

# 재투입 생산라인에서 방어적 생산능력의 효과성에 관한 연구

김선민\* · 강현곤\*\*

## A Study on the Effectiveness of Protective Capacity in a Re-entrant Line

Seonmin Kim\* · Hyunkon Kahng\*\*

### □ Abstract □

This paper addresses the effect of protective capacity on the lead time and throughput of a re-entrant line, where statistical fluctuations exist in the form of variation in processing times and machine breakdowns. The specific framework employed in the paper is a five station re-entrant line, structured as a closed network model. This paper argues that protective capacity can be used in conjunction with WIP inventory in order to reduce the lead time and to increase the throughput of a line. Simulation analyses are included to give insight into the effectiveness of protective capacity.

## 1. 서 론

반도체 제조과정은 반도체 웨이퍼에 여러 다른 인쇄회로를 반복적으로 부과·생성하면서 다품종의 제품을 생산하는 매우 복잡한 과정으로 이루어져 있다. 반도체 제조과정을 복잡하게 하는 요인으로 생산라인이 다품종의 제품을 생산할 뿐만 아니라 한 제품에 대하여 수백 개의 작업이 수행되고 또한 원자재(웨이퍼 롯트)가 동일한 공정에 여러

번 반복적으로 투입되어야 하는 것을 들 수 있다. 특히, 반도체 제조과정처럼 재투입 생산라인의 특성을 지닌 생산라인에 있어, 재고수준을 낮게 유지하면서 목표생산량을 고객에게 적시에 납품할 수 있는 능력을 획득하는 것이 시간 경쟁시대에 경쟁우위를 획득하는데 있어 매우 중요하다.

그런데, 반도체 제조과정을 포함한 거의 모든 제조과정에 있어 설비의 고장이나, 가공시간의 편차와 같은 통계적 변동(statistical fluctuations)이

\* 서울산업대학교 산업경영학과 조교수

\*\* 연세대학교 경법대학 경영학과 부교수

존재하며 이러한 변동이 제조과정에 미치는 영향이 무시된다면 생산라인은 목표한 산출량을 유지하기가 매우 어렵게 되어 목표한 납기를 달성할 수 없다. 따라서, 이러한 변동의 영향을 상쇄시키기 위한 방어적 수단이 제조과정에서 필수적으로 고려되어야 한다.

전통적으로, 제조기업이 목표산출량을 달성하면서 제품을 적시에 납품할 수 있는 수단으로 사용해 온 것이 재공품 재고(work-in-process inventory)이다. 이러한 재고의 사용으로 인하여, 제조과정의 각 공정이 독립성을 유지할 수 있게 되어 통계적 변동이 생산라인의 성과에 미치는 영향을 어느 정도 상쇄할 수 있다. 또한 제품 납기 리드타임은 제조 리드타임에 종속되지 않고 완제품 재고에 의해 독립적으로 달성된다.

그런데, 1980년대 이래로 적시생산시스템(JIT)이 제조과정에 도입·적용되면서 제조과정의 낭비적 요소의 제거를 통한 지속적인 개선에 관심이 집중되기 시작하였으며, 그 결과 생산담당자들은 제조과정에 있어 통계적 변동이 미치는 영향을 통제하여야 할뿐만 아니라 낭비적 요소를 제거하는 방안이 필요하게 되었다. Hall[9]은 제조과정의 낭비적 요소로서 과대 생산, 대기시간, 이동시간, 불필요한 작업처리, 재고, 작업동작, 그리고 불량품 등 7가지를 제시하고 있으며 이러한 낭비적 요소들은 제조과정의 일정계획과 생산계획 및 통제 등에 의해 제거될 수 있다고 하였다. 즉, JIT는 지속적인 개선이 추구되어야함을 강조하면서 제조 리드타임(원재료가 생산라인 투입으로부터 완제품이 생산되기까지 소요된 시간)의 단축 및 높은 재고 수준에 대한 비효율성에 대한 감소를 이룰 수 있는 일정계획으로 칸반시스템의 도입을 주장하였다. 특히, 생산관리자들은 JIT 시스템을 도입·적용하면서 전통적으로 방어적 수단으로 사용해 온 재공품 재고에 대한 유지비용이 그들이 생각한 것보다 훨씬 크다는 것을 인식하였다[5]. 예를 들어, 통계적 변동의 영향으로부터 목표산출량을 방어하기 위해 제조과정에 너무 많은 재공품 재고를 투

입한다면 재공품은 가공을 위한 대기에 많은 시간을 소비하게 되어 결국 생산된 제품의 단위당 제조리드타임이 길어진다. 이는 신속한 납기에 의한 경쟁시대에 있어, 기업이 경쟁우위를 차지할 수 없게 한다. 이와 더불어, 높은 재고 수준의 유지는 기업의 투자 자본이 재고자산으로 유지된다는 점과 잠정적으로 높은 폐기비용을 발생시킬 수 있는 요인으로 작용하므로 JIT에서 주장하는 낭비적 요소에 해당한다. 따라서 JIT에서는 재공품 재고의 감소가 중요한 생산관리의 목표가 된다. 그런데, 재공품 재고 수준의 감축은 생산량의 감축이라는 부정적인 결과를 발생시킬 수 있다. 결과적으로, 목표한 생산량을 유지하면서 동시에 낮은 수준의 재공품 재고를 유지하고 제조 리드타임을 감소시킬 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 제조과정내의 목표산출량을 유지하고 동시에 재고 수준을 낮추면서 제조 리드타임을 감소시킬 수 있는 방법으로 방어적 생산능력(protective capacity)의 사용을 주장한다. APICS 용어 사전[2]에 의하면 방어적 생산능력은 통계적 변동을 상쇄하기 위하여 사용된 제조시스템의 애로공정의 생산능력(constraint capacity)을 초과하는 비애로공정의 생산능력(non-constraint capacity)이라고 정의하고 있다. 비애로공정이 방어적 생산능력을 보유하게 되면 재공품을 다음 공정으로 신속하게 이동시킬 수 있어 애로공정이 자재부족(starvation)에 의해 운영이 중단되지 않도록 하며 또한 애로공정 다음의 공정(들)이 통계적 변동에 의한 영향(blockage or starvation)으로부터 신속히 회복할 수 있도록 한다. 따라서, 방어적 생산능력은 통계적 변동의 영향으로부터 제조과정의 목표 산출량을 방어하면서 동시에 애로공정 및 비애로공정의 가공 능력을 지원하여 제조 리드타임을 단축시키는 역할을 한다. 이러한 논리에 근거하여 본 연구는 방어적 생산능력이 제조리드타임을 감축시킬 수 있는 방법이 될 수 있음을 주장한다.

본 연구의 목적은 재투입 생산라인 하에서 생산 능력과 재공품 재고간의 관계를 고찰함으로써 방

어적 생산능력의 효과성을 제시하는데 있다. 이를 위해, 본 연구는 제조과정의 통계적 변동요인으로 가공시간의 편차와 설비의 고장이 존재한다는 가정 하에 주어진 재공품 재고 하에서 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임이 방어적 생산능력을 지니지 못한 즉, 균형 라인의 제조 리드타임과 차이가 있는 지를 조사한다. 구체적으로, 본 연구는 연구방법으로 시뮬레이션을 사용하여 1) 방어적 생산능력의 사용이 제조 리드타임을 단축시킬 수 있는지를 조사하고 2) 가공시간이 확률적 편차를 갖고 모든 작업장이 기계(설비) 고장을 일으킬 수 있는 생산환경 하에서 방어적 생산능력과 방어적 WIP 재고간의 상충관계(trade-off relationship)가 존재하는지를 분석하여 3) 생산라인의 통계적 변동에 따른 방어적 생산능력의 효과성을 제시한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존 연구에서 나타난 방어적 수단에 대한 논의와 방어적 수단으로서 WIP 재고와 방어적 생산능력에 대한 설명이 있으며 III장에서는 연구방법으로 시뮬레이션 모형에 대한 논의가 있으며 IV장에서는 시뮬레이션 분석 결과에 대한 설명이 있으며 V장에서는 본 연구의 요약 및 결론을 다룬다.

## 2. 통계적 변동과 방어수단

많은 학자들은 제조과정에서의 통계적 변동이 성과에 미치는 영향을 통제하거나 감소시키기 위한 여러 방어적 수단에 대한 연구를 진행하여 왔으며 이러한 방안들 중에 가장 널리 알려진 수단이 WIP 재고의 사용이다. Buzacott[4], Hillier와 Boling [10], Muth[11], Rao[13], Gershwin과 Schick[7], Gershwin[8]들은 여러 생산 환경 하에서 WIP 재고가 산출량에 미치는 영향을 연구하였다. 구체적으로, Hillier와 Boling은 기계 고장을 고려하지 않은 연속생산라인에서 가공시간의 편차만을 통계적 변동의 요인으로 고려한 경우 WIP 재고의 역할에 대해 연구하였다. Rao와 Wijngaard[16]는 한정적인

버퍼를 갖고 있는 2단계 생산라인(two stage system)에서 통계적 변동으로 기계 고장을 고려한 경우를 연구대상으로 하였으며 특히 Wijngaard는 버퍼의 크기가 생산라인의 산출량에 미치는 영향을 대기행렬모형을 사용하여 연구하였다. 더 나아가, 연속생산라인에서 주어진 목표 생산량을 달성하기 위한 WIP 재고의 크기와 분포에 대한 연구를 수행한 Conway *et al.*[5]은 변동계수로 측정된 가공시간의 확률적 편차가 산출량에 미치는 영향은 매우 크며, 목표 산출량을 달성하기 위해 사용된 WIP 재고의 경우, 크기뿐만 아니라 분포 역시 매우 중요하다고 주장하였다.

이와 같이 버퍼의 형태로 나타난 WIP 재고의 사용은 각 공정들이 자재부족으로 인한 설비의 작동 정지를 방어할 수 있어 제조설비의 이용률을 극대화하고 결과적으로 산출량과 같은 제조과정의 생산성과를 향상시킬 수 있다는 점에서 타당성을 지닌다. 이와 더불어, WIP 재고의 사용은 제조과정의 각 단계에 있어 자재 투입의 균형을 이룩하려는 노력을 감축시키는 효과도 있다. 그러나, WIP 재고의 사용은 제조과정내에 WIP 재고가 증가되어 전체적으로 제품 리드타임을 증가시킴으로써 제품 제조비용을 증대시킬 뿐만 아니라 고객 수요에 적시에 대처할 수 있는 제조 유연성을 감소시킨다는 문제점이 있다.

위와 같이 많은 학자들이 WIP 재고의 효과성에 대한 연구는 진행하였으나 방어적 생산능력의 효과성에 대한 연구로는 Atwater와 Chakravorty[3], 김선민[1], Davis *et al.*[6]을 들 수 있다. 김선민과 Davis *et al.*은 연속생산라인 하에서 방어적 생산능력의 사용이 처리시간 관점에서 효과적임을 주장하였으며, Atwater와 Chakravorty 역시 연속생산라인에서 방어적 생산능력의 사용이 처리시간을 감축시키면서 동시에 안정적인 처리시간을 획득할 수 있는 방법임을 주장하였다.

그런데, 반도체 생산라인과 같이 반복적 재투입 특성을 지닌 생산라인에는 생산라인의 일반적인 변동인 가공시간의 변동이나 기계고장과 같은 변

동이외에 기계설비의 상충(resource contention) 현상이 존재한다. 즉, 기계설비의 상충으로 인하여 원자재가 적시에, 적절한 형태로 작업이 필요한 기계설비로 이동되지 못하기 때문에 가공에 필요한 자재가 부족한 작업장이 발생하여 작업성과를 악화시킬 수 있다. 따라서, 반복적 재투입 특성을 지닌 생산라인에서 방어적 생산능력의 사용이 연속 생산라인과 동일한 효과를 지닌다고 할 수 없다. 그러나, 가공된 원자재가 동일 공정에 반복적으로 재투입되는 반도체생산라인에서 방어적 생산능력에 대한 연구는 별로 없는 실정이다. 이러한 이유로 본 연구와 같은 방어적 생산능력의 효과성에 대한 많은 연구가 필요하다.

### 3. 연구 모형

#### 3.1 반도체 생산라인

반도체 제조과정은 반도체 웨이퍼에 여러 다른 인쇄회로를 반복적으로 부과·생성시키는 매우 복잡한 과정이다. 그러나, 제품 생산에 관련된 수많은 작업들은 본질적으로 동일하기 때문에 웨이퍼 원자재에 동일 작업이 반복적으로 수행된다. 반도체 생산에 사용된 수많은 작업은 근본적으로 다섯 가지의 중요한 단계로 구성되어 있다고 할 수 있다: (1) 침전(deposition), (2) 석판인쇄(photolithography), (3) 부식(etching), (4) 불순물 첨가(introduction of impurities), (5) 포토리지스트 제거(photo-resist strip).

- (1) **침전**: 반도체 제조과정의 첫 번째 단계로서 반도체 웨이퍼를 오염이나 굽힘으로부터 보호하고 원자재의 여러 부분들을 절연할 목적으로 웨이퍼 표면에 얇은 막(층)을 침전시킨다. 침전 작업에 이용되는 일반적인 기술로는 화학적 발산침전술(chemical vapor deposition), 열산화술(thermal oxidation), 금속화(metallization) 등이 있으며 화학적 발

산침전술에는 다결정질 실리콘(polycrystalline silicon), 실리콘 산화물(silicon dioxide), 실리콘 질화물(silicon nitride) 등의 재료가 사용된다.

- (2) **석판인쇄**: 이 작업은 photomasking이라고도 불리며 웨이퍼 표면에 산화물질의 얇은 막을 침전시킨 후에 이루어지며 웨이퍼에 전자적 이미지(회로)를 부과한다. 석판인쇄의 첫 번째 작업은 웨이퍼에 포토리지스트라 불리는 물질을 칠한 후에 회전기(spinner)를 사용하여 웨이퍼 전체에 포토리지스트가 골고루 퍼지도록 한다. 이러한 작업이 수행되면 웨이퍼는 3개 층으로 이루어지게 된다: 실리콘, 산화물, 포토리지스트. 두 번째 작업은 3개 층으로 이루어진 웨이퍼에 반도체 제조과정에서 가장 민감한 작업인 정렬/노출(align/expose) 작업이 수행된다. 즉, 전자 회로 이미지를 포함하고 있는 마스크가 웨이퍼에 정확하게 인쇄될 수 있도록 정렬한 다음 자외선(ultra-violet) 빛에 노출시켜 전자회로를 인식시키는 작업이다. 마지막으로, 노출된 포토리지스트 부분을 특수 용액으로 씻어내는 현상(develop) 작업을 수행한다. 이때, 검사 작업을 수행하여 규격에 미달하는 것은 제거하고 검사작업을 통과한 것은 비노출된 부분이 웨이퍼에 단단하게 고정될 수 있도록 굽는(bake) 작업을 수행한다.
- (3) **부식**: 전자회로를 정의하기 위하여 포토리지스트에 의해 보호되지 못한 산화물질을 씻어내기 위하여 산화 용액에 웨이퍼를 담그는 작업이다. 습식(wet) 부식과 플라시마 부식 방법이 사용되고 있다.
- (4) **불순물 첨가**: 웨이퍼의 전자적 성질을 변경하기 위하여 매우 적은 양의 불순물(dopant)을 첨가하는 작업으로 일반적으로 이온주입(ion-implantation) 기술과 확산(diffusion) 기술이 사용된다.

- (5) **포토리지스트 제거** : 마지막으로 웨이퍼에 남아 있는 포토리지스트를 부식과정과 유사한 방법으로 제거하고 품질에 이상이 없는지를 검사한다.

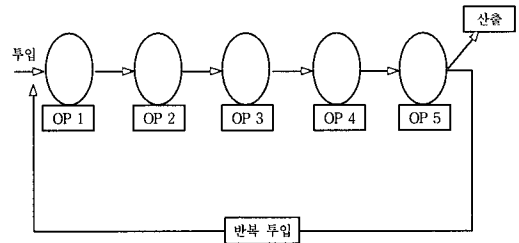
반도체 제조과정에 있어 위의 다섯 단계를 수행하게 되면 웨이퍼에 전자 회로 이미지를 포함하고 있는 단일 층이 형성되며 완제품이 되기까지 위의 다섯 단계가 반복적으로 수행된다. 물론, 웨이퍼가 생산라인에 재투입될 때마다 다섯 단계에서 수행되는 작업에 변화가 있을 수 있다. 예를 들어, 이온 주입방법과 확산 기술이 불순물 첨가 과정에서 필요에 따라 사용될 수 있으며 마스크 층으로 포토리지스트가 아닌 산화물로 이루어지는 경우도 있다. 그러나, 반도체 제조과정은 궁극적으로 위의 다섯 단계를 반복적으로 수행하면서 웨이퍼에 전자 회로 이미지를 포함한 여러 층을 생성하는 과정이라고 할 수 있다.

### 3.2 시뮬레이션 모형

시뮬레이션 분석을 위한 생산라인은 원자재가 각 공정에 동일 작업이 반복적으로 수행되는 재투입 생산라인의 특성을 지닌 반도체 생산라인을 가상적으로 설정한 것으로 <그림 1>에 나타나 있다. 즉, 전술한 바, 반도체 생산라인에서는 크게 다섯 단계의 작업이 반복적으로 이루어지고 있으므로 생산라인은 5개의 작업장으로 이루어져 있다고 가정하였다. 이 생산라인은 단일 제품을 생산하고 있으며 모든 작업장은 단지 하나의 기계를 보유하고 있다. 완제품은 원재료의 투입으로부터 완제품이 생산될 때까지 각 작업을 6번 반복적으로 수행하도록 하였다.

본 연구는 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임과 균형 생산라인의 제조 리드타임 간에 차이가 있는지를 분석하기 위하여 두 가지 생산라인을 시뮬레이션 모형으로 설정하였다. 첫 번째 모형은 전통적인 생산라인의 형태로 방어적

생산능력을 지니지 못한, 즉 균형화된 라인으로 구성된다. 생산라인의 모든 작업장들이 평균적으로 12분의 가공시간을 갖도록 하였다. 그에 반하여, 두 번째 모형은 방어적 생산능력을 지닐 수 있도록 6번째 작업장이 생산라인에 추가되어 설정되었으며 이를 위해 첫 번째 작업장부터 5번째 작업장은 각각 8, 9, 10, 10, 11분의 가공시간을 갖고 6번째 작업장은 12분의 가공시간을 갖도록 하였다. 즉, 방어적 생산능력을 지닌다는 것은 결국 총 가공시간의 합이 줄어들게 된다는 것을 의미하므로 비교 기준이 동일하도록 6번째 작업장을 추가하고 나머지 5개 작업장이 각기 다른 방어적 생산능력을 갖도록 하였다. 그러나, 두 모형 모두 생산라인의 통계적 변동이 없는 경우, 360분의 동일한 제조 리드타임을 갖는다.



<그림 1> 가상적인 재투입 생산라인

본질적으로 생산라인이 방어적 생산능력을 갖는 것이 작업장의 수를 증가시켜 이루어지는 것은 아니다. 방어적 생산능력은 기존 설비를 생산능력이 보다 우월한 새로운 설비로 대체하거나 종업원에 대한 교육을 통한 숙련도의 증가로 나타난다. 본 연구에서 작업장의 수를 증가시키고 첫 번째에서 다섯 번째 작업장의 가공시간을 단축시킨 근본적인 이유는 동일한 5개 작업장 하에서는 동일한 총 가공시간을 유지하면서 균형생산라인을 방어적 생산능력을 지닌 생산라인으로 변경할 수 없기 때문이다. 다시 말하면, 두 생산라인이 동일한 총 가공시간을 유지한 채 비교하기 위한 방안으로 하나의 작업장을 추가하여 방어적 생산라인을 설정하였다.

### 3.3 CONWIP 생산라인

생산 시스템은 일반적으로 개방적(open) 혹은 폐쇄적(closed) 네트워크 모형으로 나타낼 수 있다. Whitt[15]에 의하면 개방적 모형은 개체(원재료)가 외부로부터 일정한 비율 혹은 확률적으로 시스템에 투입되어 공정(들)에 의해 서비스(가공)를 제공받고 시스템을 떠나는 형태이다. 따라서, 생산시스템을 개방적 모형으로 나타내면, 투입량 혹은 원재료의 도착률은 독립변수가 되고, 시스템 내의 개체의 수(재공품의 수)는 종속변수가 된다고 하였다. 이와 반대로, 폐쇄적 모형은 개체가 서비스를 제공받고 다시 생산시스템에 재투입되는 형태를 취하며 이때, 시스템의 산출량(혹은 제조 리드타임)은 종속변수가 되고 재공품 재고는 독립변수가 된다고 하였다.

이러한 생산시스템의 두 가지 모형에 관한 정의에 근거하면 폐쇄적 모형이 생산라인의 구성(production design)이나 버퍼의 크기(buffer space)에 따른 재공품의 수를 제한하는 생산시스템을 연구하는데 유용한 모형이 됨을 알 수 있다. 그리고, 일반적으로 원재료가 생산시스템 외부에서 무작위로 투입되기보다는 통상 일정계획에 따라 투입되기 때문에 폐쇄적 모형이 생산시스템을 분석하는데 더 적절하다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 제조 리드타임, 재공품 재고, 그리고 방어적 생산능력간의 관계를 고찰하기 위하여 폐쇄적 모형을 채택하였다.

본 연구에서는 생산라인의 분석모델로 Spearman[14]에 의해 제시된 CONWIP(Constant Work-In-Process) 방식을 채택하였다. CONWIP 방식의 가장 중요한 가정은 한 단위의 원재료가 생산라인의 모든 작업장을 거쳐 완제품이 될 때까지 원재료의 투입이 이루어질 수 없다는 것이다. 이와 더불어, CONWIP 방식의 운영 정책은 각 작업장이 가공할 자재를 갖고 있으며 또한 각 작업장을 지원하는 기계(설비)가 운영 가능하면, 그 자재는 즉시 가공된다는 것이다. 따라서, CONWIP은 생산라인에 항상

일정 수준의 재공품 재고를 유지한다. CONWIP 방식에 관한 보다 자세한 논의는 Spearman을 참조하길 바란다.

### 3.4 모형의 가정

방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임과 균형 생산라인의 제조 리드타임간에 차이가 있는지를 조사하기 위하여 원자재는 미리 정의된 순서에 의해 투입되도록 하였으며 시뮬레이션에 필요한 상황에 따른 변수의 조작적 정의는 아래와 같다 :

- (1) 모든 작업장의 가공시간은 로그정규분포를 한다. 이는 기존의 연구[3]에서 실제적인 가공시간이 이 분포를 지닌다고 주장한 사실을 받아들인 것이다.
- (2) 가공시간의 확률적 편차에 대해 두 가지 경우를 고려하였다 : 가공시간의 편차가 적은 경우를 나타내기 위하여 모든 작업장의 평균적인 가공시간에 10%의 표준편차를 가정하였다.(변동계수(coefficient of variation : CV) = 0.10) 반면에, 가공시간의 편차가 큰 경우를 나타내기 위하여 모든 작업장의 평균적인 가공시간에 50%의 표준편차를 가정하였다.(CV = 0.50)
- (3) 각 작업장은 기계 고장으로 인한 작업 휴지가 발생할 수 있다. 기계 고장에 관련된 두 가지 확률변수로 고장간 평균시간(mean time between failure : MTBF)과 평균수리시간(mean time to repair : MTR)을 고려하였다. 고장간 평균시간은 지수분포를 한다고 가정하였으며 평균수리시간 역시 지수분포를 한다고 가정하였다. 두 변수의 값은 임의적으로 선택하여 고장시간이 10%와 30%가 되도록 하였다. 즉, 고장시간이 10%인 경우는 MTBF와 MTTR이 각각 180분, 20분이 되도록 하였으며 고장시간이 30%인 경우에는 MTBF와

MTTR이 각각 140분, 60분이 되도록 설정하였다.

- (4) 생산라인내의 총 재공품의 수는 동일 수준의 재공품 재고 하에서 그리고 재공품 수준이 증가함에 따라 두 생산라인의 제조 리드타임간의 차이가 있는지를 살펴보기 위하여 변화한다. 본 연구에서는 8가지 수준의 재공품, 즉 10 단위부터 80단위까지의 재공품 재고 하에서 시뮬레이션을 시행하였다.
- (5) 제품 한 단위당 평균가공시간의 합(60분×6회 = 360분)은 방어적 생산능력의 유무와 관계없이 서로 같으며 모든 시뮬레이션에서 동일하다.
- (6) 각 시뮬레이션 분석에서 총 시뮬레이션 시간은 28,800분으로 정하였고 이는 하루 8시간 작업한 경우 60일간의 작업 결과와 동일하다.

### 3.5 자료 수집방법 및 성과측정치

본 연구에 있어 방어적 생산능력을 지닌 모형과 균형화된 모형은 컴퓨터 프로그램에 의해 표현되며 분석에 필요한 자료는 시뮬레이션 실행결과에 의해 수집된다. 따라서, 두 가지 생산라인 모형에 대해 시뮬레이션 프로그램인 SLAM II[12]를 사용하여 모형을 프로그램화하여 결과를 수집하였다.

통계적으로 독립적인 작업성과치를 수집·분석하기 위하여 각각의 모형별로 10개의 시뮬레이션이 각기 다른 초기자료(random number seed)를 갖고 시행되도록 하였다. 또한, 각 시뮬레이션에 있어 초기 자료(transient data)의 영향을 없애고 안정적인 상태(steady state)의 자료만을 분석에 이용하기 위하여 각 시뮬레이션의 처음 20,000분의 결과는 분석에서 제외하였다. 분석에 필요한 작업성과치는 60일간, 28,800분의 작업성과치를 수집하였다. 따라서, 본 연구의 실험설계에 의해 전부 640번(2가지 모형×두 가지 수준의 가공시간 편차×두 가지 수준의 기계 고장×8 가지 수준의 재공

품재고×10회 반복 = 640)의 시뮬레이션이 이루어졌다.

### 3.6 분석 모형

시뮬레이션의 결과를 분석하기 위하여 본 연구는 생산라인의 확률적 편차의 수준을 4가지로 구분하였다. 즉 CV = 10%, DT = 10% 하에서의 시뮬레이션은 생산라인의 변동이 낮은 경우가 되며, CV = 50%, DT = 30% 하에서는 시뮬레이션은 생산라인의 변동이 높은 경우이다. 반면에, CV = 10%, DT = 30%이거나 혹은 CV = 50%, DT = 30%인 경우는 생산라인의 변동의 두 가지 주요 요인 중 어느 한 쪽이 높은 경우를 의미한다. 이러한 통계적 변동에 대한 범주 구분을 한 이유는 본 연구의 결과에 대해 생산관리자가 어떠한 생산환경 하에서 방어적 생산능력이 보다 효과적인지를 쉽게 이해할 수 있기 때문이다. 본 연구의 분석모형에서는 독립변수와 종속변수간의 통계적 관계에 대한 어떠한 가정도 요구하지 않으므로 분산 분석을 사용하였다.

이상의 설명에 따라 본 연구의 모형을 정의하면 다음과 같다 :

$$Y_{ijkm} = U + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + E_{ijkm}$$

여기서,

- $Y_{ijkm}$  = A요소의 i번째, B요소의 j번째, C요소의 k번째로 구성되는 m번째 관찰치의 제조 리드타임
- $U$  = 세 가지 요소의 공통 효과
- $A_i$  = A요소(방어적생산라인 유무)의 주요 효과
- $B_j$  = B요소(생산라인의 변동 수준)의 주요 효과
- $C_j$  = C요소(재공품 수준)의 주요 효과

$(AB)_{ij}$  = A요소의 i번째와 B요소의 j번째의 상호작용 효과

$(AC)_{ik}$  = A요소의 i 번째와 C요소의 k 번째의 상호작용 효과

$(BC)_{jk}$  = B요소의 j 번째와 C요소의 k 번째의 상호작용 효과

$(ABC)_{ijk}$  = A요소의 i 번째, B요소의 j 번째, C요소의 k 번째의 상호작용 효과

$E_{ijkm}$  = 오차항

$i=1,2 \quad j=1,2,3,4 \quad k=1,\dots,8 \quad m=1,\dots,10$

### 4. 연구 결과의 분석

종속변수로 제조 리드타임, 설명변수로 방어적 생산능력 유무, 생산라인의 확률적 편차 수준, 재공품 재고 수준, 그리고 설명변수들의 상호 영향을 사용한 ANOVA 통계 분석 결과는 <표 1>과 같다.

<표 1> 제조 리드타임에 대한 분산분석 결과

원 천	제곱합	df	평균 제곱합	F값	Sig.
(Combined)	2857552964.955	11	259777542.269	16384.904	.000
WIP수준	2490726053.598	7	355818007.657	22442.448	.000
능력유무	7676169.189	1	7676169.189	484.158	.000
변동정도	359150742.167	3	119716914.056	7550.884	.000
2원-상호작용	31467425.461	31	1015078.241	64.024	.000
WIP수준 * 능력유무	2086073.823	7	298010.546	18.796	.000
WIP수준 * 변동정도	27284970.670	21	1299284.318	81.950	.000
능력유무 * 변동정도	2096390.967	3	698793.656	44.075	.000
3원-상호작용 WIP수준 * 능력유무 * 변동정도	1807652.270	21	86078.680	5.429	.000
Model	2890828042.686	63	45886159.408	2894.170	.000
Residual	9132300.300	576	15854.688		
Total	2899960342.986	639	4538279.097		

분산분석은 두 가지 생산라인의 형태, 네 가지 변동의 정도, 8 가지 수준의 재공품에 있어 제조 리드타임간의 유의적인 차이가 있는 지를 살펴보기 위한 것이다. 분산분석의 F-값은 이러한 독립 변수와 2원-상호작용 및 3원-상호작용 모두 종속

변수(제조 리드타임)를 설명하는데 유의한 것을 의미한다. 즉, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임과 균형 생산라인의 제조 리드타임에 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인을 살펴보기 위하여 유의수준 5%에서 상호비교를 실시한다.

### 4.1 CV = 10%, DT = 10% 하에서 제조 리드타임의 차이

CV = 10%, DT = 10% 하에서의 시뮬레이션은 가공시간의 편차와 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 낮은 경우이다. 주어진 WIP 하에서 균형생산라인과 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임에 대한 pairwise t-검정의 결과가 <표 2>에 제시되어 있다.

<표 2> CV = 10%, DT = 10% 하에서 제조 리드타임 차이에 대한 검정 결과

	WIP 10	WIP 20	WIP 30	WIP 40	WIP 50	WIP 60	WIP 70	WIP 80
방어적	826.9	1563.0	2339.0	3110.0	3894.0	4639.0	5459.0	6241.0
균형	868.3	1643.0	2415.0	3208.0	3979.0	4746.0	5527.0	6314.0
t-값	-8.657	-8.944	-6.517	-8.501	-7.408	-5.879	-2.841	-2.599
p-값	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*	.0194**	.029**

\* 유의수준 1%에서 유의적 차이를 보임

\*\* 유의수준 5%에서 유의적 차이를 보임

<표 2>에서 보는 바와 같이, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임이 방어적 생산능력을 지니지 못한, 즉 균형 생산라인의 제조 리드타임에 비하여 모든 재공품 재고 수준 하에서 적게 나타났으며 또한 그 차이도 통계적으로 유의하다. 이러한 결과는 가공시간의 변동과 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 낮은 경우에 있어, 방어적 생산능력의 사용이 제조 리드타임을 감소시킨다는 점에서 효과적임을 알 수 있다.

그런데 생산관리자에게 있어 제조과정의 제조 리드타임과 더불어 중요한 관심사는 생산량이다. 만일 재공품 재고 수준의 감축이 생산량의 감소로

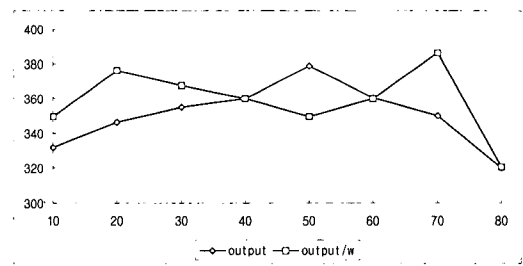


이어진다면, 방어적 생산능력의 사용에 대한 효과성은 생산량 감소에 따른 비용과 제조 리드타임의 감축에 의한 혜택간의 상충관계를 다시 고려하여 결정되어야 할 것이다. 그러나, 분명한 것은 방어적 생산능력의 사용이 이상적인 상황은 재공품 재고 수준의 감축이 제조 리드타임의 감소와 더불어 생산량의 증가 혹은 현상 유지로 나타나는 경우이다.

<그림 2>는 두 생산라인의 생산량을 각 재고 수준 하에서 나타낸 것이다. 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량은 'output/w'로 표시되며 균형생산라인의 생산량은 'output'으로 표시되어 있다. <그림 2>는 재공품 재고 수준이 상대적으로 낮은 경우(10, 20, 30 단위)와 상대적으로 높은 경우(70 단위)에 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량이 균형 생산라인의 생산량보다 높음을 알 수 있다. 또한 재공품 재고 수준이 40, 50, 60, 80 단위인 경우에는 균형생산라인의 생산량이 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량과 비교하여 무차별하거나 높음을 알 수 있다. 이러한 결과는 반도체 생산라인의 특성인 재투입 생산라인의 성격상 생산라인에 재공품 재고 수준이 증가하게 되면 제조과정의 복잡성이 증가하여 방어적 생산능력의 사용이 생산량 측면에서 그다지 효과적이지 못할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 재공품 재고의 과도한 투입은 본 연구에서 가정된 FIFO 작업배치(dispatching rule)기법 이외의 다른 작업 배치기법이 필요하다는 것을 의미하기도 한다.

그러나, 중요한 점은 방어적 생산능력을 사용함으로써 낮은 재공품 재고 수준 하에서도 제조 리드타임을 의미 있는 수준으로 감소시키면서 동시에 산출량도 증가시킬 수 있다는 것이다. 예를 들어, 약 380 단위의 생산량을 목표로 한 경우, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인은 20단위 재공품 재고 수준에서 이를 달성할 수 있으나, 균형 생산라인은 50단위의 재공품 재고 수준에서 이를 달성할 수 있다. 결과적으로, 균형생산라인으로 380 단위의 목표 생산량을 달성하는데 드는 비용이 재공품 재고의 비용뿐만 아니라 제조리드타임 측면(3,970

분)에서 너무 높다. 따라서, 방어적 생산능력을 사용하면 제조리드타임을 3,970분에서 1,560분으로 단축시킬 수 있으며 동시에 재공품 재고 수준을 낮게 유지하여 재고 비용을 감축할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 결과적으로, 시뮬레이션 분석 결과는 생산량을 유지하면서 제조 리드타임을 단축할 수 있는 방법으로 방어적 생산능력의 사용이 효과적임을 보여주고 있다.



<그림 2> 재공품 재고 수준과 생산량의 관계 (CV = 10%, DT = 10%)

#### 4.2 CV = 50%, DT = 10% 하에서 제조 리드타임의 차이

CV = 50%, DT = 10% 하에서의 시뮬레이션은 가공시간의 변동이 높고 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 낮은 경우이다. 주어진 WIP 하에서 균형생산라인과 방어적 생산능력을 지닌 두 생산라인의 제조 리드타임에 대한 pairwise t-검정의 결과가 <표 3>에 제시되어 있다.

<표 3> CV = 50%, DT = 10% 하에서 제조 리드타임 차이에 대한 검정 결과

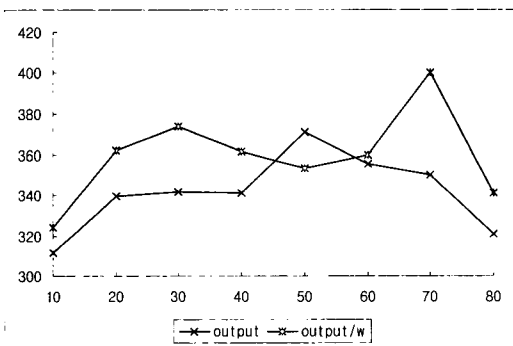
	WIP 10	WIP 20	WIP 30	WIP 40	WIP 50	WIP 60	WIP 70	WIP 80
방어적	891.9	1585.0	2324.0	3114.0	3884.0	4629.0	5407.0	6209.0
균형	949.6	1708.0	2494.0	3257.0	4016.0	4783.0	5548.0	6389.0
t-값	-7.403	-18.427	-11.955	-6.958	-5.504	-4.416	-5.164	-4.893
p-값	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*	.002*	.001*	.001*

\* 유의수준 1%에서 유의적 차이를 보임

<표 3>에서 보는 바와 같이, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임이 방어적 생산능

력을 지니지 못한, 즉 균형 생산라인의 제조 리드타임에 비하여 모든 재공품 재고 수준 하에서 적게 나타났으며 또한 그 차이도 통계적으로 유의하다. 이러한 결과는 가공시간의 변동이 높고 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 낮은 경우에 있어, 방어적 생산능력의 사용이 제조 리드타임을 감소시킨다는 점에서 효과적임을 알 수 있다.

두 생산라인의 생산량을 각 재고 수준 하에서 나타낸 것이 <그림 3>이다. 재공품 재고 수준이 상대적으로 낮은 경우(10, 20, 30, 40 단위)와 상대적으로 높은 경우(60, 70, 80)에 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량이 균형 생산라인의 생산량보다 높음을 알 수 있다. 또한 재공품 재고 수준이 50 단위인 경우에는 균형생산라인의 생산량이 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량과 비교하여 높음을 알 수 있다. 그러나, 이미 설명한 바와 같이 균형생산라인이 재공품 재고 수준 50 단위에서 획득할 수 있는 생산량을 방어적 생산능력을 지닌 생산라인은 재공품 재고 수준 30 단위에서 획득할 수 있으므로, 낮은 수준의 재공품 재고 하에서 동일한 생산량을 유지하면서 제조 리드타임이 감축되는 효과를 얻을 수 있다.



<그림 3> 재공품 재고 수준과 생산량의 관계 (CV = 50%, DT = 10%)

### 4.3 CV = 10%, DT = 30% 하에서 제조 리드타임의 차이

CV = 10%, DT = 30% 하에서의 시뮬레이션은

가공시간의 변동이 낮고 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 큰 경우이다. 주어진 WIP 하에서 균형생산라인과 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임에 대한 pairwise t-검정의 결과가 <표 4>에 제시되어 있다.

<표 4> CV = 10%, DT = 30% 하에서 제조 리드타임 차이에 대한 검정 결과

	WIP 10	WIP 20	WIP 30	WIP 40	WIP 50	WIP 60	WIP 70	WIP 80
방어적	1690.0	2651.0	3451.0	4464.0	5281.0	6169.0	7193.0	8114.0
균형	1683.0	2691.0	3712.0	4712.0	5647.0	6737.0	7757.0	8673.0
t-값	0.239	-1.091	-5.478	-5.251	-4.741	-7.144	-5.145	-6.602
p-값	.816	.304	.000*	.001*	.001*	.000*	.001*	.000*

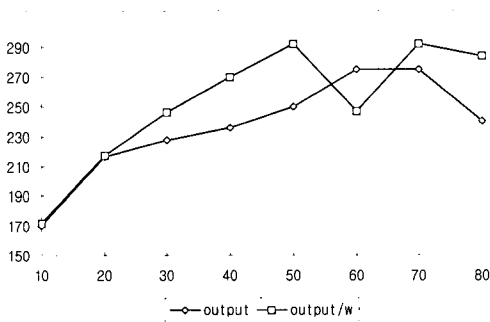
\* 유의수준 1%에서 유의적 차이를 보임

\*\* 유의수준 5%에서 유의적 차이를 보임

<표 4>에서 보는 바와 같이, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임이 방어적 생산능력을 지니지 못한, 즉 균형 생산라인의 제조 리드타임에 비하여 재공품 재고 수준이 30단위 이상에서 통계적으로 유의적인 차이가 나타났다. 이러한 결과는 가공시간의 변동이 낮고 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 큰 경우에 있어, 방어적 생산능력의 사용이 제조 리드타임을 특정 재고 수준 하에서만 감소시킨다는 점에서 효과적임을 알 수 있다. 특히, 낮은 수준의 재공품 재고(10, 20 단위)에서는 두 생산라인의 제조 리드타임의 차이가 미비한 것으로 나타났기 때문에 방어적 생산능력의 사용은 제조 리드타임이 의미 있는 수준으로 감축시키지 못하므로 자제되어야 할 것이다. 즉, 낮은 수준의 재공품 재고 하에서 방어적 생산능력의 사용은 제조 리드타임의 감소 측면에서 효과적이지 못하고 방어적 생산능력을 지니도록 생산라인을 변경하는 비용만 추가되므로 재공품 재고를 방어적 목적으로 사용하는 것이 유리하다. 그러나 일정 수준 이상의 재공품 재고에서는 방어적 생산능력의 사용이 제조리드타임을 감소시킨다는 면에서 재공품 재고보다 유리하다.

두 생산라인의 생산량을 각 재고 수준 하에서

나타낸 것이 <그림 4>이다. 재공품 재고 수준이 상대적으로 낮은 경우(10, 20 단위)에는 두 생산라인의 생산량에 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 일정 재공품 재고 수준을 지난 후 즉, 30, 40, 50 단위의 재공품 재고 수준과 상대적으로 높은 경우(70, 80 단위)에 있어, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량이 균형 생산라인의 생산량보다 높음을 알 수 있다. 또한 재공품 재고 수준이 60 단위인 경우에는 균형생산라인의 생산량이 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량과 비교하여 높음을 알 수 있다. 그러나, 이미 설명한 바와 같이 균형생산라인이 재공품 재고 수준 60 단위에서 획득할 수 있는 생산량을 방어적 생산능력을 지닌 생산라인은 재공품 재고 수준 40 단위에서 획득할 수 있으므로, 낮은 수준의 재공품 재고 하에서 동일한 생산량을 유지하면서 제조 리드타임이 감축되는 효과를 얻을 수 있다.



<그림 4> 재공품 재고 수준과 생산량의 관계 (CV = 10%, DT = 30%)

4.4 CV = 50%, DT = 30% 하에서 제조 리드타임의 차이

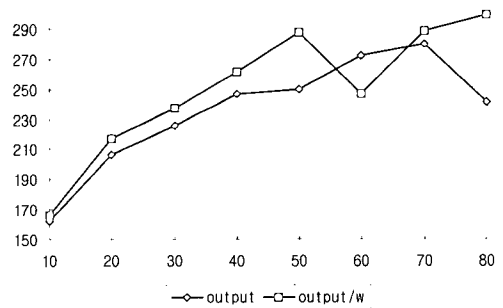
CV = 50%, DT = 30% 하에서의 시뮬레이션은 가공시간의 변동과 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 큰 경우이다. 주어진 WIP 하에서 균형생산라인과 방어적 생산능력을 지닌 두 생산라인의 제조 리드타임에 대한 pairwise t-검정의 결과가 <표 5>에 제시되어 있다.

<표 5> CV = 50%, DT = 30% 하에서 제조 리드타임 차이에 대한 검정 결과

	WIP 10	WIP 20	WIP 30	WIP 40	WIP 50	WIP 60	WIP 70	WIP 80
방어적	1756.0	2658.0	3638.0	4407.0	5380.0	6257.0	7097.0	8080.0
균형	1771.0	2788.0	3753.0	4759.0	5745.0	6706.0	7754.0	8699.0
t-값	-5.89	-2.365	-2.286	-7.267	-5.036	-4.947	-5.581	-5.070
p-값	.571	.042**	.048**	.000*	.001*	.001*	.000*	.001*

\* 유의수준 1%에서 유의적 차이를 보임  
 \*\* 유의수준 5%에서 유의적 차이를 보임

<표 5>에서 보는 바와 같이, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임이 방어적 생산능력을 지니지 못한, 즉 균형 생산라인의 제조 리드타임에 비하여 재공품 재고 수준이 20단위 이상에서 적게 나타났으며 또한 그 차이도 통계적으로 유의하다. 이러한 결과는 가공시간의 변동과 기계설비의 고장에 의한 생산라인의 변동이 큰 경우에 있어, 방어적 생산능력의 사용이 제조 리드타임을 특정 재고수준 하에서만 감소시킨다는 점에서 효과적임을 알 수 있다. 특히, 낮은 수준의 재공품 재고(10 단위)에서는 두 생산라인의 제조 리드타임의 차이가 미미한 것으로 나타났기 때문에 방어적 생산능력의 사용은 자제되어야 한다.



<그림 5> 재공품 재고 수준과 생산량의 관계 (CV = 50%, DT = 30%)

두 생산라인의 생산량을 각 재고 수준 하에서 나타낸 것이 <그림 5>이다. 재공품 재고 수준이 상대적으로 낮은 경우(10 단위)에는 두 생산라인의 생산량에 차이가 없다. 그러나, 일정 재공품 재

고 수준을 지난 후 즉, 20, 30, 40, 50 단위의 재공품 재고 수준과 상대적으로 높은 경우(70, 80 단위)에 있어, 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량이 균형 생산라인의 생산량보다 높음을 알 수 있다. 또한 재공품 재고 수준이 60 단위인 경우에는 균형생산라인의 생산량이 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 생산량과 비교하여 높음을 알 수 있다. 그러나, 이미 설명한 바와 같이 균형생산라인이 재공품 재고 수준 60 단위에서 획득할 수 있는 생산량을 방어적 생산능력을 지닌 생산라인은 재공품 재고 수준 40 단위에서 획득할 수 있으므로, 낮은 수준의 재공품 재고 하에서 동일한 생산량을 유지하면서 제조 리드타임이 감축되는 효과를 얻을 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구의 목적은 재투입 생산라인 하에서 생산 능력과 재공품 재고간의 관계를 고찰함으로써 방어적 생산능력의 효과성을 제시하는데 있다. 이를 위해, 본 연구는 제조과정의 통계적 변동요인으로 가공시간의 편차와 설비의 고장이 존재한다는 가정 하에 주어진 재공품 재고 하에서 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 제조 리드타임과 방어적 생산능력을 지니지 못한 즉, 균형 라인의 제조 리드타임의 차이를 조사하였다. 기존 연구는 방어적 목적의 WIP 재고 수준이 생산라인의 작업성능에 미치는 영향만을 분석하였으나 본 연구는 일반적인 생산라인과는 상이한 특성을 지닌 반도체생산라인과 같은 재투입 생산라인에 있어 방어적 생산능력이 제조 리드타임에 미치는 영향을 조사하고 주어진 WIP 재고 수준에서 제조 리드타임의 감축을 위해 방어적 생산능력을 어떻게 활용하여야 하는지를 제시하였다. 이러한 관계를 조사·분석하기 위하여 시뮬레이션을 사용하였으며 수집된 자료에 대하여 분산분석을 실시하였다.

시뮬레이션 분석 결과는 다음과 같은 중요한 결

과를 제시하고 있다. 첫째, 제조 리드타임을 감축하기 위한 방어적 생산능력을 지닌 생산라인의 사용이 효과적이다. 그러나, 가공시간의 편차보다는 기계 설비의 편차가 큰 제조 환경에서 낮은 수준의 재공품 재고 하에서 두 생산라인의 제조 리드타임의 차이가 미비하므로 방어적 생산능력의 사용은 자제되어야 한다. 그 이유는 생산라인의 배치 변경보다는 단순히 재공품 재고 투입이 간단하기 때문이다. 둘째, 제조리드타임, 생산량, 재공품 재고의 관계에서 볼 때, 목표 생산량을 획득한다는 측면에서 방어적 생산능력의 사용은 재고 수준을 낮게 유지하면서 동시에 제조 리드타임을 감축시킬 수 있는 방법이 된다. 특히, 방어적 생산능력의 사용은 WIP 재고 감축의 부정적인 영향인 생산량 성과의 감소에 대한 우려를 불식시킬 수 있다는 점에서 효과적이다.

이러한 논의에도 불구하고 본 연구는 방어적 생산능력을 생산라인에 부가하는 것이 항상 경제적이거나 실무적으로 쉽게 이루어질 수 없다는 것을 인정한다. 이러한 이유로는 생산현장에서 작업자의 성과가 생산설비의 이용률에 의해 평가되기 때문에 작업자들이 자제 부족으로 인한 설비 이용률 감소로 이어질 수 있는 재공품 재고 감축에 비협조적인 것을 들 수 있다. 그리고, 방어적 생산능력을 지니도록 생산라인을 재배치하는 비용도 만만치 않은 실정이다. 더 나아가, 최고 경영진이 설비 이용률의 극대화에 치중하는 경영방식 때문에 방어적 생산능력 사용이 주목을 끌지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 생산관리자는 항상 재고 감축에 의한 혜택에 비해 방어적 생산능력 사용에 대한 비용이 얼마나 되는지를 측정할 필요가 있음을 강조한다. 또한 방어적 생산능력에 대한 비용을 측정할 때, 목표한 생산량을 획득하면서 동시에 제조 리드타임을 감소시킬 수 있는 방어적 생산능력의 사용이 제품의 신속한 시장 유입을 위한 제조 리드타임을 단축시킬 수 있으므로 격변하는 기업 환경 하에서 강력한 경쟁무기가 될 수 있다는

점을 고려할 필요가 있음을 강조한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김선민, "연속생산라인에 있어 방어적 생산능력의 효과성에 관한 연구", 『생산성논집』, 제10권, 제1호, (1995), pp.69-89.
- [2] APICS, *APICS Dictionary*, American Production and Inventory Control Society, Inc., 7th edition, Falls Church, VA, 1992.
- [3] Atwater, J. B. and S. S. Chakravorty, "Does protective capacity assist managers in competing along time-based dimensions?," *Production & Inventory Management Journal*, Vol.35, No.3, (1994), pp.53-59.
- [4] Buzacott, J. A., "Automatic Transfer Line with Buffer Stocks," *International Journal of Production Research*, Vol.5, No.1, (1967), pp.183-200.
- [5] Conway, R., W. Maxwell, J. O. McClain, and L. J. Thomas, "The Role of Work-In-Process Inventory in Serial Production Lines," *Operations Research*, Vol.36, No.2, (1987), pp.229-241.
- [6] Davis, K. R, C. Knight, S. Kim, C. F. Turner, 1997, "The Influence of Protective Capacity on the Performance of a Flow Line : A Simulation Analysis," The Proceedings of 28th National Conference of the Decision Science Institute, Hawaii, (1997), U.S.A.
- [7] Gershwin, S. B. and I. C. Schick, "Modeling and Analysis of Tree-Stage Transfer Lines with Unreliable Machine and Finite Buffer," *Operations Research*, Vol.31, No.2, (1983), pp.354-380.
- [8] Gershwin, S. B., "An Efficient Decomposition Method for the Approximate Evaluation of Tandem Queues with Finite Storage Space and Blocking," *Operations Research*, Vol.35, No.2, (1987), pp.291-305.
- [9] Hall, R. W., *Attaining Manufacturing Excellence*, DowJones-Irwin, Homewood, Ill., 1987.
- [10] Hillier, F. S., and R. W. Boling, "The Effect of Some Design Factors on the Efficiency of Production Lines with Variable Operation Times," *Journal of Industrial Engineering*, Vol.17, No.12, (1966), pp.651-658.
- [11] Muth, E. J., "The Production Rate of a Series of Work Stations with Variable Service Times," *International Journal of Production Research*, Vol.11, No.1, (1973), pp.155-169.
- [12] Pritsker, A. A. B, *Introduction to Simulation and SLAM II*, Halsted Press. 1986.
- [13] Rao, N. P., 1975, "Two stage Production Systems with Intermediate Storage," *AIIE Transactions*, Vol.7, No.4, (1975), pp.699-702.
- [14] Spearman, M. L., D. L. Woodruff and W. J. Hopp, "CONWIP : A Pull Alternative to Kanban," *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.5, (1990), pp. 879-894.
- [15] Whitt, W., "Open and Closed Model for Networks of Queues," *AT&T Bell Laboratories Technical Journal*, Vol.63, No.9, (1984), pp.1911-1979.
- [16] Wijngaard, J., 1979, "The Effect of Inter-Stage Buffer Storage on the Output of Two Unreliable Production Units in Series with Different Production rates," *AIIE Transactions*, Vol.11, No.1, (1979), pp.42-47.