

Selection Method for Optimal Shop Floor Control According to Manufacturing Environment

Sang Geun Park* · Sung Ho Park** · Chunghun Ha***†

*Vehicle Engineering Center, GM Korea Company

**R&D Center, SH Global

***School of Information and Computer Engineering, Hongik University

생산환경 변화에 따른 최적 Material Flow Control 선택방법

박상근* · 박성호** · 하정훈***†

*한국 지엠 주식회사 기술연구소

**에스에이치 글로벌 중앙연구소

***홍익대학교 정보컴퓨터공학부 산업공학전공

Material flow control (MFC) is a kind of operational policy to control of the movement of raw materials, components, and products through the manufacturing lines. It is very important because it varies throughput, line cycle time, and work-in-process (WIP) under the same manufacturing environments. MFC can be largely categorized into three types such as Push, Pull, and Hybrid. In this paper, we set various manufacturing environments to compare five existing MFC mechanisms: Push, Pull, and Hybrid (CONWIP, Gated MaxWIP, Critical WIP Loops, etc). Three manufacturing environments, manufacturing policies (make to stock and make to order), demand (low, medium, high), and line balancing (balanced, unbalanced, and highly unbalanced) are considered. The MFCs are compared in the point of the five functional efficiencies and the proposed compounded efficiency. The simulation results shows that the Push is superior in the functional efficiency and GMWIP is superior in the compounded efficiency.

Keywords : Material flow control Efficiency, Push, Pull, CONWIP, Gated MaxWIP, Critical WIP Loops

1. 서 론

Shop floor control(SFC)은 제조라인에서 제품흐름을 제어하고, 제조성능을 측정하기 위해 사용되는 컴퓨터 또는 제어시스템이다[6]. SFC의 중요한 기능을 담당하고 있는 Material flow control(MFC)은 주로 원자재의 작업지시, 흐름방법, 투입방식에 대해 다루는데, 기본 정책은 크게 Push, Pull, 그리고 Push와 Pull의 장점을 결합한 혼합

(hybrid) 방식으로 분류할 수 있다[3].

Push 방식은 수요예측에 따른 일정계획을 수립하고 이를 기반으로 생산라인의 상태를 고려하지 않고 작업물을 생산라인에 투입한다. 수요가 충분한 경우 작업물은 생산라인에 지속적으로 투입되므로 산출률(throughput rate; TH)은 생산능력(capacity)에 근접한 수준을 유지하고 평균적으로 높은 공정중재고(work-in-process; WIP) 수준을 유지한다. 그러나 WIP의 증가에 따라 재고비용이 증가하게 되고, 대기시간의 증가로 인하여 사이클타임(cycle time; CT)이 길어지고 고객 만족도는 감소한다.

Pull 방식은 생산라인의 상태에 따라 작업물을 투입하

므로 WIP의 폭발적인 증가를 막을 수 있고, 이를 통해 사이클타임을 제한함으로써 리드타임의 감소로 인한 고객의 만족도를 증가시킬 수 있으며, 버퍼의 제한으로 인하여 변동성에 대응할 수 있는 공정의 개선에 대한 압력을 증대시킨다. 이러한 장점을 통하여 궁극적으로 생산제품의 원가를 절감시키고 유연성을 증대시킨다. 린(lean) 제조를 강조하는 현대의 생산방식은 Push 방식보다 Pull 방식을 선호하고 있으며, 제어적인 측면에서도 Pull 방식이 우수하다고 알려져 있다[9].

Hybrid 방식은 Push 방식과 Pull 방식을 혼용한 방식으로 대표적으로 Constant WIP(CONWIP)이 있다. CONWIP은 생산라인 전체의 WIP을 일정량으로 제한하는 방법으로서 생산라인에서 완료된 수량만큼 작업물을 투입하는 방법이다[8]. 작업물의 투입방식은 Pull 방식을 유지하고 공정 중 작업물의 이동은 Push 방식을 따름으로써 두 가지 방식의 장점을 수용한다. CONWIP은 적절한 WIP의 크기를 설정해야 하며, 예기치 못한 생산라인의 변동에 대해 취약하고, 산출률이 저하되어 생산능력을 충분히 활용하지 못하는 단점이 있다.

그동안 다양한 MFC 방식이 제안되어 왔으며, 새롭게 제안된 방식은 기존의 방식보다 성능의 우수함을 강조하고 있다. MFC 평가에서 일반적으로 사용하는 성능지표는 산출률, 사이클타임, 그리고 WIP이 있다. 그러나 이 지표들은 Little의 법칙($WIP = TH \times CT$)에 의하여 상충관계(trade-off)가 존재하므로 MFC 성능에 대한 적절한 평가가 어렵다. 따라서 기존의 논문들은 산출물을 일정하게 유지하고 WIP을 비교하거나, WIP을 고정하고 산출물을 비교하는 방식의 평가를 통하여 MFC의 성능을 비교하였다. 그러나 이러한 평가방법은 생산공정이 안정화된 일정한 범위 내에서만 비교가 이루어진다. MFC의 성능에는 안정적 운영상태의 효율성뿐만 아니라 MFC의 최대 가동범위도 포함된다. 예를 들어, Push 방식의 경우 Pull이나 Hybrid 방식에 비하여 안정적인 운영상태에서는 WIP이 많아 다소 비효율적이나 최대 가능한 산출물의 수준이 높으므로 성능의 우수함을 단정적으로 판정하기 어렵다.

MFC의 성능지표는 기본적으로 상충관계에 있으므로 모든 환경에 우수한 MFC는 존재하지 않는다. 기업의 경영환경에 따라 성능지표의 중요성은 변화하므로 MFC의 성능평가에는 이러한 점이 반영이 되어야 한다. 예를 들어 수요가 생산능력을 초과할 경우 최대 산출률의 중요도는 기타 성능지표에 비해 매우 높으며, 반대의 경우는 낮아지게 된다. 생산방식 또한 성능지표의 중요도에 영향을 미치는 데, 예를 들어 재고생산의 경우에는 일반적으로 가동률이 중요하므로 산출률의 중요도가 높으며, 주문생산의 경우 납기를 맞추어야 하므로 사이클타임을 중요도가 높아지게 된다. 각각의 제조기업은 자신의 경

영환경과 생산방식에 따라 다른 성능지표의 중요도 조항을 가질 수 있다. 따라서 기존과 같이 단일한 생산환경에서 단일한 평가방법을 적용하여 MFC의 성능을 비교하는 것은 매우 단편적인 평가라고 할 수 있다.

본 논문에서는 MFC 방식에 대한 공정한 비교를 위하여 Hopp et al.[4]이 제안한 6가지 기능성 효율성(산출량, 가동률, 재고, 사이클타임, 리드타임, 고객서비스)에 기반한 평가방법을 제안하고 다양한 경영환경과 생산환경을 고려하여 기존에 제시된 MFC 방식 간 성능평가를 하려고 한다. 5가지 MFC 방식, Push, Pull, CONWIP[9], Gated-MaxWIP[2], 그리고 Critical WIP loops[7]를 비교하였으며, 경영환경으로는 수요(고수요, 중수요, 저수요)를 고려하였고 생산방식은 재고생산과 주문생산, 생산라인은 균형 및 불균형 시스템을 고려하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 제 2장에서는 기존 연구를 결과와 평가방식을 분석하고, 제 3장에서는 5가지 기능성 효율성 척도에 대한 설명을 한다. 제 4장에서는 시뮬레이션을 위한 모델 구성방법과 실험조건을 설명한 후, 제 5장에서는 기능성 효율성에 대한 평준화 방법, 종합효율성 계산방법을 제시한다. 제 6장에서는 시뮬레이션을 통한 효율성 결과에 대한 분석을 실시하고, 마지막으로 제 7장에서는 결론을 요약하고 향후 연구방향을 제시한다.

2. 기존연구 및 평가방식

Push, Pull, 그리고 CONWIP에 관련된 정의와 연구문헌은 매우 많으나, 본 연구에서는 Spearman et al.[9]과 Grosfeld-Nir and Magazine[2]의 정의를 기본적으로 수용하였다.

CONWIP은 Spearman et al.[9]에 의해 제안된 이후 많은 연구자들에 의해 변형된 형태의 CONWIP이 제안되었는데, 그 중에서 Grosfeld-Nir and Magazine[2]가 제안한 Gated-MaxWIP(GMWIP)과 Sepehri and Nahavandi[7]가 제안한 Critical WIP loops(CWIPL)가 주목할만한 성능을 보이고 있어 본 논문에서 평가대상으로 선정하였다.

Grosfeld-Nir et al.[3]은 작업물의 투입시 투입조건을 만족하는 즉시 투입되는 것보다 투입조건을 만족하더라도 일정한 주기로 작업물을 투입할 때 WIP이 감소하는 현상을 관측하고 이를 이용하여 새로운 방식의 MFC인 GMWIP을 제안하였다. GMWIP은 생산라인의 입구에 pace machine이라는 가상의 설비를 두고 작업물의 투입을 통제한다. GMWIP은 CONWIP과 같이 현재 생산라인의 WIP이 정해진 최대 가능 WIP(MaxWIP)보다 작은 경우 작업물을 투입하는데, 투입을 통제하는 pace machine은 일정한 주기를 갖고 있어 투입조건을 만족하더라도

작업물은 즉시 투입되지 않고 투입주기가 도래할 때 작업물이 투입된다.

이 연구에서는 Push, GMWIP, CONWIP을 비교하고 있는데, 비교 방법은 다음과 같다. 우선 산출률이 가장 낮은 Pull 방식으로 시뮬레이션을 실행하고 WIP과 산출률을 측정한다. 그리고 동일한 생산조건에서 Pull 방식의 결과와 동일한 산출률이 나오도록 타 방식의 MFC를 파라미터를 변경하며 시뮬레이션을 실행하고 WIP 결과를 측정한다. MFC간 산출률이 동일하므로 WIP의 크기를 비교하여 MFC의 성능을 판정한다. 시뮬레이션 평가결과 GMWIP이 Pull 방식과 CONWIP 방식보다는 항상 우수한 결과를 보이고 있으며, 작업장의 수가 3개 이하일 경우 GMWIP이 Push보다 우수하다고 주장하였다.

이러한 성능 비교방법의 문제점은 목표 산출률을 산출률 성능이 가장 좋지 않은 Pull 방식을 기준으로 설정하여 실제적인 MFC의 성능평가가 이루어지지 않는다는 점이다. 예를 들어, 10개의 직렬공정을 가진 생산라인에서 모든 공정의 작업시간을 exponential(1.0)으로 설정하면, Pull 방식의 산출률은 최대 0.7~0.8정도이다. 이러한 경우에는 생산능력의 여유가 충분하므로 모든 MFC가 유사한 성능을 보이며 그 성능의 차이를 확인하기 어렵다. 논문의 시뮬레이션 결과도 MFC간 WIP의 차이가 5% 미만으로 확인한 차이가 존재한다고 보기 어렵다.

CWIPL는 기본적으로 CONWIP의 메커니즘을 따르고 있으며 CONWIP의 단점인 산출률이 저하되는 것과 불필요한 WIP이 증가되는 것을 보완한 방법이다. 균형직렬생산라인에서 산출률은 마지막 공정의 생산능력과 가동률에 밀접한 관련이 있으므로 마지막 공정의 버퍼(WIPparameter)를 충분히 제공하여 산출률을 유지하는 것이 CWIPL의 기본 아이디어이다. CWIPL에서는 생산라인의 WIP이 MaxWIP보다 작거나 마지막 공정의 WIP이 WIPparameter보다 작을 경우 작업물 투입조건을 만족한다. 단, 불필요한 WIP이 증가하는 것을 방지하기 위하여 첫 번째 공정이 작업 중이면 작업물을 투입하지 않고 유휴상태일 경우에만 작업물을 즉시 투입한다.

이 연구에서는 CONWIP, GMWIP, 그리고 CWIPL 방식의 성능을 비교하고 있다. 세 MFC 모두 CONWIP을 기본 메커니즘으로 채택하고 있으므로 MaxWIP을 공통 제어변수로 갖는다. 평가방법은 우선 MaxWIP을 고정하고 다른 제어변수(GMWIP은 pace machine rate, CWIPL은 WIPparameter)를 순차적으로 변경하며 생산조건 당 30회씩 시뮬레이션을 실행한다. MFC의 우수성은 사이클타임과 산출률에 대하여 각각 통계적 검정을 통하여 판정한다. 시뮬레이션 수행결과 다양한 조건에서 CWIPL의 사이클타임과 산출률이 CONWIP이나 GMWIP보다 우수하거나 동등한 것으로 판정되었다.

이러한 평가방법은 MaxWIP과 같은 공통된 제어변수가 있을 경우에만 적용할 수 있으므로 Push나 Pull 방식을 비교대상으로 포함할 경우 비교가 불가능하다는 단점이 존재한다. 또한 MaxWIP은 경영환경이나 생산조건에 따라 생산라인이 최대의 성능을 발휘하도록 조정하여 사용해야 하는 변수이므로 실험의 통제변수로는 적합하지 않다.

최근 Khojasteh-Ghamari[5]는 MFC 평가방법이 서로 상충관계임을 지적하고 상호활동도표(activity interaction diagram)과 주회로기법(critical circuits)을 적용하여 동등한 수준에서 MFC를 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 평가결과 MFC의 성능은 수요와 같은 생산환경에 영향을 받음을 확인하였다. 그러나 이 방법은 Pull과 혼합방식과 같이 WIP을 제한하는 경우에만 적용할 수 있어 본 논문에서 목표로 하는 모든 MFC 방식을 평가하지 못하는 한계점이 존재한다.

3. 효율성 척도

Hopp and Spearman[4]은 그들의 저서 Factory Physics에서 경영환경과 생산환경에 따라 생산라인을 평가할 수 있는 척도로서 다음의 6가지 효율성을 제시하고 있다. 본 논문에서 사용하는 기호는 다음과 같다[4].

- $r^*(i)$: 작업장 i 의 이상적 작업률(품목수/일)
- T_0^* : 생산라인의 원작업시간(일)
- D : 평균 수요(품목수/일)
- WIP : 라인 내 평균 재공품재고 수준(품목수)
- FGI : 평균 완제품 재고수준(품목수)
- RMI : 평균 원자재 재고수준(품목수)
- CT : 투입에서 완제품까지의 평균 시간(일)
- LT : 평균 리드타임(일)
- TH : 평균 산출량(품목수/일)
- $TH(i)$: 작업장 i 의 평균 산출량(품목수/일)

3.1 산출량 효율성

산출량은 생산라인으로 투입된 원자재가 완제품으로 생산라인 밖으로 나오는 수량을 의미한다. 수요량과 산출량이 일치하는 것이 가장 이상적인 상황이며, 산출량이 수요량을 보다 적으면 고객만족도가 감소하며, 그 반대의 경우에는 FGI의 증가에 따른 재고비용 증가가 발생할 수 있다. 산출량 효율성은 식 (1)과 같다.

$$E_{TH} = \frac{\min\{TH, D\}}{D} \quad (1)$$

3.2 가동률 효율성

가동률은 부품부족으로 인한 비가동 외에 각각의 Machine이 총 작동할 수 있는 시간에서 실제로 작업을 실시한 시간의 비율이다. 작업능력의 변동이나 고장없이 생산능력을 100% 발휘했을 때 생산량에서 실제생산량의 비율을 통해서도 가동률 효율성을 구할 수 있다. 가동률 효율성은 생산라인이 보유한 설비의 가동률의 평균으로 식 (2)와 같이 계산한다.

$$E_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{TH(i)}{r^*(i)} \quad (2)$$

본 논문에서는 설비의 고장과 setup time과 같은 별도의 비가동 요건을 고려하지 않는다.

3.3 재고 효율성

재고의 종류에는 생산라인에 투입되기 위해 기다리는 원자재 재고(Raw Material Inventory; RMI), WIP, 출하를 기다리는 완제품 재고(Final Goods Inventory; FGI)가 있다. 가장 이상적인 재고상황은 RMI와 FGI는 최소로 유지하고 WIP은 산출물을 유지할 수 있는 한에서 적을수록 유리하다. 재고 효율성은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{INV} = \frac{\sum_{i=1}^n TH(i)/r^*(i)}{WIP + RMI + FGI} \quad (3)$$

3.4 사이클타임 효율성

짧은 사이클타임은 생산라인의 낮은 WIP, 높은 직행율, 낮은 Rework/Repair율을 의미하므로 생산라인의 우수성을 나타낸다. 적시에 투입되어 대기시간 없이 작업시간만으로 제품을 만들 수 있다면 이상적인 사이클타임을 가질 수 있지만 현실적으로 거의 불가능하다. 그러므로 보통 실제 사이클타임은 이상적인 사이클타임보다 항상 높다. 사이클타임 효율성은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$E_{CT} = \frac{T_0^*}{CT} \quad (4)$$

3.5 고객서비스 효율성

고객서비스는 고객이 원하는 납기일에 제품을 적시에 제공함으로써 이루어진다. 재고생산(Make-To-Stock : MTS) 생산방식에서는 주문과 납기가 동시에 이루어지므로 재

고생산의 고객서비스는 재고로서 수요를 충족시키는 비율이 된다. 반면, 주문생산(Make-To-Order : MTO 또는 Assembly-To-Order; ATO)에서 고객서비스는 식 (5)와 같이 납기일을 충족시키는 주문의 비율이 된다.

$$E_{CS} = \begin{cases} \text{수요에 대한주문 충족비율, if MTS} \\ \text{주문에 대한납기 충족비율, if MTO or ATO} \end{cases} \quad (5)$$

본 논문에서는 주문에 대한 주문량과 납기일을 별도로 고려하지 않았으므로 수요에 대한 만족률을 대리변수로 측정하여 사용하였다.

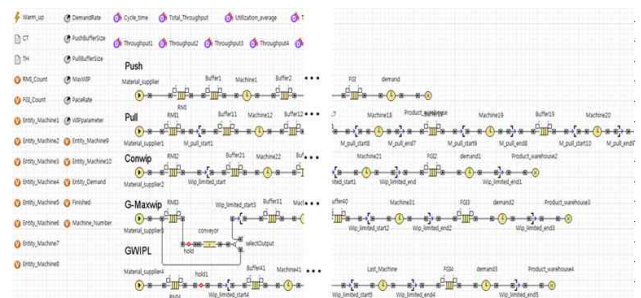
3.6 리드타임 효율성

리드타임은 제조주체가 고객에게 제시하는 시간으로서 리드타임 효율성은 식 (6)과 같이 계산할 수 있다. 재고생산인 경우 주문과 동시에 배송되므로 $LT=0$ 이 되므로 E_{LT} 는 1이 되고, 주문생산의 경우 $LT \leq T_0^*$ 가 되어 E_{LT} 는 1보다 작거나 같다.

$$E_{LT} = \frac{T_0^*}{\max\{LT, T_0^*\}} \quad (6)$$

본 논문에서는 별도의 리드타임을 설정하지 않았으므로 리드타임 효율성은 평가하지 않는다.

4. 모의실험 구성



<Figure 1> Five Simulation Models of Material Flow Control System

4.1 모의실험 모형구성

본 연구에서는 시나리오에 따른 효율성의 평가를 위하여 5가지 MFC인 Push, Pull, CONWIP, GMWIP, CWIPL의 시뮬레이션 모델을 AnyLogic[1]을 이용하여 <Figure 1>과 같이 구성하고 다음과 같은 기본가정을 공통적으로 적용하였다.

- 10개의 직렬 공정을 가진 흐름생산공정(serial flow production line)이다.
- 설비들은 고장이 나지 않으며, Setup time은 존재하지 않는다.
- 부품이나 재공품은 1개씩 작업하며 이동한다.
- 균형 생산라인의 경우, 각 공정의 작업시간은 Exponential (1.0) 분포를 가지며, 불균형 생산라인의 경우 6번째 공정의 작업시간 분포는 Exponential(1.0/1.2)와 Exponential(1.0/1.4)이다.
- Pull 방식의 모든 버퍼의 크기는 동일하다.
- 나머지 시스템의 모든 버퍼의 크기는 무한대이다.

기존 연구에서는 순수한 MFC의 능력을 평가하기 위해 무한공급과 무한수요를 가정한다. 즉, 원자재는 필요시 즉시 보충되며, 제품은 완성되는 즉시 소비된다. Pull과 Hybrid 방식에서 이러한 가정은 제품이 즉시 소비되므로 FGI를 0으로 만들고 필요시에만 원자재를 공급받으므로 RMI 또한 0으로 만든다. 반면 Push 방식에서는 무한공급으로 인하여 RMI는 무한대가 되며, FGI는 0이므로 동등한 수준의 평가가 불가능하다.

장기적으로 생산량은 수요와 동일하게 되며, 생산량에 따라 원자재를 준비하고 투입한다. 따라서 직렬생산라인에서 수요는 투입과 동일한 수준을 갖는다. 수요와 동일한 수준의 투입이 이루어지면, 생산라인에서 소화하지 못하는 원자재는 RMI에 누적되며, 수요에서 소비하지 못한 완제품은 FGI에 누적되므로 MFC 방식과 관계없이 동등한 평가를 할 수 있다. 본 연구에서는 수요의 수준에 따른 MFC의 성능도 비교하므로 다음과 같은 가정을 추가하였다.

- 원자재의 투입과 수요는 동일한 분포를 갖는다. 수요는 저수요, 중수요, 고수요를 고려하며, 저수요는 수요가 생산능력의 60% 수준(Exponential(0.6)), 중수요는 생산능력의 80% 수준(Exponential(0.8)), 그리고 고수요는 생산능력의 100% 수준(Exponential(1.0))을 의미한다.

산출률이 생산능력에 근접(고수요 상태)하는 경우, Pull이나 Hybrid 방식은 생산라인의 WIP을 제한하였으므로 WIP이 증가하지 않고 RMI에 이를 쌓아놓게 된다. 반면, Push 방식은 수요에 따라 계획생산을 하므로 RMI에 원자재를 쌓지 않고 바로 생산라인에 투입하며, 생산라인에서 투입된 원자재를 신속히 처리할 수 없으므로 WIP의 폭발적 증가 현상이 일어난다. 정리하면, 수요가 생산라인의 능력을 초과할 경우, Pull과 Hybrid 방식은 RMI에 재고를 누적하며, Push 방식은 생산라인에 WIP으로 누적하게 된다. 이는 MFC의 성능평가지표로서 WIP의 중요성을 고려할

때 Push방식이 매우 불리하게 평가된다. 실제생산라인에서는 Push 방식이라 하더라도 첫 번째 설비에 과도한 WIP이 존재할 경우 이를 무시하고 투입하는 경우는 없다. 따라서 본 연구에서는 Push의 첫 번째 공정 전 버퍼의 크기는 15로 제한하여 사용하였다.

4.2 모의실험

모의실험은 <Table 1>와 같이 파라미터를 조정하여 실시하였다. 총 실험은 504가지의 파라미터 조합에 대하여 5회 반복을 실시하여 총 2,520회 실시하였다. 각 실험별 실험시간은 10,000시간을 적용하였고 이 중 1,000시간은 Warm-up time으로 간주하여 데이터 집계에서 제외하였다. 실험결과는 5회 반복 실험의 평균값을 이용하였다.

<Table 1> Experiment Conditions

Experimental conditions	Options	Comments
Inter-arrival time distribution of parts and demand	Exponential(0.6) Exponential(0.8) Exponential(1.0)	
The number of machine in manufacturing line(n)	10	
Machine processing Time	Exponential(1.0)	
Processing time(t_6) at the Machine 6	Exponential(1.0) Exponential(1/1.2) Exponential(1/1.4)	Applied to unbalanced manufacturing line
Buffer size at the Pull system	2, 4, 6, 8, 10	
MaxWIP	2n, 4n, 6n, 8n, 10n	Maximum allowable WIP size at the Hybrid systems
Pace machine rate at GMWIP	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5	
WIPparameter	5, 10, 15, 20	The buffer size of the last machine at CWIPL
Simulation time	10000	
Warm-up time	2000	
Repetition(r)	5	

5. MFC 효율성 평가방법

5.1 효율성 평준화

5가지 효율성척도는 [0, 1.0]의 범위를 가지나 개별적인 성능에 대한 척도이므로 그 절대적인 크기나 변동의 범위가 효율성 척도마다 다를 수 있다. 따라서 본 논문

서는 각 개별 효율성 척도에 대한 영향의 크기를 평균화하여 적용하였다. 평균화 방법은 다음과 같다.

- 측정된 모든 효율성 점수에 대하여 최고 효율성 점수 E_{max} 와 최저 효율성 점수 E_{min} 을 구한다.
- 각각의 효율성에 대하여 평균 m_i 와 표준편차 σ_i 를 구한다.
- i 번째 효율성에 대한 j 번째 효율성 점수 E_{ij} 를 이용하여 1차 표준화 효율성 점수 \widetilde{E}_{ij} 를 다음과 같이 계산한다.

$$\widetilde{E}_{ij} = \frac{E_{ij} - m_i}{\sigma_i}$$

- $\overline{E}_{max} = \max\{\widetilde{E}_{ij}\}$, $\overline{E}_{min} = \min\{\widetilde{E}_{ij}\}$
- 각각의 효율성 값들을 최고 점수 E_{max} 와 최저 점수 E_{min} 사이에 분포시키기 위하여 2차 표준화 효율성 점수 \widehat{E}_{ij} 를 다음과 같이 계산한다.

$$\widehat{E}_{ij} = \frac{\widetilde{E}_{ij} - \overline{E}_{min}}{\overline{E}_{max} - \overline{E}_{min}} \times (E_{max} - E_{min}) + E_{min}$$

5.2 종합효율성

종합적인 평가를 위하여 본 논문에서는 종합효율성을 제시한다. 종합효율성은 각 평균화된 효율성 척도에 대한 가중평균을 이용하여 식 (7)과 같이 계산한다.

$$E_T = w_{TH}\widehat{E}_{TH} + w_U\widehat{E}_U + w_{INV}\widehat{E}_{INV} + w_{CT}\widehat{E}_{CT} + w_{CS}\widehat{E}_{CS} \quad (7)$$

여기서 w_{TH} 는 산출량효율성에 대한 가중치, w_U 는 동물효율성에 대한 가중치, w_{INV} 는 재고효율성에 대한 가중치, w_{CT} 는 사이클타임효율성에 대한 가중치, w_{CS} 는 고객서비스 효율성에 대한 가중치를 나타낸다.

재고생산(Make to Stock; MTS)의 경우는 산출량에 대한 중요성이 상대적으로 높으며 반면 주문생산(Make to Order; MTO)의 경우 사이클타임에 대한 중요성이 매우 높다. 재고생산에서는 저수요인 경우에는 수요충족에 문제가 없으므로 비용절감의 중요성이 증대하고 따라서 재고 효율성의 중요성이 증대하고, 반면 고수요인 경우에는 수익의 극대화를 위한 산출량효율성의 중요성이 매우 높아지게 된다. 주문생산은 저수요인 경우 역시 비용절감이 중요하므로 재고효율성의 중요도가 높고 고수요인 경우에는 고객주문에 대한 대응이 매우 중요하게 된다. <Table 2>에는 이러한 경영환경의 변화에 따라 종합효율성 가중치 계산에 반영하는 효율성 가중치를 정리하였다.

<Table 2> Efficiency Weighting of Each Scenario

Type	Efficiency					
	Demand	w_{TH}	w_U	w_{INV}	w_{CT}	w_{CS}
MTS	Low	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2
	Medium	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
	High	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2
MTO	Low	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
	Medium	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2
	High	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2

6. 효율성 분석

6.1 균형생산라인

균형생산라인에서 재고생산 시나리오에 대한 효율성 측정결과를 <Table 3>에 정리하였다. <Table 3>에 제시된 결과는 각각의 MFC방식에서 <Table 1>의 다양한 파라미터로 도출한 결과 중 종합효율성이 가장 높은 파라미터 조합에 대한 평균화된 효율성과 종합효율성이다. <Table 3>의 회색음영부분은 해당 분류에서 가장 우수한 효율성을 표시한다. 향후 제시하는 표는 동일한 기준에서 작성하였다.

기능별 효율성을 보면 예상한 바와 같이 산출량효율성의 경우 Push가 가장 우수함을 알 수 있다. GMWIP의 경우에는 재고효율성이 높아 생산라인의 물류흐름이 가장 원활한 것을 알 수 있다. 주목할 만한 점은 사이클타임 효율성인데, 고수요인 경우, 즉 수요가 생산능력에 근접한 경우에는 Push의 사이클타임 효율성이 매우 낮지만, 수요가 생산능력에 못 미치는 경우에는 Push의 사이클타임 효율성이 가장 높아서 WIP이 가장 낮은 수준으로 유지함을 알 수 있다.

<Table 3> Efficiency of Balanced Production Line in MTS

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low	Push	0.6529	0.6444	0.7327	0.7015	0.6463	0.6787
	Pull	0.6286	0.6239	0.7172	0.4748	0.6408	0.6413
Exp (0.6)	CONWIP	0.6414	0.6370	0.6392	0.5953	0.6354	0.6341
	GMWIP	0.6467	0.6457	1.0000	0.4827	0.6359	0.7339
	CWIPL	0.6392	0.6318	0.8266	0.6002	0.6836	0.6989
Medium	Push	0.6570	0.6577	0.6302	0.4718	0.6536	0.6326
	Pull	0.6344	0.6368	0.5804	0.3863	0.6478	0.6020
Exp (0.8)	CONWIP	0.6374	0.6443	0.5385	0.3601	0.6259	0.5890
	GMWIP	0.6354	0.6394	0.7064	0.3947	0.6218	0.6236
	CWIPL	0.6238	0.6260	0.5230	0.3893	0.6380	0.5835
High	Push	0.5744	0.5859	0.4143	0.2792	0.5847	0.5332
	Pull	0.4408	0.4404	0.3700	0.4200	0.4529	0.4340
Exp (1.0)	CONWIP	0.5299	0.5329	0.3867	0.3512	0.5137	0.4950
	GMWIP	0.5320	0.5352	0.3942	0.3490	0.5166	0.4975
	CWIPL	0.4920	0.4968	0.3794	0.3778	0.5045	0.4728

<Table 4> Efficiency of Balanced Production Line in MTO

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low	Push	0.6529	0.6444	0.7327	0.7015	0.6463	0.6844
	Pull	0.6286	0.6239	0.7172	0.4748	0.6408	0.6264
Exp (0.6)	CONWIP	0.6414	0.6370	0.6392	0.5953	0.6354	0.6299
	GMWIP	0.6449	0.6366	0.9616	0.6182	0.6309	0.7309
	CWIPL	0.6392	0.6318	0.8266	0.6002	0.6836	0.6958
Medium	Push	0.6570	0.6577	0.6302	0.4718	0.6536	0.5954
	Pull	0.6172	0.6185	0.5809	0.4332	0.6303	0.5575
Exp (0.8)	CONWIP	0.6132	0.6103	0.5213	0.4669	0.6053	0.5491
	GMWIP	0.6354	0.6394	0.7064	0.3947	0.6218	0.5751
	CWIPL	0.6076	0.6025	0.4553	0.4682	0.6208	0.5375
High	Push	0.5744	0.5859	0.4143	0.2792	0.5847	0.4435
	Pull	0.4408	0.4404	0.3700	0.4200	0.4529	0.4278
Exp (1.0)	CONWIP	0.5129	0.5148	0.3846	0.3742	0.5002	0.4422
	GMWIP	0.5320	0.5352	0.3942	0.3490	0.5166	0.4422
	CWIPL	0.4694	0.4709	0.3746	0.4116	0.4818	0.4394

종합효율성 측면에서는 저수요에서 고수요로 갈수록 효율성은 전반적으로 감소하고 있으며, 저수요인 경우는 GMWIP, 중수요와 고수요의 경우에는 Push가 가장 우수한 결과를 보이고 있다. 이는 저수요일 경우 비용에 대한 고려로 인하여 재고효율성에 대한 가중치가 높아 재고 효율성이 가장 좋은 GMWIP이 가장 유리함을 알 수 있다. 고수요의 경우 Push는 사이클타임 효율성이 가장 낮음에도 불구하고 기타 효율성이 가장 좋기 때문에 종합 효율성에서는 타 MFC에 비해 우위를 보이고 있다.

균형생산라인에서 주문생산 시나리오에 대한 효율성 평가결과는 <Table 4>에서 제시하고 있다. 주문생산을 가정한 경우에도 효율성 결과는 재고생산과 매우 유사하다. 주문생산에서 가장 중요한 효율성은 고객서비스 효율성인데, 이를 정확히 계산하기 위해서는 주문별 납기가 설정이 되어야 한다. 본 논문에서는 별도의 주문구분과 납기를 고려하지 않고 FGI를 통한 수요의 만족도만 고려하였으므로 고객서비스 효율성의 차이가 확실치 드러나지 않은 것으로 판단된다.

6.2 불균형생산라인

불균형생산라인은 10개의 생산공정 중에서 6번째 Machine의 processing time을 증가시켜 병목공정을 생성하여 구성하였다. 이에 대한 효율성 측정결과는 <Table 5>와 <Table 6>에 정리하였다. 재고생산과 $t_6 = \text{Exp}(1/1.2)$ 을 반영한 효율성 결과인 <Table 5>을 보면 전체적으로 Push가 우수한 효율성을 보이고 있으나 혼합방식의 MFC, 즉 CONWIP, GMWIP, CWIPL의 효율성이 높은 경우가 기존의 균형생산라인에 비해 많이 발생함을 확인할 수 있다.

<Table 5> Efficiency of Unbalanced Production Line in MTS $t_6 = \text{Exp}(1/1.2)$

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low	Push	0.6869	0.6792	0.6792	0.7081	0.6583	0.6795
	Pull	0.6546	0.6487	0.9327	0.5235	0.6546	0.7237
Exp (0.6)	CONWIP	0.6782	0.6879	0.8371	0.3883	0.6788	0.6989
	GMWIP	0.6700	0.6655	0.8356	0.6263	0.6709	0.7146
	CWIPL	0.6800	0.6787	0.9426	0.4504	0.6806	0.7357
Medium	Push	0.6806	0.6790	0.6789	0.3988	0.6740	0.6504
	Pull	0.6363	0.6363	0.4660	0.3888	0.6385	0.5779
Exp (0.8)	CONWIP	0.6584	0.6670	0.6592	0.3618	0.6639	0.6317
	GMWIP	0.6656	0.6810	0.5716	0.3390	0.6674	0.6176
	CWIPL	0.6424	0.6411	0.5199	0.3709	0.6444	0.5909
High	Push	0.4558	0.5398	0.3775	0.2410	0.4550	0.4431
	Pull	0.4069	0.4056	0.3660	0.4164	0.4056	0.4032
Exp (1.0)	CONWIP	0.4601	0.4600	0.3720	0.3638	0.4594	0.4415
	GMWIP	0.4566	0.4622	0.3716	0.3378	0.4561	0.4372
	CWIPL	0.4539	0.4515	0.3703	0.3639	0.4530	0.4359

<Table 6> Efficiency of Unbalanced Production Line in MTO $t_6 = \text{Exp}(1/1.2)$

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low	Push	0.6869	0.6792	0.6792	0.7081	0.6583	0.6823
	Pull	0.6546	0.6487	0.9327	0.5235	0.6546	0.7112
Exp (0.6)	CONWIP	0.6628	0.6592	0.7325	0.6191	0.6625	0.6745
	GMWIP	0.6696	0.6651	1.0000	0.4329	0.6653	0.7201
	CWIPL	0.6800	0.6787	0.9426	0.4504	0.6806	0.7129
Medium	Push	0.6806	0.6790	0.6789	0.3988	0.6740	0.5942
	Pull	0.6363	0.6363	0.4660	0.3888	0.6385	0.5284
Exp (0.8)	CONWIP	0.6584	0.6670	0.6592	0.3618	0.6639	0.5715
	GMWIP	0.6567	0.6616	0.5226	0.4065	0.6580	0.5555
	CWIPL	0.6171	0.6158	0.4654	0.4732	0.6193	0.5439
High	Push	0.4558	0.5398	0.3775	0.2410	0.4550	0.3703
	Pull	0.4069	0.4056	0.3660	0.4164	0.4056	0.4062
Exp (1.0)	CONWIP	0.3889	0.3865	0.3647	0.4783	0.3872	0.4217
	GMWIP	0.3460	0.3409	0.3613	0.5552	0.3431	0.4301
	CWIPL	0.3889	0.3862	0.3642	0.4791	0.3875	0.4220

특히 균형생산라인과 달리 Push의 산출량효율성이 타 MFC에 비해 절대적 우위를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 불균형생산라인의 경우 병목공정인 Machine 6가 존재하고 이로 인하여 병목공정 앞의 WIP이 증가하고 산출량은 병목공정의 산출량에 의존하게 된다. 병목공정 앞의 WIP은 병목공정의 가동률을 유지할 수 있는 정도의 수준만 유지한다면 산출량에는 별다른 영향을 주지 않는다. 반면 병목공정은 다른 효율성에 영향을 준다. 가동률 효율성은 저수요와 중수요의 경우 산출량 효율성과 차이가 매우 적다. 이는 설비가 산출량에 따라 가동이 원

<Table 7> Efficiency of Unbalanced Production Line in MTS $t_6 = \text{Exp}(1/1.4)$

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low Exp (0.6)	Push	0.6325	0.6233	0.7523	0.5777	0.6185	0.6583
	Pull	0.6248	0.6300	0.8635	0.3354	0.6241	0.6684
	CONWIP	0.6240	0.6292	0.9230	0.3615	0.6233	0.6883
	GMWIP	0.6079	0.6064	1.0000	0.3794	0.6070	0.7022
	CWIPL	0.6108	0.6064	0.8936	0.3952	0.6104	0.6731
Medium Exp (0.8)	Push	0.4924	0.5544	0.3466	0.1799	0.4929	0.4445
	Pull	0.4905	0.4887	0.3378	0.3261	0.4916	0.4434
	CONWIP	0.4959	0.4941	0.3349	0.3914	0.4968	0.4531
	GMWIP	0.4988	0.4935	0.3390	0.3996	0.4997	0.4560
	CWIPL	0.4947	0.4922	0.3339	0.3906	0.4955	0.4518
High Exp (1.0)	Push	0.2755	0.4285	0.3077	0.1699	0.2758	0.2988
	Pull	0.2605	0.2607	0.2990	0.3256	0.2604	0.2709
	CONWIP	0.2811	0.2799	0.3000	0.3175	0.2812	0.2864
	GMWIP	0.2839	0.2850	0.3002	0.3182	0.2843	0.2892
	CWIPL	0.2763	0.2797	0.2998	0.3139	0.2766	0.2831

<Table 8> Efficiency of Unbalanced Production Line in MTO $t_6 = \text{Exp}(1/1.4)$

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low Exp (0.6)	Push	0.6325	0.6233	0.7523	0.5777	0.6185	0.6538
	Pull	0.6248	0.6300	0.8635	0.3354	0.6241	0.6389
	CONWIP	0.6070	0.5997	0.6886	0.5498	0.6070	0.6193
	GMWIP	0.6079	0.6064	1.0000	0.3794	0.6070	0.6795
	CWIPL	0.6108	0.6064	0.8936	0.3952	0.6104	0.6520
Medium Exp (0.8)	Push	0.4924	0.5544	0.3466	0.1799	0.4929	0.3758
	Pull	0.4905	0.4887	0.3378	0.3261	0.4916	0.4107
	CONWIP	0.4959	0.4941	0.3349	0.3914	0.4968	0.4323
	GMWIP	0.4988	0.4935	0.3390	0.3996	0.4997	0.4367
	CWIPL	0.4947	0.4922	0.3339	0.3906	0.4955	0.4312
High Exp (1.0)	Push	0.2755	0.4285	0.3077	0.1699	0.2758	0.2518
	Pull	0.1680	0.1630	0.2954	0.4919	0.1672	0.3096
	CONWIP	0.1810	0.1784	0.2978	0.5719	0.1800	0.3486
	GMWIP	0.1803	0.1774	0.2960	0.5875	0.1798	0.3543
	CWIPL	0.1820	0.1794	0.2961	0.5716	0.1816	0.3489

활하게 이루어지며 병목공정의 생산능력이 수요에 대응할 정도의 크기를 갖는다는 의미이다. 그러나 고수요의 경우 병목공정의 생산능력이 수요보다 적으므로 병목공정 앞의 WIP이 급격히 증가하게 된다. Push는 병목공정 전공정에서는 투입에 따라 생산능력을 모두 사용하므로 가동률이 높아지고 병목공정 이후는 병목공정으로 부터의 WIP이 원활하지 않으므로 산출량과 유사한 가동률을 갖게 된다. 따라서 전체 생산라인의 가동률이 높아지게 되고 반면 사이클타임이나 재고 효율성을 낮아지게 된다. Pull이나 혼합방식의 MFC는 WIP에 대한 통제가 이

<Table 9> Efficiency Comparison by Material Flow Control Methods

Type	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
MTS	Push	0.5676	0.5991	0.5466	0.4142	0.5621	0.5577
	Pull	0.5308	0.5301	0.5481	0.3997	0.5351	0.5294
	CONWIP	0.5563	0.5591	0.5545	0.3879	0.5532	0.5464
	GMWIP	0.5552	0.5571	0.6132	0.4030	0.5511	0.5635
	CWIPL	0.5459	0.5449	0.5655	0.4058	0.5541	0.5473
MTO	Push	0.5676	0.5991	0.5466	0.4142	0.5621	0.5168
	Pull	0.5186	0.5172	0.5477	0.4233	0.5228	0.5130
	CONWIP	0.5291	0.5274	0.5136	0.4899	0.5265	0.5210
	GMWIP	0.5302	0.5285	0.6201	0.4581	0.5247	0.5472
	CWIPL	0.5211	0.5182	0.5503	0.4711	0.5290	0.5315

루어지므로 전체적인 효율성은 병목공정의 효율성에 자연스럽게 동조하게 된다. 이러한 현상은 주문생산 시나리오(<Table 6> 참조)에서도 유사하게 나타나고 있다.

심각한 불균형을 갖고 있는 생산라인($t_6 = \text{Exp}(1/1.4)$)에 대한 효율성 평가결과는 재고생산 시나리오는 <Table 7> 그리고 주문생산 시나리오는 <Table 8>에 정리하였다. 심각한 병목공정이 존재하는 경우에는 일반적 불균형라인($t_6 = \text{Exp}(1/1.2)$)의 현상이 더욱 심해진다. Push의 우위가 더 이상 존재하지 않으며 반면 균형감 있는 효율성을 가진 혼합방식의 우위가 두드러지고 있다.

6.3 분류별 효율성 분석

본 절에서는 전체적인 관점에서 MFC의 효율성을 분석한다. 우선 재고생산과 주문생산의 관점에서 MFC별 효율성을 비교한 결과를 <Table 9>에 제시하였다. 표의 효율성 값은 <Table 3>에서 <Table 8>의 각 분류에 속하는 효율성 값에 대한 평균값이며, 이는 <Table 10>에서 <Table 12>까지 동일하게 적용하였다. 재고생산의 경우 산출량 효율성이 가장 좋은 Push 방식이 기능별 효율성에서는 우위를 점하고 있으나 낮은 재고 효율성으로 인하여 종합효율성 관점에서는 전체적으로 효율성의 균형이 우수한 혼합방식의 GMWIP이 가장 우수한 효율성을 보이고 있다. 이는 주문생산에서도 동일한 결과를 보이고 있다.

수요에 따른 효율성(<Table 10>)은 기능별 효율성의 경우 Push가 우위를 점하고 있지만 종합효율성 측면에서는 저수요와 고수요에서는 GMWIP 그리고 중수요에서는 Push가 우위를 점하고 있다. 생산라인 균형정도에 따른 효율성(<Table 11>)은 균형 생산라인, 불균형 생산라인, 심각한 불균형 생산라인 모두 GMWIP의 종합효율성이 가장 우수하다. GMWIP은 기능별 효율성에서는 타 MFC에 비하여 최고의 효율성을 갖지는 못하지만 전체적으로 2위권

에 속하는 기능별 효율성을 갖는다. 따라서 약점이 없는 GMWIP이 종합효율성 측면에서 좋은 평가를 얻고 있다.

<Table 10> Efficiency Comparison by Demand

Demand	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Low Exp (0.6)	Push	0.6574	0.6490	0.7214	0.6624	0.6410	0.6728
	Pull	0.6360	0.6342	0.8378	0.4446	0.6398	0.6683
	CONWIP	0.6425	0.6417	0.7433	0.5182	0.6404	0.6575
	GMWIP	0.6412	0.6376	0.9662	0.4865	0.6362	0.7135
	CWIPL	0.6433	0.6390	0.8876	0.4819	0.6582	0.6947
Medium Exp (0.8)	Push	0.6100	0.6304	0.5519	0.3502	0.6068	0.5488
	Pull	0.5842	0.5842	0.4615	0.3749	0.5897	0.5200
	CONWIP	0.5932	0.5961	0.5080	0.3889	0.5921	0.5378
	GMWIP	0.5985	0.6014	0.5308	0.3890	0.5947	0.5441
	CWIPL	0.5801	0.5783	0.4386	0.4138	0.5856	0.5231
High Exp (1.0)	Push	0.4352	0.5181	0.3665	0.2300	0.4385	0.3901
	Pull	0.3540	0.3526	0.3444	0.4151	0.3574	0.3753
	CONWIP	0.3923	0.3921	0.3510	0.4095	0.3870	0.4059
	GMWIP	0.3885	0.3893	0.3529	0.4161	0.3828	0.4084
	CWIPL	0.3771	0.3774	0.3474	0.4197	0.3808	0.4004

<Table 11> Efficiency Comparison by Line Balancing

Line type	MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
balanced	Push	0.6281	0.6293	0.5924	0.4842	0.6282	0.5946
	Pull	0.5651	0.5640	0.5560	0.4349	0.5776	0.5482
	CONWIP	0.5960	0.5961	0.5183	0.4572	0.5860	0.5566
	GMWIP	0.6044	0.6053	0.6938	0.4314	0.5906	0.6005
	CWIPL	0.5785	0.5766	0.5643	0.4746	0.6021	0.5713
moderately unbalanced	Push	0.6078	0.6327	0.5785	0.4493	0.5958	0.5700
	Pull	0.5659	0.5635	0.5882	0.4429	0.5662	0.5584
	CONWIP	0.5845	0.5879	0.6041	0.4289	0.5860	0.5733
	GMWIP	0.5774	0.5794	0.6105	0.4496	0.5768	0.5792
	CWIPL	0.5771	0.5753	0.6008	0.4313	0.5776	0.5736
seriously unbalanced	Push	0.4668	0.5354	0.4689	0.3092	0.4624	0.4472
	Pull	0.4432	0.4435	0.4995	0.3568	0.4432	0.4570
	CONWIP	0.4475	0.4459	0.4799	0.4306	0.4475	0.4713
	GMWIP	0.4463	0.4437	0.5457	0.4106	0.4463	0.4863
	CWIPL	0.4449	0.4427	0.5085	0.4095	0.4450	0.4734

<Table 12> Efficiency Comparison by MFC Mechanism

MFC	E_{TH}	E_U	E_{INV}	E_{CT}	E_{CS}	E_T
Push	0.5676	0.5991	0.5466	0.4142	0.5621	0.5373
Pull	0.5247	0.5237	0.5479	0.4115	0.5290	0.5212
CONWIP	0.5427	0.5433	0.5341	0.4389	0.5398	0.5337
GMWIP	0.5427	0.5428	0.6167	0.4305	0.5379	0.5553
CWIPL	0.5335	0.5316	0.5579	0.4385	0.5415	0.5394

모든 사나리오를 통합한 전체적인 관점에서의 MFC별 효율성 결과를 <Table 12>에 요약하였다. 다른 결과와 유사하게 기능별 효율성에서는 산출량 효율성, 가동율 효율성, 고객서비스 효율성이 가장 우수한 Push가 우위를 점하고 있지만 종합효율성 측면에서는 GMWIP이 가장 우수한 성능을 갖는다. 다른 혼합방식의 MFC인 CONWIP과 CWIPL 그리고 개성이 강한 Push는 2위권을 형성하고 있으며, Pull의 효율성이 가장 낮은 것으로 평가되었다.

7. 결론

본 논문에서는 다양한 경영환경에 대한 시나리오를 구성하고 5가지 MFC(Push, Pull, CONWIP, GMWIP, CWIPL)에 대하여 그 효율성을 비교 평가하였다. 경영환경은 수요량, 생산방식, 그리고 생산라인의 불균형정도를 적용하였으며, 효율성은 5가지의 기능별 효율성과 이를 평균화하여 가중평균한 종합효율성에 대하여 검증하였다. 기능별 효율성은 Push가 전반적으로 우수한 경우가 많았으나 전체적인 종합효율성 측면에서는 혼합방식인 GMWIP이 가장 우수한 것으로 판명되었다.

본 연구에서 사용한 가중치의 크기는 저자가 논리적인 추론에 의하여 결정한 것이다. 생산라인에서 효율성의 가중치는 생산전략, 생산하는 제품, 생산량, 생산방식 등 다양한 요소에 의하여 결정된다. 본 논문에서 제시한 평가방법을 적용하기 위해서는 개별 생산라인에 적합한 가중치를 계층적분석기법(A analytical Hierarchy Process : AHP)과 같은 방법을 적용하여 도출하여 사용하여야 한다.

본 연구는 다양한 생산환경에서 다양한 MFC에 대하여 복합적인 효율성관점에서 평가방법을 제시했다는 데 의의가 있다. 향후 연구로는 본 연구에서 다루지 못하였던 납기와 주문량을 고려한 평가방법과 MFC와 같이 다입력변수와 다출력변수를 가진 대상의 효율성 평가가 가능한 자료포락분석으로 연구를 확대할 계획이다.

References

- [1] AnyLogic, <http://www.xjtek.com/company>, 2012.
- [2] Grosfeld-Nir, A. and Magazine, M., Gated MaxWIP : a strategy for controlling multistage production systems. *International Journal of Production Research*, 2002, Vol. 40, No. 11, p 2557-2567.
- [3] Grosfeld-Nir, A., Magazine, M., and Vanberkel, A., Push and pull strategies for controlling multistage production systems. *International Journal of Production Research*, 2000, Vol. 38, No. 11, p 2361-2375.

- [4] Hopp, W.J. and Mark, L., *Spearman, Factory Physics : Foundations of Manufacturing Management*, New York, McGraw-Hill, 2007.
- [5] Khojasteh-Ghamari, Y., Developing a framework for performance analysis of a production process controlled by Kanban and CONWIP. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, Vol. 23, p 61-71.
- [6] Lee, K.H., Formal integration of Process Planning and Shop Floor Control With Petri Nets. *Proceedings of The Korean Operations Research and Management Science Society*, 1996, Vol. 1, p 619-622.
- [7] Sepehri, M.M. and Nahavandi, N., Critical WIP loops: a mechanism for material flow control in flow lines. *International Journal of Production Research*, 2007, Vol. 45, No. 12, p 2759-2773.
- [8] Sipper, D., *Production Planning, Control and Integration*, New York, McGraw-Hill, 1997.
- [9] Spearman, M.L., Woodruff, D.L., and Hopp, W.J., CONWIP : a pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*, 1990, Vol. 28, No. 5, p 879-894.