Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol. 35, No. 1, pp.115－123, March 2012.

시뮬레이션을 통한 생산흐름통제시스템의 성능비교

박상근 · 하정훈†

홍익대학교 정보컴퓨터공학부 산업공학전공

Performance Comparison between Material Flow Control Mechanisms Using Simulation

Sang Geun Park · Chunghun Ha†

School of Information and Computer Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Material flow control mechanism is a kind of operational policy in manufacturing. It is very important because it varies throughput, throughput time, and work-in-process (WIP) under the same manufacturing resources. Many Researchers have developed various material flow control mechanisms and insisted that their mechanism is superior to others. However the experimental environment used in the performance comparison are different and impractical. In this paper, we set various manufacturing environments to fairly compare five previous material flow control mechanism : Push, Pull, CONWIP, Gated MaxWIP, and Critical WIP Loops. The simulation results show that the Push is superior to others in both of throughput and WIP if required demand is less than 80% of capacity. In addition, the performance of CONWIP and its variants are not different statistically.

Keywords : Material Flow Control, Simulation, Throughput, Work-in-Process, Push, Pull, CONWIP

1. 서 론

생산흐름통제시스템(Material Flow Control mechanism : 이하 MFC)은 작업물의 운영방식 또는 작업물의 투입정책에 따라 크게 Push, Pull, 그리고 Push-Pull Hybrid 시스템 세 가지로 구분할 수 있다. Push 시스템은 제품의 수요와 생산공정의 능력을 고려하여 생산계획 및 일정계획을 수립하고 작업물을 수립된 계획에 따라 생산공정에 투입하는 방식이다. 대표적인 Push 시스템으로는 material requirements planning(MRP)과 manufacturing resource planning (MRP Ⅱ)가 있다. Pull 시스템은 제품의 수요를 기반으로 생산계획을 수립하고 작업물은 각 생산공정의 상태에 따라 승인(authority)과정을 통하여 투입한다. 대표적인 Pull 시스템이 just-in-time(JIT)을 기본사상으로 하는 칸반(Kanban) 시스템이 있다. 마지막으로 Push-Pull Hybrid 시스템은 Push와 Pull의 두 가지 방식을 결합한 시스템으로 생산라인의 작업물 투입은 Pull 방식을 취하고 공정간 작업물의 이동은 Push 방식을 취한다. 대표적인 시스템으로는 constant work-in-process(CONWIP)와 drum-buffer-rope(DBR)가 있다.

Spearman et al.[10]에 의해 제안된 CONWIP은 그 우수성이 많은 연구자들에게 입증되었다[3, 5]. CONWIP 이후 이를 개선한 다양한 개선 시스템이 제안되었다[3, 4, 9, 10]. 그 중에서 주목할 만한 개선 시스템으로는 Grosfeld-Nir and Magazine이 제안한 Gated MaxWIP[4]과 Sepehri and Nahavandi가 제안한 Critical WIP loops[9]가 있다.

Gated MaxWIP(G-MaxWIP)은 균형된 흐름생산라인(balanced flow multistage production line)에서 투입부에 pace machine이라는 가상의 stage를 구성하고 이를 투입통제에 사

논문접수일 : 2012년 01월 12일　　게재확정일 : 2012년 02월 27일
† 교신저자 chunghun.ha@hongik.ac.kr

용하는 시스템이다. gate machine은 확정적(deterministic)이며 주기적인(periodic)인 투입신호에 따라 현재 생산라인의 총 WIP이 일정한 수준의 최대 가능 WIP(MaxWIP)보다 작으면 작업을 투입한다. Grosfeld-Nir and Magazine은 다양한 조건에서의 시뮬레이션을 통하여 Gated Max-WIP이 단순한 Pull 시스템이나 CONWIP보다 우수하며, 설비의 수가 4보다 적을 경우에는 Push 시스템보다 TP와 WIP 관점에서 우수하다고 주장하였다.

Critical WIP loops(CWIPL)는 균형된 흐름생산라인에서 작업의 투입통제에 사용하는 시스템으로서 생산라인의 총 WIP이 일정한 수준의 최대 가능 WIP 이하로 존재하거나 마지막 설비의 WIP이 정해진 수준이하일 경우 투입조건이 성립되며, 이 경우 첫 번째 설비가 유휴상태가 되면 작업을 투입한다. Sepehri and Nahavandi는 시뮬레이션을 통한 비교실험을 통하여 WIP 수준이 낮은 경우 CWIPL가 CONWIP보다 TT나 TH 관점에서 우수한 성능을 보이고 있으며 WIP 수준이 높은 경우는 동등한 수준을 보인다고 주장하였다. 또한 설비의 수가 9보다 적은 경우에 CWIPL이 G-MaxWIP보다 TT나 TH 관점에서 우수한 성능을 보이고 있으며, 설비의 수가 9보다 큰 경우에는 TT 관점에서는 G-MaxWIP과 동등 수준이며 TH 관점에서는 우수하다고 주장하였다.

위의 두 논문을 포함한 기존의 MFC 관련 논문들은 그 성능평가에 있어서 비현실적인 가정을 적용하고 있다. 예를 들어, 원자재는 무한대로 항상 공급되고 있으며, 수요 또한 무한대로 존재하여 생산된 제품은 모두 즉시 판매가 되는 가정을 하고 있다. 수요가 무한대로 존재하는 경우에는 상식적으로 기업의 최대 이익을 위해 다수의 WIP을 보유하더라도 최대생산능력에 가까운 TH을 달성하도록 Push 시스템을 사용하는 것이 가장 유리하다. 현실에서는 일반적으로 제품의 수요는 생산능력을 초과하여 발생하지 않고 수요의 크기에 따라 작업물을 제조에 투입한다. 본 논문은 보다 현실적인 생산환경에서 위에서 언급한 Push, Pull, CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL의 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하고 환경에 따라 가장 적합한 생산통제 시스템을 판단하는 것을 목적으로 한다. 생산환경은 원자재의 도착간격분포, 생산라인의 공정의 수, 각 생산흐름통제시스템의 파라미터 변경을 통하여 구성하며, 그 성능은 TT, WIP, 그리고 TH의 관점에서 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 제 2장에서는 본 연구에 적용한 5가지 MFC에 대한 특징과 실험에 적용한 가정, 그리고 시뮬레이션 모델에 대한 설명을 한다. 제 3장에서는 본 연구에서 적용한 실험환경을 설명한다. 제 4장에서는 TH, TT, 그리고 WIP 관점에서 실험결과를 분석하고 세 가지 Hybrid 방식의 SFC에 대한 통계적 검정을 시행한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 논문의 결과를 요약한다.

2. 생산흐름통제시스템

2.1 기본 공통가정

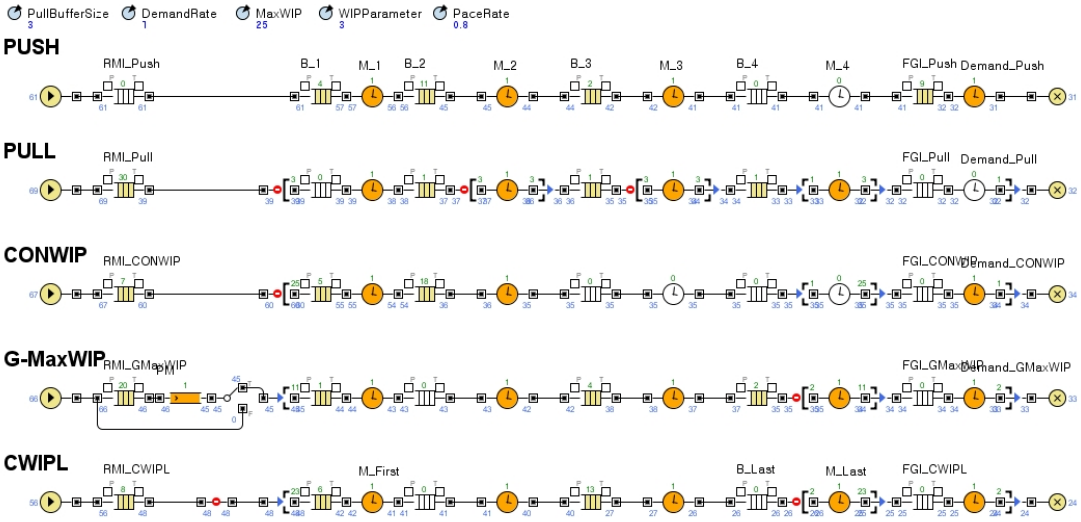
동등한 조건에서 5가지의 생산흐름통제시스템을 비교하기 위하여 시뮬레이션 시 다음과 같은 기본가정을 공통적으로 적용하였다.

- 직렬흐름생산공정(serial flow production line)이다.
- 각 공정은 단일설비로 구성되어 있으며 각 공정의 작업시간과 최대생산능력은 동일(balanced)하다.
- 각 설비의 생산시간(processing time)은 잘 알려진 분포이다.
- 생산라인을 구성하고 있는 기계들은 고장이 나지 않는다.
- Setup time은 존재하지 않는다.
- 비동시성을 지닌다. 두 가지 부품이나 재공품이 동시에 움직이거나 운반되지 않는다.
- Pull 시스템의 모든 버퍼의 크기는 동일하며, 나머지 시스템의 모든 버퍼의 크기는 무한대이다. 단, CWIPL의 마지막 공정의 버퍼의 크기는 특정한 크기(WIP parameter)를 적용한다.
- 수요와 투입은 동일하다. 즉, 원자재의 투입은 수요의 분포와 동일한 분포를 갖는다.

2.2 Push System

Push 시스템은 완제품에 대한 수요예측과 판매주문을 수집하고 납기일을 중심으로 MRP와 같은 로직을 사용하여 역산하여 원자재의 투입시기를 결정한다. 투입된 자재는 특별한 제어나 통제 없이 선공정의 작업이 끝나면 후공정으로 자동적으로 이송되며 완제품으로 완성되어진다(<그림 1> PUSH 참조). 수요가 증가하면 작업의 투입량이 많아지므로 각 공정에 대기작업이 많아지고 이에 따라 WIP의 수준이 높아지고 이는 TT의 증가를 유발한다. 또한 모든 공정의 가동률이 높아지고 TH은 최대생산능력(CAPA)에 가까워지게 된다.

Push의 가장 큰 단점은 작업물의 투입통제가 이루어지지 않으므로 수요가 증가하면 WIP이 급격히 증가한다는 점이다. 그러나 현실에서는 공정의 상태를 고려하지 않고 무한정으로 투입하는 경우는 없다. 따라서 본 연구에서는 Push의 첫 번째 Machine 앞의 버퍼(B_1)의 크기를 15로 제한하여 생산라인으로의 과도한 투입을 방지한다. 단, 원자재는 수요와 동일한 수준으로 구매하여 RMI(Raw Material Inventory)에 저장한다.



<그림 1> 5가지 생산흐름통제시스템의 AnyLogic 시뮬레이션 모델

2.3 Pull System

Pull 시스템은 후공정의 상태에 따라 선공정의 자재를 투입하는 방식으로(<그림 1> PULL 참조)이다. Pull 시스템에서 전체 생산라인의 WIP은 각 공정에서 허용하는 WIP(Kanban에서는 공정간 Card의 개수)의 합이다. <그림 1>에서 "[ ]"은 "[ ]"안의 WIP을 설정된 최대값 내에서 운영되도록 하며, 이 값을 초과하면 투입을 정지시킨다. Pull은 모든 공정에서의 WIP이 제한되므로 전체공정의 WIP도 제한되며, 따라서 TT도 제한된다. 반면 제한되는 WIP의 정도에 따라 설비의 가동률이 변화하여 충분한 WIP이 설정되지 않는다면 TH이 낮아지게 된다. 또한 생산공정이 길어지거나 사용되는 다양한 제품의 혼류생산으로 인하여 부품의 종류가 증가하면 전체 생산라인의 WIP 또한 증가하여 Pull의 장점인 낮은 수준의 WIP과 짧은 TT, 즉 빠른 대응력이 감소한다.

기존의 논문들은 완제품의 무한수요와 원자재의 무한공급을 기본으로 하고 있다. 그러나 이는 매우 비현실적이며 Push에는 불리한 설정이다. 본 논문에서는 공정한 평가를 위하여 공정의 마지막에 FGI(Final Goods Inventory)와 수요(Demand)소비 단계를 구축하여 시뮬레이션을 구성하였다. 원자재 또한 수요와 동등한 수준에서 구매가 완료되며 이는 RMI에 저장되어 생산라인의 투입지시에 따라 투입된다. 이러한 가정은 생산라인의 투입이 Pull 방식을 따르는 CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL에 공통적으로 적용된다.

2.4 CONWIP

CONWIP 시스템은 생산라인에서 보유할 수 있는 최대 WIP(MaxWIP)을 미리 설정하고 이를 초과하지 않도록 작업물의 투입을 통제한다(<그림 1> CONWIP 참조). 생산라인 WIP이 최대값과 동일하다면 완제품이 생산라인을 빠져나올 때 새로운 작업물이 생산라인으로 투입된다. 즉, 원자재 또는 부품이 생산라인에 투입되는 과정은 Pull 시스템 특징을 가지고 있고, 생산라인에 투입된 이후부터는 Push 시스템 특징을 가지고 움직이게 된다.

2.5 Gated MaxWIP System(G-MaxWIP)

G-MaxWIP은 CONWIP과 라인통제 방법은 동일하나 첫 번째 공정 앞에 pace machine이라는 가상의 공정을 적용한다(<그림 2> G-MaxWIP 참조). pace machine은 실제 작업을 수행하지는 않고 단지 원자재나 부품의 투입을 통제하는 역할만 한다. 생산라인에 부품을 투입하라는 신호가 발생하면 pace machine은 자신의 고정된(deterministic) pace에 맞추어 원자재를 투입한다. 전체 생산라인의 WIP이 정해진 수준(MaxWIP)까지 도달하게 되면 생산라인은 blocked 상태가 되고 부품을 투입할 수 없다는 신호를 pace machine에 보낸다. 여기서 pace machine을 생산라인의 일부로 볼 것이냐 아니냐에 따라 WIP 통계값 도출 시 몇 가지 선택사항이 발생한다 : 1) pace machine이 하나의 공정으로서 WIP을 항상 가지고 있다고 가정하는 경우; 2) pace machine이 WIP을 가지고 있지 않고 gate 역할만 하는 경우; 3) 생산라인이 blocked 되었을 때만 pace machine에 하나의 WIP을 갖는다고 가정한 경우가 그것이다. Grosfeld-Nir and Magazine[2]은 선택사항 1)과 2)의 절충안으로서 3)을 선택하였으나, 본 논문에서는 pace machine은 생산라인으로 간주하지 않고 2)로 가정하였다. 이는 G-MaxWIP의 평균 WIP을 감소시키므로 G-MaxWIP에 유리한 설정이다.

2.6 Critical WIP loops(CWIPL)

CWIPL 또한 CONWIP을 기본적 메카니즘으로 채용하고 있다. CONWIP과의 차이점은 사이클타임을 줄이고 산출율을 높이기 위해 첫 번째 공정과 마지막 공정의 상태에 따라 원자재나 부품의 투입을 결정하는 복합 규칙을 적용한다는 점이다.

흐름생산라인의 TH은 마지막 공정의 TH와 동일하므로 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$TH = u_n(1-P_n)$$

여기서, n은 생산라인의 공정의 개수, u_n은 마지막 공정의 생산능력, P_n은 마지막 공정의 총 유휴시간의 비율을 의미한다. 생산능력은 변하지 않는다고 가정하면 마지막 공정의 총 유휴시간을 줄이는 것이 TH를 높일 수 있는 방법이다. CWIPL 시스템은 마지막 공정에서 작업공전(starvation)상태가 발생하지 않도록 마지막 공정의 버퍼크기(WIPparameter)를 충분히 제공하여 WIP이 첫 번째 공정에서 마지막 공정까지 도달할 때까지 시간을 벌어줄 수 있는 역할을 하도록 한다. WIPparamter 값은 반복 실험을 통하여 생산라인의 책임자가 최적의 TT와 TH가 나오는 임계값을 찾아야 한다. 또한 CWIPL은 사이클타임을 줄이기 위해 첫 번째 공정이 유휴상태가 아니면 부품 또는 원자재를 투입하지 않는다.

CWIPL 시스템의 원자재나 부품의 투입조건은 다음과 같다.

- A : 마지막 공정의 WIP < WIPparamter
- B : 생산 라인의 총 WIP < MaxWIP
- C : 첫 번째 공정이 유휴 상태
- 투입조건 : (A or B) and C

3. 실험환경

생산 물류의 흐름에 대한 시뮬레이션은 Discrete Event Simulation에 특화된 ARENA가 범용적으로 사용되나[1], 본 연구에서는 AnyLogic을 이용하여 5가지 MFC의 시뮬레이션 모델을 <그림 1>과 같이 구성하였다. XJ Technologies사에 의해 개발된 AnyLogic[5]은 System Dynamics, Discrete Event, 그리고 Agent Based modeling이 모두 가능한 통합 시뮬레이터로서 생산, 물류, SCM을 비롯하여 재무, 교통, 헬스케어 등 다양한 분야에 응용이 가능하다[2]. 본 연구에서는 시스템의 동작의 유연한 통제를 위하여 하게 JAVA Coding을 이용할 수 있는 Anylogic을 활용하였다.

실험환경은 <표 1>과 같이 구성하였다. 총 실험은 <표 2>와 같이 504개의 시나리오로 구성되어 있고, 각 시나리오에 대하여 5회 반복을 실시하여 총 2,520회의 실험을 실시하였다. 각 실험별 실험시간은 10,000시간을 적용하였고 이 중 1,000 시간은 Warm-up time으로 간주하여 데이터 집계에서 제외하였다. 실험결과는 5회 반복 실험의 평균값을 이용하였다.

<표 1> 실험환경

실험환경 조건	내용
도착간격분포(in)	Exponential(0.6), Exponential(0.8), Exponential(1.0)
Machine의 수(n)	5, 10, 15
Machine Processing Time(t)	Exponential(1.0)
Pull Buffer Size(pbs)	2, 4, 6, 8, 10
MaxWIP(mw)	2n, 4n, 6n, 8n, 10n
pace machine rate(pmr)	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5
WIPparameter(wp)	5, 10, 15, 20
Simulation Time	10000
Warm-up Time	2000
Repetition(r)	5

<표 2> 실험환경에 따른 실험횟수

	ip	*n*	*pbs*	*mw*	*pmr*	*wp*	total
Push	3	3					9
Pull	3	3	5				45
CONWIP	3	3		5			45
G-MaxWIP	3	3		5	5		225
CWIPL	3	3		5		4	180
Total							504

4. 실험결과

Pull의 경우 공정간 버퍼크기가 증가하면 TH과 WIP이 증가하며, CONWIP의 경우 MaxWIP이 증가하면 TH과 WIP이 증가한다. G-MaxWIP의 경우는 MaxWIP이 증가하면 TH과 WIP이 증가하고 Pace Rate가 증가하면 TH이 증가하다 일정한 수준에서 로그함수 형태로 비선형적으로 수렴한다. CWIPL의 WIPparameter 또한 증가할수록 WIP과 TH가 로그함수 형태로 비선형적으로 증가하다 일정하게 수렴한다. 본 논문의 목적이 각 MFC에 적합한 파라미터를 찾는 것이 아니므로 실험결과는 가장 우수한 성능을 갖는 결과만 요약하였다. <표 3>에는 각 실험환경에 대하여 최대 TH를 달성한 경우의 파라미터 값과 결과값을 정리하였다. <표 4>에는 각 실험환경에 대하여 동등 또는 유사한 WIP 수준에서 최대 TH을 달성한 경우의 파라미터 값과 결과값을 제시하고 있다.

<표 3> 실험환경에 따른 최대 TH을 갖는 각 MFC 방법의 TT, TH, WIP

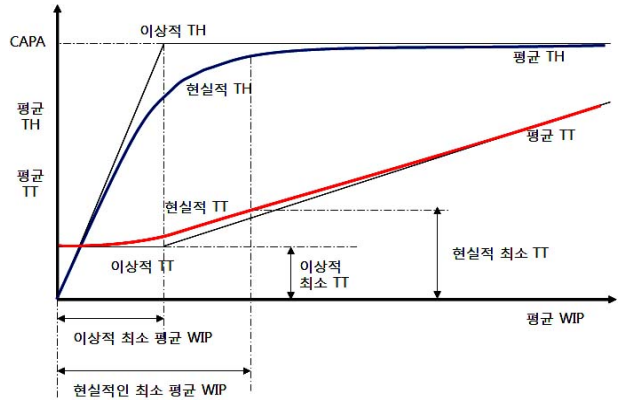
도착간격 분포	n	매커니즘	Maxwip	공정간 Buffer	Pace Rate	WIP parameter	TT	TH	WIP	RMI	FGI
Exp(0.6)	5	Push		∞			12.4042	0.6014	7.4589	0.00	68.80
		Pull		4			22.0916	0.5974	13.1916	28.26	10.64
		Conwip	10	∞			16.1164	0.5950	9.5893	62.30	10.82
		G-MaxWIP	40	∞	0.75		53.2768	0.5952	31.7053	38.02	11.92
		CWIPL	10	∞		10	15.9780	0.5938	9.4866	60.51	10.83
	10	Push		∞			24.8046	0.5938	14.7362	0.00	64.93
		Pull		6			77.8556	0.5892	45.8290	52.34	12.18
		Conwip	20	∞			32.3256	0.5886	19.0212	74.54	10.99
		G-MaxWIP	80	∞	1		98.2242	0.5944	58.3996	36.04	11.48
		CWIPL	40	∞		10	47.4002	0.5918	28.0524	37.80	10.89
	15	Push		∞			37.5454	0.6006	22.5513	0.00	75.10
		Pull		10			120.4768	0.5848	70.3575	7.21	11.24
		Conwip	60	∞			91.2394	0.5898	53.7704	54.89	12.24
		G-MaxWIP	150	∞	1.5		102.1300	0.5926	60.5737	0.14	11.45
		CWIPL	60	∞		15	75.1328	0.5896	44.3026	12.40	10.95
Exp(0.8)	5	Push		∞			25.6904	0.7938	20.4119	0.08	84.36
		Pull		10			36.8044	0.7842	28.8416	51.18	8.66
		Conwip	50	∞			55.1526	0.7854	43.2780	52.70	9.57
		G-MaxWIP	40	∞	1.5		46.9542	0.7890	37.0198	57.61	10.00
		CWIPL	30	∞		20	37.2272	0.7890	29.3714	109.03	9.92
	10	Push		∞			49.9318	0.7942	39.6724	0.04	69.91
		Pull		10			80.1552	0.7806	62.5260	58.80	9.51
		Conwip	80	∞			98.4246	0.7824	76.9933	72.93	10.47
		G-MaxWIP	100	∞	1.5		107.5086	0.7828	84.1232	25.65	10.11
		CWIPL	80	∞		20	78.4630	0.7742	60.7484	102.38	8.92
	15	Push		∞			75.6812	0.7822	59.2093	0.17	68.14
		Pull		10			123.7192	0.7742	95.7266	87.58	9.64
		Conwip	120	∞			136.6478	0.7838	107.0522	38.98	10.30
		G-MaxWIP	90	∞	1.5		103.4674	0.7796	80.6437	35.86	9.94
		CWIPL	120	∞		20	120.8244	0.7616	92.0071	173.57	8.08
Exp(1)	5	Push		∞			222.2966	0.9534	211.8132	59.70	34.00
		Pull		10			31.1706	0.8486	26.4528	991.83	3.92
		Conwip	50	∞			53.4040	0.9020	48.1691	586.24	5.58
		G-MaxWIP	50	∞	1.5		53.7910	0.9078	48.8299	541.28	5.63
		CWIPL	50	∞		20	49.7416	0.8918	44.3586	698.75	4.94
	10	Push		∞			330.9632	0.9304	307.7622	108.02	20.08
		Pull		10			64.7280	0.8296	53.6932	1062.79	3.46
		Conwip	100	∞			106.6078	0.8968	95.5955	604.97	5.66
		G-MaxWIP	100	∞	1.5		108.9430	0.8984	97.8715	491.79	5.83
		CWIPL	100	∞		20	98.5358	0.8690	85.6248	815.85	4.61
	15	Push		∞			455.9232	0.9128	416.2857	28.29	20.71
		Pull		10			96.2766	0.8200	78.9418	1095.63	3.25
		Conwip	150	∞			163.0442	0.8850	144.2962	594.52	5.57
		G-MaxWIP	150	∞	1		160.5390	0.8902	142.9044	576.15	5.52
		CWIPL	150	∞		20	152.0236	0.8538	129.7883	793.34	4.25

<표 4> 실험환경에 따른 동일수준의 WIP에서 최대 TH을 갖는 각 MFC 방법의 TT, TH, WIP

도착간격 분포	n	매커니즘	Maxwip	공정간 Buffer	Pace Rate	WIP parameter	TT	TH	WIP	RMI	FGI
Exp(0.6)	5	Push		∞			12.4042	0.6014	7.4589	0.00	68.80
		Pull		2			13.3892	0.5752	7.7009	134.14	8.54
		Conwip	10	∞			16.1164	0.5950	9.5893	62.30	10.82
		G-MaxWIP	10	∞	0.75		14.0826	0.5856	8.2474	64.09	10.58
		CWIPL	10	∞		15	15.5396	0.5852	9.0971	35.67	10.50
	10	Push		∞			24.8046	0.5938	14.7362	0.00	64.93
		Pull		2			26.8220	0.5634	15.1113	235.27	6.48
		Conwip	20	∞			32.3256	0.5886	19.0212	74.54	10.99
		G-MaxWIP	20	∞	0.75		29.1720	0.5828	16.9973	65.77	10.28
		CWIPL	20	∞		5	31.0224	0.5834	18.0955	67.43	9.68
	15	Push		∞			37.5454	0.6006	22.5513	0.00	75.10
		Pull		2			40.5880	0.5508	22.3554	297.28	5.92
		Conwip	30	∞			49.2758	0.5896	29.0580	56.95	11.37
		G-MaxWIP	30	∞	1.25		44.2342	0.5802	25.6693	14.33	9.68
		CWIPL	30	∞		5	47.0380	0.5758	27.0844	102.18	8.69
Exp(0.8)	5	Push		∞			25.6904	0.7938	20.4119	0.08	84.36
		Pull		8			32.2696	0.7800	25.1711	94.60	8.90
		Conwip	20	∞			25.5950	0.7706	19.7220	187.08	9.17
		G-MaxWIP	20	∞	1.5		24.8080	0.7746	19.2162	102.83	8.44
		CWIPL	20	∞		15	25.5738	0.7762	19.8505	108.34	8.90
	10	Push		∞			49.9318	0.7942	39.6724	0.04	69.91
		Pull		8			60.1678	0.7702	46.3471	74.25	8.15
		Conwip	40	∞			51.0418	0.7678	39.1882	123.41	9.00
		G-MaxWIP	40	∞	1.5		50.3424	0.7718	38.8479	174.51	8.84
		CWIPL	40	∞		20	50.7312	0.7644	38.7772	226.78	8.89
	15	Push		∞			75.6812	0.7822	59.2093	0.17	68.14
		Pull		8			101.5748	0.7606	77.2376	111.85	8.74
		Conwip	60	∞			76.9810	0.7646	58.8445	166.45	9.59
		G-MaxWIP	60	∞	1.25		75.0502	0.7696	57.7565	120.57	8.85
		CWIPL	60	∞		20	74.9796	0.7590	56.9063	174.52	8.35
Exp(1)	5	Push		∞			222.2966	0.9534	211.8132	59.70	34.00
		Pull		10			31.1706	0.8486	26.4528	991.83	3.92
		Conwip	40	∞			43.0614	0.8984	38.6852	582.34	5.33
		G-MaxWIP	40	∞	1		40.7386	0.8950	36.4588	630.07	4.82
		CWIPL	50	∞		10	45.2944	0.8624	39.0626	871.12	4.34
	10	Push		∞			330.9632	0.9304	307.7622	108.02	20.08
		Pull		10			64.7280	0.8296	53.6932	1062.79	3.46
		Conwip	80	∞			87.6794	0.8840	77.5078	652.39	4.99
		G-MaxWIP	80	∞	1.5		88.6700	0.8832	78.3099	660.67	5.24
		CWIPL	100	∞		20	98.5358	0.8690	85.6248	815.85	4.61
	15	Push		∞			455.9232	0.9128	416.2857	28.29	20.71
		Pull		10			96.2766	0.8200	78.9418	1095.63	3.25
		Conwip	90	∞			103.5702	0.8508	88.1181	935.81	4.31
		G-MaxWIP	90	∞	1		101.2184	0.8496	85.9939	915.29	4.18
		CWIPL	90	∞		15	101.2680	0.8314	84.1889	1008.51	3.41

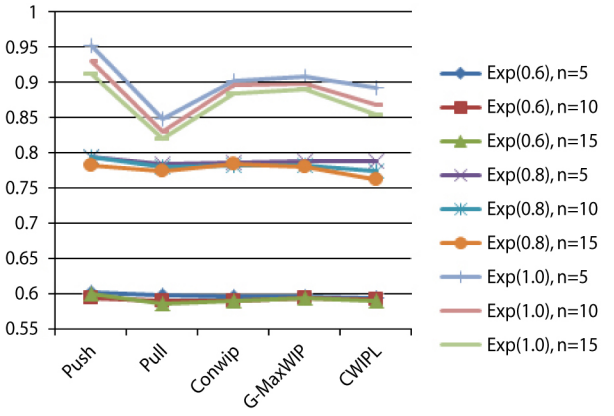
4.1 TH 관점 분석

생산흐름통제의 궁극적인 목표는 전 공정시간(through-put time : 이하 TT : 하나의 작업물이 생산라인의 전 공정을 거치는 장기평균시간)와 재공품재고(work-in-process : 이하 WIP)를 낮은 수준으로 유지하면서 산출률(through-put : 이하 TH : 단위시간당 생산량)를 원하는 목표로 제어하는 것이다. Little의 법칙($WIP = TH \times TT$)에서 알 수 있듯이 TT, WIP, 그리고 TH 간에는 상충관계가 존재한다(<그림 1> 참조). WIP이 증가하면 TH이 CAPA(최대생산능력)에 수렴하며 증가하므로 원하는 목표를 달성할 수 있지만, 상대적으로 TT 또한 증가하여 생산라인의 민첩성을 저해한다. 반대로 WIP을 감소시키면 TT는 감소하지만 TH 또한 감소하여 생산 효율성이 감소하게 된다. 따라서 가장 효율성이 높은 MFC는 동일한 TH을 창출할 수 있다면 낮은 WIP과 짧은 TT을 유지하는 MFC라고 할 수 있다.

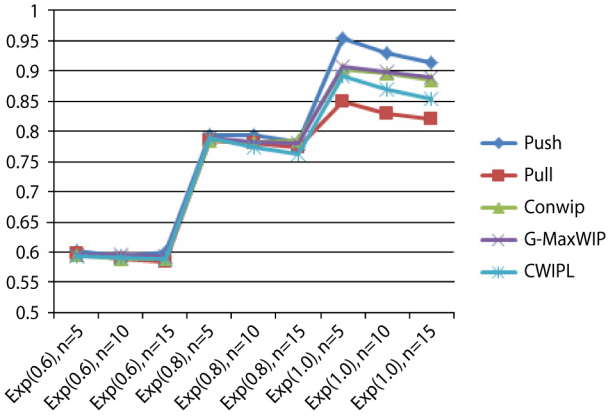


<그림 2> TH, WIP, 그리고 TT 간의 관계[3]

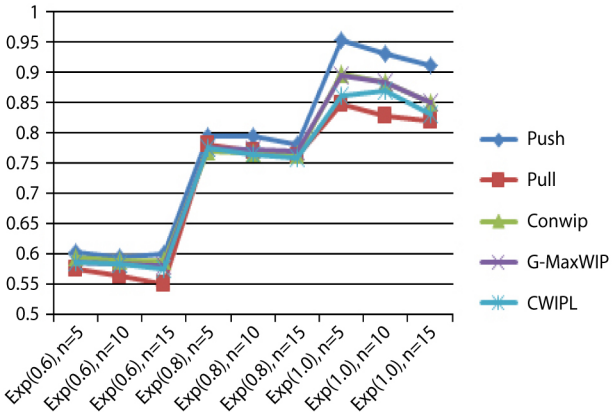
실험환경에 따른 TH의 변화는 <그림 2>에서 <그림 3>에 제시하였다. 도착간격분포가 Exp(0.6)인 경우(최대생산능력이 수요보다 큰 경우)에는 공정의 수나 MFC 방법에 관계없이 수요를 잘 만족하고 있다. 생산공정도 원활히 흐르고 있어 아무 문제도 발생하고 있지 않다. 예상한대로 TH 관점에서는 어느 환경에서도 Push가 가장 우수한 결과를 보이고 있다. 도착간격분포가 Exp(0.8)인 경우(최대생산능력에 수요가 다소 근접한 경우)에는 Push가 다른 방법보다 우수한 결과를 도출하고 있으며 Pull은 전반적으로 TH이 낮다. CWIPL의 경우도 저자가 언급한대로 공정의 수가 증가하면 TH이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 도착간격분포가 Exp(1.0)인 경우(수요가 최대생산능력과 동일한 경우)에는 Push의 TH가 월등히 높으며 Pull의 TH가 가장 낮다. CWIPL의 경우는 CONWIP이나 G-Max-WIP보다 낮은 TH을 보이고 있다. Pull은 공정간 버퍼의 크기가 최대 10으로 제한되어 있고, CWIPL은 마지막 공정의 버퍼의 크기가 20으로 제한되어 있어 TH 저하의 원인이 될 수 있다. <그림 4>는 동등 수준의 WIP을 가질 때의 TH(Exp(1.0)일 때 Push는 제외)을 비교한 그래프인데, 그림에서 Push의 TH이 가장 우수하며, CONWIP과 G-MaxWIP은 거의 유사하고 CWIPL과 Pull은 TH이 좋지 않음을 확인할 수 있다.



<그림 3> MFC에 따른 TH의 차이(최대 TH)



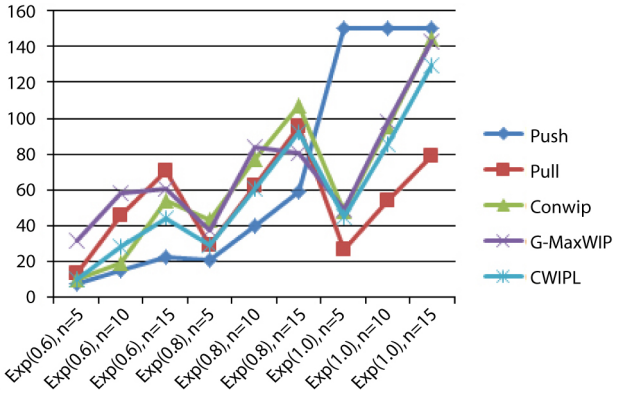
<그림 4> 실험환경에 따른 TH의 변화(최대 TH)



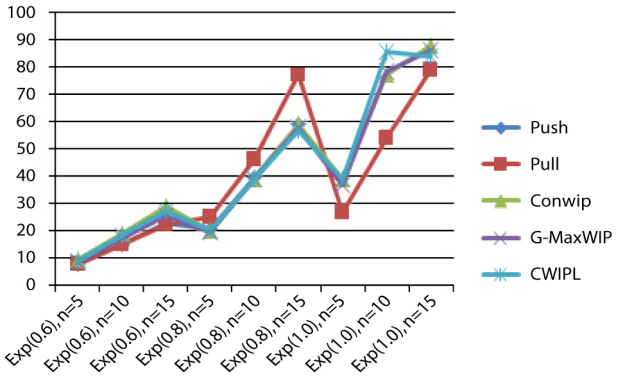
<그림 5> 실험환경에 따른 TH의 변화(동등 WIP)

4.2 WIP과 TT 관점

TH이 거의 상수값을 가지므로 WIP과 TT은 Little의 법칙에 의하여 거의 유사한 행태를 가진다. 따라서 본 논문에서는 WIP의 관점에서만 분석한다. <그림 6>은 최대 TH를 가질 경우 각 생산환경에 따른 WIP의 변화이다. 예상했던 대로 Exp(1.0)(최대생산능력 = 수요)일 때 Push의 WIP이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다(<그림 6>에서는 지면 관계상 최대 150으로 제한하였다). CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL은 유사한 수준의 WIP을 보유하고 있음을 알 수 있다. 주목해야할 점은 Push의 경우 도착간격분포가 Exp(1.0)일 경우에는 WIP이 급격히 증가하지만 Exp(0.6)과 Exp(0.8)에서는 가장 높은 TH을 가지고 있으면서 가장 낮은 수준의 WIP을 보유하고 있다는 점이다. WIP의 급격한 증가에 대한 위험성 때문에 최근에는 Pull 또는 Hybrid 계열의 MFC가 주목을 받고 있지만 수요가 최대생산능력에 다다르지 않는다면 Push는 낮은 WIP과 높은 TH으로 가장 좋은 효율성을 보이고 있다. 게다가 최대생산능력에 가까울 정도로 수요가 증가하게 되면 제조기업의 관점에서 WIP보다 TH이 중요한 요소가 되어 이러한 경우에도 Push가 반드시 나쁜 MFC



<그림 6> 실험환경에 따른 WIP의 변화(최대 TH)



<그림 7> 실험환경에 따른 WIP의 변화(동등 WIP)

라고 볼 수 없다.

<그림 7>은 동등한 수준의 WIP을 가질 때 최대 TH을 달성하는 경우, 즉 <표 4>에서 제시된 데이터에 따라 WIP 수준의 변화를 관찰한 것이다. 도착간격분포가 Exp(0.8)의 경우를 보면 Pull은 동등한 수준의 TH(<그림 5> 참조)을 가지고 있음에도 불구하고 다른 MFC 방법에 비해 높은 수준의 WIP을 보유하고 있어 가장 비효율적인 생산이 이루어지고 있다고 할 수 있다.

4.3 CONWIP vs. G-MaxWIP vs. CWIPL

실험결과에 따르면 세 가지 Hybrid MFC의 경우 매우 유사한 성능을 가지고 있다. 따라서 본 절에서는 통계적으로 이 세 가지 방식이 차이가 있는 지 검정하려고 한다. 가설은 다음과 같이 수립하였고 검정은 유의수준 5%에서 실시하였다.

- H0 : CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL는 동등한 WIP을 가지고 있을 때 TH에 차이가 없다.
- H1 : CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL는 동등한 WIP을 가지고 있을 때 TH에 차이가 있다.

가설검정에 사용한 데이터는 동일한 공정의 수와 도착간격분포를 갖고 있을 때 유사한 수준의 WIP(오차범위 ±2)을 갖는 경우 각 MFC별 TH 값을 사용하였다. 모집단이 3개이므로 일원분산분석(ANOVA)을 이용하여 평균을 비교검정하였다. 결과는 <표 5>에 정리하였다. 검정 결과 도착간격분포가 Exp(1.0)이고 공정의 수가 5와 10일 경우를 제외하곤 세 가지 방법에 대한 통계적으로 유의한 차이를 확인할 수 없었으며, 차이가 존재한 두 가지 경우에는 CWIPL의 TH이 가장 낮았다.

<표 5> CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL에 대한 일원분산분석 결과

n	도착간격분포	WIP	F	P	비고
5	Exp(0.6)	20	0.46	0.640	H0 채택
	Exp(0.8)	30	0.48	0.630	H0 채택
	Exp(1.0)	40	75.76	0.000	H0 기각
10	Exp(0.6)	20	0.81	0.467	H0 채택
	Exp(0.8)	40	0.83	0.461	H0 채택
	Exp(1.0)	60	272.75	0.000	H0 기각
15	Exp(0.6)	30	1.58	0.345	H0 채택
	Exp(0.8)	60	1.38	0.289	H0 채택
	Exp(1.0)	90	2.28	0.145	H0 채택

5. 결 론

본 논문에서는 MFC의 5가지 방법(Push, Pull, CONWIP, G-MaxWIP, CWIPL)에 대하여 공정한 생산환경에서 그 성능을 비교평가 하였다. 기존의 평가방법은 Push 방식에 매우 불리한 환경을 설정하여 Pull과 Hybrid방식의 장점만 부각되었다. 본 연구의 시뮬레이션 결과 최대생산 능력의 80% 정도의 수요를 충족시키고자 할 때에는 Push 방식이 TH과 WIP 관점에서 가장 효율적임을 확인할 수 있었다. 또한 수요가 최대생산 능력과 비슷하더라도 WIP의 폭증을 감수할 수 있다면 TH이 가장 우수한 Push 방식도 고려해 볼 수 있다. Pull 방식은 WIP과 TH 관점에서 가장 취약한 형태를 보이고 있으며, Hybrid 방식은 적절한 수준의 WIP을 유지시키기는 하나 TH이 Push에 비해 떨어지는 양상을 보이고 있었다. 세 가지 Hybrid 방식인 CONWIP, G-MaxWIP, 그리고 CWIPL 간에는 통계적으로 유의한 차이를 확인할 수 없었다. 세 가지 방식에 차이가 없다면 가장 운영이 가장 단순한 형태인 CONWIP이 가장 적합한 방식이라 할 수 있다.

참고문헌

[1] 노권학, 손성규, 장성호, 이종환, 정관영, 김태성, 이희수; “시뮬레이션을 활용한 Hybrid 생산 Model의 연구”, 한국산업경영시스템학회지, 34(2) : 76-84, 2011.

[2] Borshchev, A. and Filippov. A.; “From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling : Reasons, Techniques, Tools,” *The 22nd International Conference of the System Dynamics Society*, July 25-29, Oxford, England, 2004.

[3] Grosfeld-Nir, A. G., Magazine, M., and Vanverkel, A.; “Push and pull strategies for controlling multistage production systems,” *International Journal of Production Research*, 38(11) : 2361-2375, 2000.

[4] Grosfeld-Nir, A. and Magazine, M.; “Gated MaxWIP : a strategy for controlling multistage production systems,” *International Journal of Production Research*, 40(11) : 2557-2567, 2002.

[5] http://www.xjtek.com/company/.

[6] Hopp, W. J. and Spearman, M. L.; “Factory Physics : Foundations of Manufacturing Management,” New York, McGraw-Hill, 2007.

[7] Kim, S., Davis, K. R., and Cox III, J. F.; “An Investigation of output flow control, bottleneck flow control and dynamic flow control mechanisms in various simple line scenarios,” *Production Planning and Control*, 14(1) : 15-32, 2003.

[8] Lodding, H., Yu, K. W., and Wiendahl, H. P.; “Decentralized WIP-oriented manufacturing control(DWIP),” *Production Planning and Control*, 14(1) : 42-54, 2003.

[9] Sepehri, M. and Nahavandi, N.; “Critical WIP loops : a mechanism for material flow control in flow lines,” *International Journal of Production Research*, 45(12) : 2759-2773, 2007

[10] Spearman, M. L. and Hopp, W. J.; “CONWIP : a pull alternative to kanban,” *International Journal of Production Research*, 28(5) : 879-894, 1990.