

신규제조라인의 목표생산용량 달성을 위한 비용효과적 시뮬레이션 절차

김승남 · 임석철*

아주대학교 대학원 산업공학과

A Cost-Effective Simulation Procedure for Achieving Target Throughput of New Production Lines

Seung-Nam Kim · Suk-Chul Rim

Department of Industrial Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

When a new facility such as automobile assembly line is designed, computer simulation is often used to estimate its actual throughput level. If it falls short of the target throughput level, then the design must be modified to increase the throughput capacity. For complex facilities having parallel processes and network of material flows, the modification procedure is not trivial. Even if the capacity of a particular bottleneck process is increased, the target throughput may not be achieved because the bottleneck may move to another process. Furthermore, each process has a different set of options with different cost to increase the capacity. In this study, we present a systematic procedure of determining the cost-effective set of options which achieves the target throughput.

Keywords: Capacity, Cost-Effectiveness, Target Throughput, Simulation, Line Design

1. 서론

오늘날 제품의 수명이 점점 짧아지고 있는 글로벌 제조환경에서 새로운 제품을 저원가로 생산하기 위해 저임금 국가에 공장을 건설하는 경우가 빈번하다. 신규 공장 건설시 제조라인의 throughput(최대생산용량)은 경영전략상의 목표치를 설정하고, 이를 달성할 수 있는 엔지니어링 설계를 수행한다. 그러나 라인이 실제로 가동될 때에는 설계단계에서 예상했던 생산 능력에 미치지 못하는 경우가 자주 발생한다. 그 이유로는 크게 세 가지를 생각할 수 있다. 첫째는 Hopp and Spearman(2001)에 따르면 제조라인의 각 공정의 용량(capacity)은 필수수준 이상이지만 전체 throughput은 목표치에 미달하는 경우를 여러 번 경험하였다고 언급하면서, 그 이유는 공정 내에서 준비시간(setup time), 작업자 가용성, 재작업, 불량, 설비고장 등에 의해 생성되는 변동성(variability)때문임을 지적하고 있다. 그러나 현업에서는 이러한 변동성을 고려하지 않고 대부분 엑셀

등을 사용하여 단순한 방법으로 위 값들을 추정하여 사용하고 있다. 둘째는 공장을 운영하는 단계에서 구체적인 모수 값(parameters)들이 엔지니어링 설계단계에서는 매우 불확실하여 개략적인 값을 사용할 수밖에 없으나 공장 건설이 구체화되면서 이 모수 값들도 점차로 구체화되므로 이러한 모수 값들의 차이가 throughput의 차이로 나타날 수 있다. 예를 들어 재납품의 적정 lot 크기와 빈도 등은 공급사가 확정되면서 그 위치 및 거리에 따라 달라질 수 있다. 세 번째 이유는 엔지니어링 설계단계에서 설계자의 판단 착오로 모수가 부적절한 값으로 책정되는 경우이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 최초의 엔지니어링 설계에 대하여 실제적인 변동성 및 물류흐름 등의 동적(dynamic)인 실제상황을 컴퓨터로 모의실험하여 필수 공정의 용량을 증감해야 한다.

일반적으로 제약자원의 용량을 증대하면 전체 라인의 throughput이 증가하지만 이는 어느 범위 내에서만 사실이다. 즉, 제약자원 A의 용량을 증가시키면 전체 라인의 throughput

* 연락처 : 임석철 교수, 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5, 아주대학교 대학원 산업공학과, Fax : 031-219-1610,

E-mail : scrim@ajou.ac.kr

2006년 1월 접수; 2006년 5월 수정본 접수; 2006년 5월 게재 확정.

도 따라서 증가하다가 제약자원이 B로 옮아간 이후로는 A의 용량증가가 throughput 증가에 기여하지 못하게 된다. 제약자원(constraint resource)이란 시스템의 throughput을 제약하는 자원을 말하며, 병목(bottleneck)공정이란 평균생산능력이 수요(demand)에 미치지 못하는 공정을 말한다(Jeong, 2002).

각 공정에 대하여 용량을 증대할 수 있는 방법은 공정의 특성에 따라 다양하다. 예를 들어 작업자 추가, 설비 증설, 다기능공화, 공정 재설계, 작업교대방식 변경, 셀(cell)생산방식 등의 도입, 보조기구 도입 등 다양한 방안이 가능하며 각 개선안의 비용도 일반적으로 상이하다. 제약공정의 용량을 너무 조금만 증대시키면 그 공정은 얼마 후 다시 제약공정이 될 것이다. 반대로 제약공정의 용량을 너무 크게 증대시키면 다른 제약공정에 의해 그 효과는 제한적이면서 소요비용만 커지는 비효율이 발생할 것이다.

본 논문에서 다루는 문제는 이와 같이 신규 제조라인을 설치할 때 최초의 엔지니어링 설계대로 시공하면 완성 후 운영 단계에서 실제 throughput이 목표치에 못 미치는 상황을 방지하기 위해 각 공정별 용량증대 대안의 비용을 고려하여 어떤 공정에 어떤 개선안을 적용하여 용량을 증대하면 최소의 비용으로 목표 throughput을 가장 효과적으로 달성할 수 있는지를 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 찾아내는 체계적인 절차를 제시하는 것이다. 즉, 너무 많은 비용을 들여서 애로공정의 용량을 불필요하게 많이 증대하지 않도록 비용-효과 측면에서 이를 최적화하는 문제이다. 제시된 절차는 크게 두 단계로 구성된다. 제1단계는 시뮬레이션을 이용하여 잠재적 제약자원들을 찾아내고, 제2단계는 목표 throughput을 달성하기 위해 각 공정별로 달성해야 하는 목표용량(target capacity)을 결정하여 이를 기준으로 가장 적절한 공정별 개선안을 선정한다. 제시된 방법의 이해를 돕기 위해 사례연구로서 전기제품의 조립라인을 대상으로 본 연구결과를 적용하였다.

2. 관련연구

시뮬레이션을 이용한 라인의 공정개선 연구는 주로 사례연구와 주기시간(cycle time) 감소에 집중되어 있다. Lee *et al.*(2005)은 신발산업에서 현재 보유하고 있는 자원의 작업효율을 높이기 위한 최적의 생산조건을 찾기 위하여 시뮬레이션 언어인 Arena 8.0을 사용하여 공정을 분석하였으며, 다구찌 기법을 이용하여 시뮬레이션의 실험을 계획하고 실시하였다. 병목공정을 비롯한 전체공정에서의 운영개선절차의 수립에 관한 연구로는 Nazzal *et al.*(2005)이 웨이퍼 생산라인에서의 개선절차를 제안하였다. 개선절차는 시뮬레이션과 실험계획법을 이용하여 cycle time을 줄일 수 있는 주요 개선요인을 찾아내고, 개선요인에 대한 경제성 평가를 실시하여 주기시간 감소의 경제적 영향에 대한 정량화를 실시하였다. Jeon *et al.*(1993)은 인쇄회로기판 제조공정에서 내층공정에 한하여 다양한 방안들에 대

해서 시뮬레이션을 실시하였다. Sim(2003)은 생산라인의 제약공정이 복수의 병렬설비로 구성되어 이들이 처리할 수 있는 제품의 크기가 다른 경우 전체 생산능력을 극대화하기 위한 공정중 재고의 구성비와 최적의 버퍼크기를 결정하는 절차를 제시하였다.

이 밖에도 제조라인의 용량과 throughput에 관련된 다수의 연구논문이 발표되었으나 본 논문에서 다루는 문제를 직접 다룬 연구는 찾아보기 어렵다. 시뮬레이션을 사용하는 기존의 대부분의 연구는 특정한 개선대안에 대해서 그 성과를 추정하는 제한적인 역할이지만 본 연구에서 제시하는 방법은 시뮬레이션을 사용하여 가장 적절한 개선안을 찾아내는 절차를 제시한다.

3. 시뮬레이션 절차 및 알고리즘

3.1 시뮬레이션 절차의 개요

본 연구에서 제안하는 시뮬레이션 절차는<Figure 1>에서 보듯이 신규 제조라인을 시뮬레이션 모델링하고 그 입력데이터로서 각 공정의 용량(capacity)에 관련된 모수의 초기 설계치들을 입력하여 시뮬레이션을 수행 후 그 출력값인 시스템 throughput(T)이 목표 throughput(T_0)을 달성하는지를 평가한다. 시스템 throughput이 목표 throughput에 도달하지 못하는 경우에는 필요한 공정의 용량 모수를 증대한 후 다시 시뮬레이션을 수행하며, 시스템 throughput이 목표 throughput을 달성할 때까지 이를 반복한다. 절차는 다음과 같은 세 단계로 구성된다.

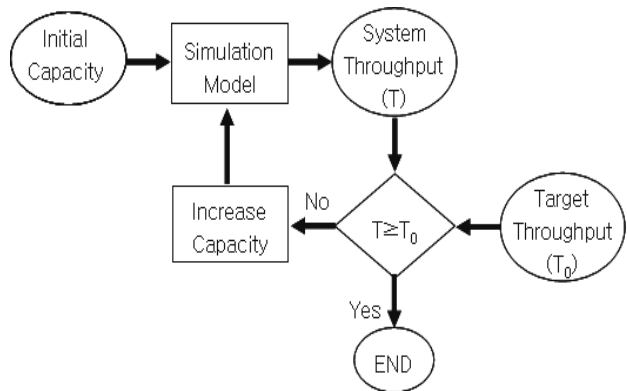


Figure 1. Iterative simulation process to achieve the target throughput.

3.1.1 제1단계: 잠재적 제약공정 발견

일반적으로 이용률이 높은 공정이 반드시 제약공정은 아니다. 만일 공정A 뒤에 유한한 크기를 갖는 buffer가 있는데도 공정A의 이용률이 높으면 공정A를 제약공정이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 제4장 사례의 시뮬레이션에서 각 공정 뒤에 제한된 크기의 buffer를 가지므로 이용률이 가장 높은 공정이 제

약공정이라고 볼 수 있다. 제약공정은 시스템의 throughput을 직접 제약하는 공정이므로 제약공정의 처리능력을 증가시키면 시스템의 throughput은 증가한다. 그러나 앞서 언급한 대로 현재의 제약공정의 용량이 증가함에 따라 <Figure 2>에서 보듯이 어느 범위까지는 시스템의 throughput이 증가하지만 제약공정의 용량이 특정값을 지나면 다른 공정이 제약공정이 되므로 더 이상의 시스템 throughput의 증가는 나타나지 않는다. 이와 같이 현재의 제약공정뿐 아니라 현재 제약공정은 아니지만 현재 제약공정의 용량이 증대됨에 따라 추후에 제약공정이 될 일련의 공정들을 “잠재적 제약공정(potential constraint processes)”라고 칭하기로 한다.

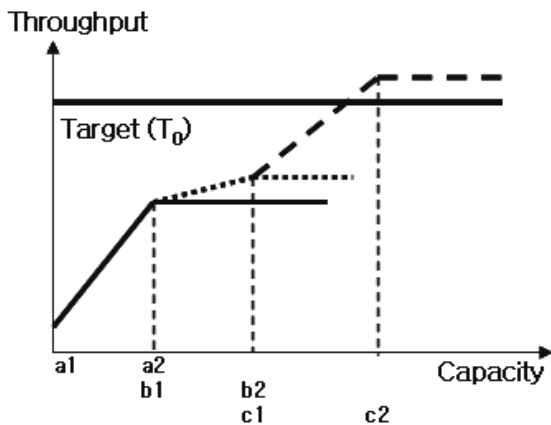


Figure 2. Increase of system throughput by increasing capacity of potential constraint processes.

본 논문에서는 시스템의 목표throughput의 달성을 저해하는 잠재적 제약공정들을 찾아내기 위해 이용률(utilization)을 활용한다. 시뮬레이션 결과 이용률이 가장 높은 공정이 첫 번째 제약공정(A)이 되며, A공정의 용량을 두 배로 증가시키면 시스템의 throughput은 증가한다. 이때 throughput이 개선되지만 목표 throughput에 미달하는 경우에는 새로이 이용률이 가장 높은 공정(B)이 새로운 제약공정이 될 것이므로 이를 잠재적 제약공정 리스트에 추가한다. 다시 B의 용량을 두 배로 증가시키면 throughput이 개선되고, 시스템의 throughput이 목표 throughput을 초과할 때까지 이 과정을 반복함으로써 목표 throughput 달성을 저해하는 잠재적 제약공정들을 모두 찾아낸다. 초기 엔지니어링 설계안도 어느 정도 목표throughput에 근접한 throughput을 내도록 설계한 것이므로 각 제약공정의 용량을 두 배로 증가시키면 일반적으로 제약공정이 다른 공정으로 이동하게 된다.

3.1.2 제2단계 : 공정별 목표용량 결정

제2단계는 제1단계에서 발견한 잠재적 제약공정들 각각에 대하여 필요한 목표용량을 결정하는 것이다. 각 공정별 목표용량(target capacity)이란 전체 시스템이 목표 throughput을 달

성하기 위하여 각 공정이 보유해야 하는 최소한의 용량을 의미하며, 잠재적 제약공정들의 개선안 수립에 대한 가이드라인을 제시한다. 제2단계 시뮬레이션은 제약공정의 용량을 점차적으로 증대하여 더 이상 throughput의 개선이 지속되지 않을 때까지 증대시키고, 이어서 다음 제약공정에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 궁극적으로 목표 throughput이 달성될 때까지 잠재적 제약공정의 순서를 따라 반복한다.

예를 들어, <Figure 2>에서 잠재적 제약공정이 차례로 공정 A, B, C인 경우 A의 용량을 점진적으로 현행 설계의 용량(a1)으로부터 a2까지 소량씩(incrementally) 증가시키면서 시뮬레이션을 수행한다. 이때 throughput은 거의 직선적으로 증가되나 A의 용량이 일정값(a2)에 도달하면 더 이상 throughput이 증가하지 않게 된다. 이때의 공정A의 용량 a2가 A공정의 목표용량이 된다. 매 시뮬레이션마다 throughput의 증가가 정지되었는지의 여부는 그 증분과 작은 상수(ϵ)와 비교하여 결정한다. 두번째 잠재적 제약공정인 B공정을 초기용량 b1으로부터 소량씩 증가시키면서 시뮬레이션을 수행하면 throughput은 역시 직선적으로 개선되나 B공정의 용량이 일정값(b2)에 도달하면 더 이상 throughput이 증가하지 않게 된다. 이때 b2가 B공정의 목표용량이 된다. 이와 같은 과정을 반복하여 잠재적 제약공정 A, B, C의 목표용량을 각각 찾아낸다. <Figure 2>에서 용량 a2와 b1, 그리고 b2와 c1 등은 편의상 동일지점에 표시되었으나 두 값이 동일함을 의미하는 것은 아니다. <Figure 2>에서 잠재적 제약공정들을 차례로 용량을 개선할 때 throughput 증가율, 즉 증가의 기울기는 항상 감소하지는 않을 수도 있다.

3.2 개선안 선정기준

결정된 각 잠재적 제약공정의 목표용량을 사용하여 공정별 개선안을 선정해야 한다. 이 때 개선안 선정의 기준은 총비용을 최소화하는 전략과 비용대비 효과를 최대화하는 전략을 고려할 수 있다. 최소비용 전략이란 각 제약공정에 대하여 각 개선안을 적용할 때 달성되는 용량이 그 공정의 목표용량을 초과하는 개선안 중에서 비용이 최소인 개선안을 선택하는 전략을 말한다. 반면에 최대효과 전략이란 각 제약공정에 대하여 목표용량을 초과하게 하는 개선안 중에서 그 소요비용을 고려할 때 단위비용당 용량증가가 최대인 개선안을 선택하는 전략이다. 제약자원을 개선하는데 있어서 비용의 제약이 더 중요한 요소인 경우에는 최소비용 전략을 적용할 필요가 있다. 반면에 장기적 관점에서 향후 목표throughput의 상향조정이 예상되어 투자대비 전체적 효과 극대화를 추구할 수 있는 상황이라면 개선안의 선정은 최대효과 전략에 따라 선정해야 할 것이다.

3.3 알고리즘

앞 절에서 서술한 절차를 수리적 부호를 사용하여 표현하기 위한 부호와 알고리즘은 다음과 같다.

<부호>

- R_k = k번째 잠재적 제약공정
- Q_k = k번째 잠재적 제약공정의 용량
- Q_k^0 = 초기 설계안에서 k번째 잠재적 제약공정의 용량
- Q_k^* = k번째 잠재적 제약공정의 목표용량
- C_{kj} = k번째 잠재적 제약공정의 j번째 개선안의 비용
- Q_{kj} = k번째 잠재적 제약공정에 j번째 개선안을 적용시 얻어지는 용량
- $e_{kj} = (Q_{kj} - Q_k^0) / C_{kj}$: k번째 잠재적 제약공정에 j번째 개선안을 적용시 단위비용당 용량증가
- T_0 = 목표 throughput
- α = 용량증가단위 모수($\alpha=0.05$)
- ϵ = throughput 증가 정지기준 모수($\epsilon=0.01$)

<알고리즘>

- step 0 : 주어진 제조라인에 대하여 시뮬레이션 모델링 후 초기 모수를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 각 공장(자원)의 이용률과 시스템의 throughput(T)을 측정한다.
If $T \geq T_0$, stop : 시뮬레이션을 종료하고, 초기 설계안을 실행한다.
else : goto step 1.
- step 1(잠재적 제약공정 발견) : 잠재적 제약공정들을 차례로 찾아낸다.
1.1 $k=1$
1.2 이용률이 가장 높은 공정을 k번째 잠재적 제약공정(R_k)으로 정한다.
 R_k 의 용량을 충분히(100배로) 늘리고 시뮬레이션을 다시 수행하여 각 공정의 이용률과 throughput T_k 를 측정한다.
If $T_k \geq T_0$, goto step 2 ;
else $k=k+1$, goto 1.2
- step 2(공정별 목표용량 결정) : 각 잠재적 제약공정에 대하여 용량을 점진적으로 늘려가면서 시뮬레이션을 수행하여 throughput의 증가가 더 이상 없을 때까지 반복한다.
2.1 $k=1$
2.2 $m=1$

- 2.3 $Q_k = Q_k^0(1 + \alpha m)$ 로 늘여서 시뮬레이션을 수행
If $T_{km} \geq T_0$, goto step 3
else if $|T_{km} - T_{km-1}| \leq \epsilon$, $Q_k^* = Q_k$, $k=k+1$, goto 2.2
else $m=m+1$, goto 2.3

step 3(개선안 선정) : 두 가지 전략에 따라 각 잠재적 제약공정에 대하여 3.2절에 서술한 선정기준에 따라 개선안을 선택한다.

Step 1.2에서는 잠재적 제약공정을 발견하기 위한 목적으로 이용률이 가장 높은 공정의 용량을 무한대로 실제로는 100배로) 늘인다.

4. 사례

앞장에서 제시한 방법을 자세히 설명하기 위하여 본 장에서는 BLU(Back Light Unit) 제조라인의 신규설계 사례를 소개하고자 한다. BLU는 액정화면(Liquid Crystal Display)의 구성품으로서 LCD에 균일한 빛을 공급하는 광원(光源)장치이다. LCD의 수요가 팽창함에 따라 LCD 조립라인의 한 부분으로서 BLU 조립라인을 신규 설치할 때 LCD의 목표 생산능력에 따라 BLU의 목표 throughput이 경영진에 의해 결정되고 BLU 조립라인은 이를 충족하도록 설치 및 운영되어야 한다.

4.1 프로세스 및 데이터

BLU 조립라인은 크게 램프를 제조하는 라인과 제작된 램프와 다른 부품을 조립하여 BLU를 완성하는 두 개의 라인으로 구성되어 있다. 본 논문에서 다루는 범위는 <Figure 3>에서 보듯이 램프 제조라인은 제외하고 부품과 램프의 입고에서 램프의 조립 및 출하까지 총 18개 공정을 대상으로 한다. BLU의 부품은 각 부품별 납품업체에 의해 도착하면 원자재 창고 담당 작업자에 의해 원자재 창고에 입고된다. 부품은 입고 후 저장실로 필요한 수량만큼 이동하고, 저장실에서 부품별 전용카드에 적재되어 준비실로 이동 보관한다. 입고된 램프는 soldering 작업을 거친 후 다른 부품들과 함께 이송준비 작업을 거쳐

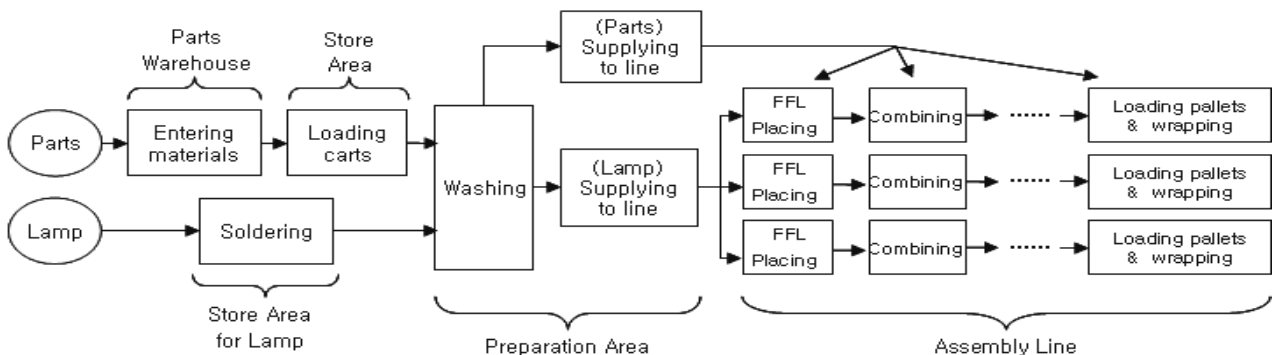


Figure 3. Process flow of Back Light Unit assembly line.

washing 공정 후 조립라인으로 이송된다. 준비실에 보관중인 부품은 조립실의 부품 공급 작업자가 필요한 때에 cart를 사용하여 조립라인의 각 공정으로 이송된다. 조립라인은 컨베이어를 따라 반제품이 13개 공정을 차례로 거치면서 각 공정에서 담당 작업자가 부품을 조립하여 완성한다. 조립실에는 3개의 동일한 조립라인이 병렬로 설치되었다. 완성된 BLU는 팔렛에 적재 후 포장이 완료되면 완제품 창고로 이동하여 보관한다. BLU 조립라인의 목표 throughput은 시간당 270개로 결정되었으며, 각 공정은 이에 맞추어 초기 설계안의 용량을 갖추었다. 이러한 조립라인을 Arena 8.0을 사용하여 시뮬레이션 모델링하였다.

<Table 1>에서는 각 공정의 용량(capacity) 대신에 용량의 역수 관계인 공정별 평균주기시간(cycle time : CT)을 표시하였다. 각 공정은 기계설비나 작업자 또는 두 가지 모두로 구성되어 있다. 라인 운영시 각 공정의 주기시간은 평균치±10%의 범위에서 대칭적 삼각분포를 따른다고 가정하였다.

Table 1. Planned cycle time of each process in BLU assembly line

Location	Process	Planned Cycle Time (sec)	Planned Resource	
			Machine	Worker
Parts Warehouse	1 Entering Materials	330	--	1
Parts Store Area	2 Loading Carts	120	--	1
Lamp Store Area	3 Soldering	30	1	1
Preparation Area	4 Washing	15	2	1
	5 Supplying to Line	45	1	3
Assembly Line	6 FFL Placing	30	--	3
	7 Combining Side Mold	31	--	3
	8 Withstanding Voltage Test	21	--	3
	9 Combining Invt, S/C	30	--	3
	10 Combining Control PCB, S/C	31	--	3
	11 Placing Optical Sheets	42	--	3
	12 1st Grime Removal	29	--	3
	13 Dimming Test	29	--	3
	14 Combining Middle Mold	42	--	3
	15 2nd Grime Removal	39	--	3
	16 Appearance Inspection	35	--	3
	17 Loading Tray	15	3	3
	18 Loading Pallets and Wrapping	15	3	1

4.2 잠재적 제약공정 발견

<Table 1>과 같은 공정별 주기시간의 초기 설계치를 사용하여 26시간의 조립작업에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 초기 4시간의 데이터를 제외한 22시간의 데이터를 수집하였다. 각 시뮬레이션은 3.2GHz, 1GB 메모리의 개인용 컴퓨터에서 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 <Table 2>에서 보듯이 원자재 입고 공정(Entering Materials)의 이용률(u)이 100%로서 첫번째 제약

공정으로 나타났다(<Table 2>에서 이텔릭체가 제약공정을 나타냄.). 이때 시스템의 throughput은 119 unit/hr로서 목표 throughput인 270 unit/hr에 크게 못 미치고 있다. 이에 원자재 입고담당 작업자를 100명으로 늘려 1차 개선 후 시뮬레이션을 수행한 결과 Soldering(u=96.7%)이 두 번째 잠재적 제약공정으로 나타났다. 그 이유는 초기 엔지니어링 설계에 사용된 cycle time 30초가 너무 길게 (즉, 용량이 너무 작게) 설정된 오류 때문이다. Soldering 공정은 <Figure 3>에서 보듯이 세 개의 병렬 조립라인에 램프를 공급해야 하며, 각 조립라인의 CT는 13개 직렬공정중 가장 느린 공정에 의해 CT=42초가 되므로, Soldering공정은 CT가 약 14초로 초기에 설정이 되어야 하는데 엔지니어링 설계단계에서 이러한 관계를 간과하여 CT를 30초로 잘못 설정한 것이 시뮬레이션에 의해 발견된 것이다. 이에 Soldering 공정의 용량을 기계 및 작업자를 각각 100대 및 100명으로 대폭 늘린 후 시뮬레이션을 수행하면 2차 개선 후 throughput은 229 units/hr로 증가하며, 새로운 세번째 잠재적 제약공정은 Loading Carts(u=99.7%)가 된다.

Table 2. Utilization(%) of each process and constraining processes as a result of 1st step simulation

Process	Initial	Improved				
		1st	2nd	3rd	4th	
Parts Warehouse	Entering Materials	100	1.2	2.3	2.3	2.3
Parts Store Area	Loading Carts	48.6	48.9	99.7	1.0	1.0
Lamp Store Area	Soldering	96.7	96.7	1.8	2.0	2.0
Preparation Area	Supplying to Line	15.3	15.2	31.1	32.2	42.8
	Washing	7.7	7.6	15.6	16.0	21.3
	FFL Placing	33.3	33.3	61.8	66.7	88.4
Assembly Line	Combining Side Mold	34.4	34.4	63.9	69.0	91.3
	Withstanding Voltage Test	23.3	23.3	43.3	46.7	61.8
	Combining Invt, S/C	33.1	33.1	61.9	66.7	88.3
	Combining Control PCB, S/C	33.9	33.9	64.0	69.0	91.2
	Placing Optical Sheets	45.6	45.5	86.6	93.4	1.0
	1st Grime Removal	31.3	31.3	59.8	64.5	85.3
	Dimming Test	31.2	31.2	59.8	64.5	85.3
	Combining Middle Mold	45.0	45.0	86.6	93.4	1.0
	2nd Grime Removal	31.0	31.0	59.9	64.5	93.1
	Appearance Inspection	32.0	31.9	62.0	66.7	88.1
Loading Tray	16.0	15.9	31.1	33.4	44.1	
	Loading Pallets and Wrapping	0.4	0.4	0.8	0.8	1.1
System Throughput (units/hour)		119	119	229	246	324

Loading Cart공정의 자원, 즉 작업자를 100명으로 늘린 3차 개선 후 시뮬레이션을 수행한 결과 Placing Optical Sheets 공정과 Combining Middle Mold 공정이 동일한 이용률(u=93.4%)로 동시에 잠재적 제약공정에 포함되며 throughput은 246 units/hr로 증가된다. 이 두개의 공정 모두 용량을 100배로 증가시킨 4

차 개선 결과 BLU 조립라인의 throughput이 324 units/hr로서 목표치인 270 unit/hr를 처음으로 초과하였다. 따라서 잠재적 제약자원은 Entering Materials, Soldering, Loading Carts, Placing Optical Sheets, Combining Middle Mold의 순임을 알 수 있다. 잠재적 제약공정 발견을 위한 1단계 시물레이션의 수행시간은 30여분 정도가 소요되었다.

<Table 2>의 1차 개선에서 Soldering 공정의 이용률이 100%가 아니고 96.7%로 나타나는 이유는 제한된 수의 대차(cart)가 시스템 내부를 돌아다니면서 물류이송을 수행하고 있는데 대차가 Soldering 공정에 미처 돌아오지 못한 경우가 간혹 발생하여 이 시간에 Soldering 공정이 쉬게 되었기 때문이다. 4차 개선 후에도 Supplying to Line 공정의 이용률이 42.8%밖에 그치는 이유는 엔지니어링 설계단계에서 라인공급자를 너무 많이(3명) 배치했기 때문이다. 즉, 시물레이션을 사용하여 용량이 부족한 공정뿐만 아니라 자원이 지나치게 많이 투입된 공정도 발견해 낼 수 있다.

4.3 공정별 목표용량 결정

BLU 조립라인이 목표 throughput을 달성하기 위해 앞 절에서 잠재적 제약공정으로 파악된 각 공정의 목표용량을 결정하기 위하여 제2단계의 시물레이션을 실시하였다. 첫 번째 제약공정인 원자재 입고공정의 주기를 초기치 330초로부터 5%씩 점진적으로 줄여가면서 시물레이션을 수행한 결과 CT=110초까지 줄였을 때(즉, 용량을 늘렸을 때) 시스템 throughput의 증가가 더 이상 나타나지 않으므로 <Figure 1>의 a2점에 해당함) 이를 입고공정의 목표 주기로 설정하였다.

이어서 Soldering 공정에 대해서 초기치 30초로부터 5%씩 점진적으로 주기를 줄여가면서 시물레이션을 수행하여 시스템 throughput의 증가가 더 이상 나타나지 않을 때까지 반복하였으며, 이때의 soldering 공정의 목표 주기는 12초로 나타났다. 같은 방법으로 나머지 세 공정에 대해서도 <Table 3>

과 같이 목표 주기를 결정하였다. 위 2단계 시물레이션에 2시간 정도가 소요되었다. 조립라인이 3개이므로 라인별 평균 주기는 $3,600 / (270 / 3) = 40$ 초가 된다. 원자재 입고는 대량 입고이므로 목표 주기가 40초보다 길게 나타나며, 대차완성(loading carts)도 대차를 기다리는 시간이 발생하므로 목표 주기는 40초보다 길게 나타났다.

Table 3. Target cycle time of each potential constraint process

Potential Constraint Process		Cycle Time (sec)	
Rank	Process	Planned	Target
1	Entering Materials	330	110
2	Loading Carts	120	80
3	Placing Optical Sheets	42	38
4	Combining Middle Mold	42	38
5	Soldering	30	12

4.4 개선안 선정

<Table 3>의 결과를 사용하여 각 공정의 목표 주기를 달성하기 위한 개선안을 선정하였다. 예를 들어 원자재 입고공정의 개선안 중에서 그 주기가 목표 주기(110초)를 초과하지 않는 “사용가능한” 개선안은 <Table 4>에서 보듯이 네 가지이다. 각 개선안에 대한 비용을 추정하여 월 단위 비용으로 환산하여 <Table 4>에 나타냈으며, 각 개선안의 소요비용을 고려한 단위비용당 용량증가 $e_{kj} = \{(\text{목표CT} - \text{개선후 CT}) / \text{비용}\}$ 을 계산하였다. 제3장에서는 개념설명과 알고리즘 이해를 보다 효과적으로 하기 위해 용량(capacity)을 사용하여 설명하였으나, 사례에서는 공정의 CT를 사용하였다. 이 둘은 역수관계이므로 위 두가지 수식은 비록 수학적으로는 동일하지 않으나 개념상으로는 동일하므로 <Table 4>에서는 CT를 사용하여 e_{kj} 를 구하였다. 고정시설투자비용이 들어가는 개선안의 경우 월 비용은 (월간 설비감가상각비 + 월간 운영비)로 계산하였다.

Table 4. Selection of alternatives under the two criteria

Potential Constraint Process	Cycle Time		Available alternatives				Selected	
	Planned	Target	Proposition	CT	Monthly Cost	e_{kj}	Min Cost	Max Effect
Entering Materials	330	110	1) Add two workers	110	500	0.00	4	2
			2) Move one worker from Supplying to Line & add one worker	100	250	0.04		
			3) Changing tasks & add one worker	105	250	0.02		
			4) Move one person from Supplying to Line & Changing tasks	108	150	0.01		
Loading Carts	120	80	1) Add one worker	60	250	0.08	2	1
			2) Move one worker from Supplying to Line	78	50	0.04		
Placing Optical Sheets	42	38	1) Add one worker(Changing a Tray machine)	21	180	0.09	2	2
			2) Improve Placing Optical Sheets process	33	30	0.17		
Combining Middle Mold	42	38	1) Add one worker(Changing a Tray machine)	21	180	0.09	2	1
			2) Change Middle Mold design	36	30	0.06		
Soldering	30	12	1) Add two machines	10	200	0.01	2	1
			2) Add one machine & improve soldering design	11	110	0.009		

BLU 조립라인 전체의 throughput을 목표throughput 이상으로 만드는 여러 대안 중에서 비용을 최소화하는 전략으로 개선안을 선정한다면 Entering Materials의 경우 제4안, 그리고 나머지 네 공정은 모두 제2안을 최적의 개선안으로 각각 선정하게 된다. 이 경우 월간 총 개선투자비용은 $(150+50+30+30+110) = 370$ 만원이 된다. 반면에 최대효과전략에 기초하여 개선안을 선정한다면 e_{ij} 가 가장 큰 개선안을 선정하므로 <Table 4>의 가장 우측열과 같이 대안을 선정하며 이 경우의 월간 총 개선투자비용은 $(250+250+30+180+200) = 910$ 만원이 된다. 즉, 현재의 목표 throughput인 시간당 270개 생산을 위해서는 최소 월 370만원의 투자만 있으면 되지만, 향후 이 목표 throughput이 증가할 것으로 예상되는 경우에는 그 2.5배에 해당하는 월 910만원을 지출하면서 각 공정의 용량을 충분하게 확보해 두는 것이 비용대비 가장 효과적인 투자안이 된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 신규로 설치하는 제조라인에 대하여 설계단계에서 시뮬레이션을 이용하여 목표throughput을 달성하도록 각 공정의 용량을 조정하기 위한 일련의 절차를 제시하였다. 일반적으로 시뮬레이션 모형은 주어진 특정 모형의 성능(performance)을 추정하는데 이용해 왔으나, 본 연구에서는 시뮬레이션을 반복적으로 수행하면서 제조라인의 내부에 잠재해 있는 제약공정들을 미리 발견하고 이들의 용량을 적절히 증대시킴으로써 목표 throughput을 달성하게 하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 사용하면 공정의 용량을 증대할 때 특정 공정의 용량을 불필요하게 많이 증대하는 낭비를 피하고 비용대비 가장 효과가 큰 대안을 선정할 수 있다. BLU 조립라인에 적용해 본 결과 시뮬레이션 수행에 총 2시간 30분 정도의 시간이 소요되었으며, 이는 신규로 설치하는 대형 제조라인 또는 공장의 향후 실제 throughput을 목표 throughput까지 보장하기 위한 중요한 단계로서 충분히 사용할만한 가치가 있는 시간이라고 사료된다.

본 연구에서는 새로운 라인 설치시 목표 throughput을 달성하는데 그 목표를 두고 있어서 용량이 부족한 공정에 대한 대

책을 고려하고 있다. 그러나 초기 엔지니어링 설계단계에서 용량이 과다하게 책정된 공정에 대해서도 <Table 2>의 공정별 이용률을 검토하는 과정에서 발견하여 조정할 수 있다.

향후 연구과제로는 제조라인에서 단일 제품을 생산하는 경우가 아닌 다수의 제품이나 제품군을 생산하는 경우에 목표 throughput을 달성하기 위한 절차에 대한 연구가 필요하다. 다수의 제품이나 제품군의 경우 제품별로 필요한 공정과 주기시간이 다를 수 있다. 개선안의 투자비용 추정도 현실적인 모호성이 상존하므로 이에 대한 원가공학 관점의 추가연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문의 심사과정에서 심도있는 비평으로 논문의 완성도를 크게 개선하도록 도와주신 익명의 심사자들에게 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Hopp, W. J. and Spearman, M. L. (2001), *Factory Physics*, 2nd ed., p. 630, McGraw-Hill.
- Jeon, T. B., Kim, Y. H., and Ma, S. H. (1993), Analysis of PCB Manufacturing System Using Computer Simulation, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **6**(2), 137-150.
- Jeong, N. K. (2002), *TOC Golden Rule*, 94, HanEon, Korea.
- Lee, K. K., Yun, W. Y., Mun, I. K., Cho, H. S., and Cha, B. C. (2005), Development of Simulation Model for Improvement of Production System in Small and Medium Sized Shoe Companies, *IE Interfaces*, **18**(1), 35-43.
- Nazzal, D., Mollaghasemi, M., and Andersons, D. (2006), A Simulations-based evaluation of the cost of cycle time reduction in Agere Systems Wafer Fabrication Facility - a case study, *International Journal of Productions Economics*, **100**, 300-313(available online February 2005).
- Sim, B. T. (2003), *Optimal part feeding rule and buffer size model for production line with capacity constraints resource of unequal processing specifications*, The Graduated School of Ajou University, Korea.