWIP 수준을 결정해야 한다. <Figure 5>는 적정 CONWIP의 수를 알아보기 위해 CONWIP을 28개부터 증가시켜가며 산출량의 변화를 아레나를 활용하여 시뮬레이션 한 결과이며 X축은 재공재고 수준을 나타내며 Y축은 하루 생산량을 나타내는데, 대략 38개 수준에서 산출량이 최대생산능력(631.6개)에 접근함을 볼 수 있다. CONWIP 방식에서의 WIP 수준은 설정한 CONWIP의 수와 동일하다. 실제 현장에서의 CONWIP 수는 WIP 증가 대비 산출량 증가에 대하여 효율성을 따져서 결정될 것으로 예상된다. 이는 모델 믹스나 작업자 변동 등 다양한 측면에서 장기간 관찰 후 최적값을 택할 것으로 예상되어 본 연구의 범위를 넘어서므로 향후 과제로 남긴다. CONWIP 시스템의 Arena 모델링은 일정 CONWIP 수만큼 첫 공정에서 부품을 생성하고 공정의 마지막 부분에서 부품을 두 개로 분리하여 하나는 첫 공정으로 되돌리고 하나는 출력을 기록한 후 소멸시키는 방법을 취했다.

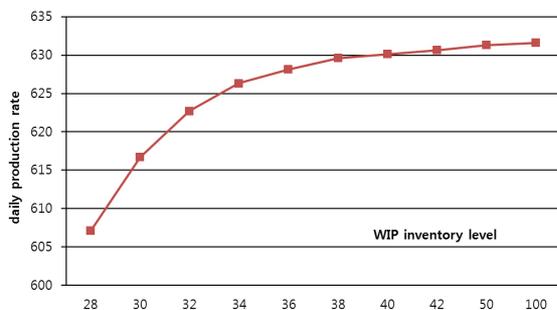


Figure 5. Production Rate over Different Number of CONWIPs

실험결과에 의하면 동일한 생산량을 확보하기 위해서 CONWIP 방식이 MRP 방식이나 Kanban 방식보다 적은 WIP 수준을 유지하면서 일정한 생산량을 달성할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 일일 생산량 630개를 생산하기 위해서 MRP는 100개 이상의 WIP 수준이 요구되고, Kanban 방식은 43개 이상의 WIP이 유지되어야 하지만, CONWIP 방식은 40개의 WIP 수준에서

도 목표생산량이 달성됨을 실험을 통해 확인하였다. 마찬가지로 일정한 수준의 WIP 수준을 유지하는 상태에서도 CONWIP 방식이 다른 두 방식보다 더 많은 생산량을 산출할 수 있음을 알 수 있다. <Figure 6>은 Kanban 방식과 CONWIP 방식에서의 X축의 재공재고 수준의 변화에 따른 일일 산출량을 Y축에 나타내어 비교한 결과인데 CONWIP 방식이 Kanban 방식에 비해 동일한 WIP 수준에서 산출량이 더 많음을 보여 준다.

<Figure 7>은 각각의 프로세스에서의 WIP을 MRP 방식과 CONWIP 방식에 대해 평균 WIP과 평균 최대 WIP을 공정마다 비교한 것으로, 예상한대로 MRP는 첫 번째 공정에서 WIP이 쌓여 있음을 알 수 있고 공정 시간이 긴 4번, 9번 11번 등에 WIP이 몰리게 됨을 알 수 있다. 반면 CONWIP의 경우는 Bottleneck 공정인 11번에서 WIP이 집중되어 있어 WIP이 자연스럽게 제약 공정에 쌓이게 되어 따로 제어가 불필요하다는 Spearman 등의 주장을 뒷받침하고 있다.

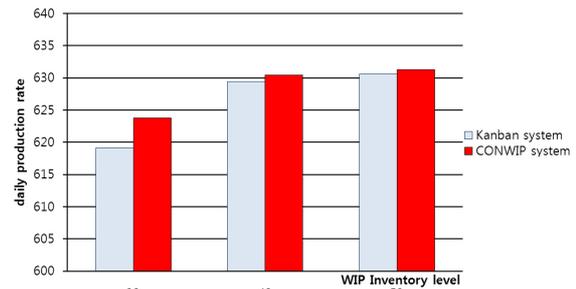


Figure 6. Performance Comparison of Kanban System and CONWIP System

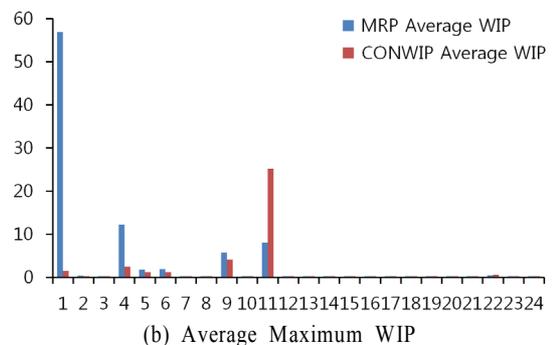
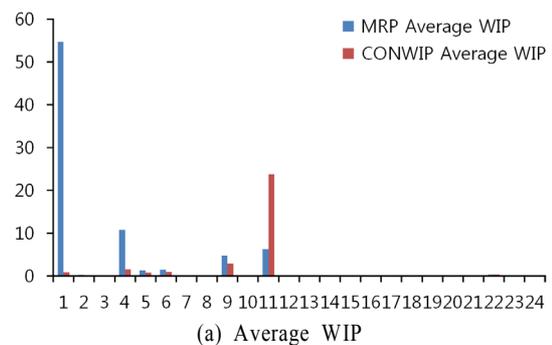


Figure 7. WIP Comparison of MRP and CONWIP System

5. 결론

전통적인 신발 제조 공정은 작업자로 인해 발생하는 변동성으로 말미암아 관리가 매우 어렵다. 본 연구에서는 변동성이 큰 신발의 제조 공정에서 CONWIP 방식이 Push 시스템인 MRP 방식과 순 Pull 시스템인 Kanban 방식에 비해 여러 가지 장점을 갖고 있는 것을 확인하였다. 기존 생산 방식인 MRP의 경우, 투입 전략에 따라 시스템이 매우 민감하게 반응하여 실시간으로 투입을 결정해야 하는 신발 재봉 공정의 경우 적용이 매우 까다롭다. 동일 산출량 대비 WIP 수준을 줄이기 위해서는 전통적인 신발공정과 같이 변동성이 아주 크게 나타나는 생산 시스템의 경우 MRP나 Kanban 방식보다는 CONWIP 방식이 우수한 성과를 보임을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. CONWIP 방식은 모든 공정에서 WIP 수준을 관리해야 하는 Kanban 방식과는 달리 생산라인의 입구만 통제하면 되므로 생산성 측면 뿐 아니라 적용성에 있어서도 보다 우수하므로 본 논문에서 Case로 다룬 신발 갑피 Stitching 공정과 같이 여러 세부공정을 거쳐 생산되는 긴 생산라인에서도 어렵지 않게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 Pull 방식의 하나인 CONWIP을 신발 갑피의 재봉공정에 한하여 적용하여 그 효과를 살펴보았는데, 신발 전체 공정을 관리하기 위해서는 갑피 부분과 함께 밀창 부분을 동시에 통제해야만 한다. 다음 과제로는 본 연구의 내용을 확장하여 신발 전체 공정에 대한 새로운 운영전략을 연구해보고자 한다.

참고문헌

- Bonvik, A. M., Christopher, C., and Gershwin, S. B. (1997), A comparison of production line control mechanisms, *International Journal of Production Research*, **35**(3), 789-804.
- Chong, K. E. and Lim, K. S. (2013), CONWIP based control of a semiconductor end of line assembly, *Procedia Engineering*, **53**, 607-615.
- Dar-El, E. M., Herer, Y. T., and Masin, M. (1999), CONWIP-based production lines with multiple bottlenecks : performance and design implications, *IIE Transactions*, **31**(2), 99-111.
- Gilland, W. (2002), A simulation study comparing performance of CONWIP and bottleneck-based release rules, *Production Planning*, **13**(2), 211-219.
- Gong, Q., Yang, Y., and Wang, S. (2014), Information and decision-making delays in MRP, Kanban, and CONWIP, *International Journal of Production Economics*, **156**, 208-213.
- Gstettner, S. and Kuhn, H. (1996), Analysis of production control systems Kanban and CONWIP, *International Journal of Production Research*, **34**(11), 3253-3273.
- Hopp, W. J. and Spearman, M. L. (1996), *Factory Physics*, McGraw Hill, New York.
- Jodlbauer, H. and Huber, A. (2008), Service level performance of MRP, Kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness, *International Journal of Production Research*, **46**(8), 2179-219.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., and Zupick, N. B. (2010), *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, International Edition.
- Khojasteh-Ghamari, Y. (2009), A performance comparison between Kanban and CONWIP controlled assembly systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **20**, 751-760.
- Lahadotiya, K. K., Pathak, R., and Pandey, A. K. (2013), Study of Kanban and CONWIP analysis on inventory and production control system in an industry, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, **2**(4), 148-154.
- Lee, H. C. and Seo, D. W. (2011), Comparison of CONWIP with Kanban in a production line with constant processing time, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, **36**(2), 51-65.
- Li, J.-W. (2011), Comparing Kanban with CONWIP in a make-to-order environment supported by JIT practices, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, **28**(1), 72-88.
- Muhammada, N. A., Chin, J. F., Kamarrudin, S., Chik, M. A., and Prakash, J. (2015), Fundamental simulation studies of conwip in front-end wafer fabrication, *Journal of Industrial and Production Engineering*, **32**(4), 232-246.
- Onyeocha, C. E., Wang, J., Khoury, J., and Geraghty, J. (2015), A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies in a multi-product manufacturing system, *Operations Research Perspectives*, **2**, 137-149.
- Pettersen, J.-A. and Segerstedt, A. (2009), Restricted work-in-process : A study of differences between Kanban and CONWIP, *International Journal of Production Economics*, **118**(1), 197-207.
- Sato, R. and Khojasteh-Ghamari, Y. (2012), An integrated framework for card-based production control systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **23**(3), 717-731.
- Spearman, M. L., Woodruff, D. L., and Hopp, W. J. (1990), CONWIP : a pull alternative to kanban, *International Journal of Production Research*, **28**(5), 879-894.
- Spearman, M. L. and Zazanis, M. A. (1992), Push and pull production systems : Issues and comparisons, *Operations Research*, **40**(3), 521-532.
- Takahashi, K. and Nakamura, N. (2012), Comparing reactive Kanban and reactive CONWIP, *Production Planning and Control*, **13**(8), 702-714.