

# TOC의 DBR의 최적버퍼 설정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션의 활용

Application of Computer Simulation for an optimum buffer set on TOC's DBR

심병태, 문제창, 임석철

abstract

TOC(Theory of Constraints)의 DBR(Drum Buffer Rope)은 생산시스템에 숨겨져 있는 많은 문제점들을 해결할 수 있는 효과적인 방법으로 인정되고 있으나 실제 생산과정에 이론을 접목한 사례가 많지 않고, 각 기업체의 상황에 응용하여 적용할 방법을 잘 모르거나 제약공정만을 관리할 때 발생할 수 있는 위험성 때문에 사용하지 못하는 경우가 많다. 본 논문에서는 연속생산이 이루어지는 반도체 Wafer 생산라인에서 기존의 생산방법과 TOC의 DBR을 적용한 생산방법을 정의하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 비교하여 제약공정의 buffer size를 비용과점에서 결정하는 과정을 보여준다.

## 1. 서론

국내 TOC의 경우 도입시기가 짧기도 하지만 연구에 비해 기업체 적용은 미진한 편이다. TOC의 Drum-Buffer-Rope, Thinking-Process, Throughput-Accounting, Critical Chain, 등은 각기 유기적으로 연결되어 있으면서도 별개의 강력한 도구로 각각 활용되어 제조업 및 서비스업 등에서 기존의 방법으로 해결하지 못하는 문제점들에 대해 효과적으로 대처하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 정작 그 중심에 있는 TA의 경우 국내 회계 현실에 맞지 않아 정착하는데 어려움이 많고 DBR은 기존의 생산기법들과 상반되는 점이 있는데다 잘 정착되어 온 많은 생산기법들을 수정한다는 점이 걸림돌로 작용되어 적용하는 사례가 드물며 TP의 경우 언어의 표현적 차이로 전문가가 암묵하지 않은 상황에서 활용하기엔 어려운 점이 많으며 Critical Chain는 외국에 비해 사례가 없는 상황이다. 결론적으로 서두에서 언급한 바와 같이 국내의 경우 현실적으로 TOC는 연구에 비해 사례적용은 많지 않다고 볼 수 있다. 게다가 시스템적으로 접근하여 TOC의 효과를 확인하기 위한 TOC Package 시장의 경우 모 솔루션이 조선업에서 테스트가 이루어져 DBR를 이용한 스케줄의 작성이 대단한 효과를 가져온다는 사실을 확인한 바 있으나 기존의 대표적 솔루션인 ERP에 대한 회의적인 시각과 수많은 솔루션들이 국내 보급된 상태에서 어떤 것을 선택할지, 새로운 투자를 하는 것이 타당한지에 대한 결정을 내리기가 어렵고 TOC 관련 Package의 경우도 고가(최근에는 저가형 Package도 개발되고 있다)인 관계로 TOC에 대해 확실한 검증이 되기전에는 선택하기가 쉽지 않다. 현재의 상황만 볼 때 TOC의 미래는 낙관적이라고 보기는 어렵지만 꾸준한 연구와 많은 기업인들에게 교육을 제공하는 것만이 TOC의 관심을 넓힐 수 있을 것이고 또 실제 적용 사례들을 많이 보여줌으로써 관심을 증대시킬 수 있을 것으로 판단한다.

TOC 분야에서 제조업에 가장 많은 영향을 미칠 수 있는 분야는 DBR이라 할 수 있다.

그러나 이미 언급한 바와 같이 기존 생산기법들과 상반되는 면이 있고 성공 가능한가 하는 의문으로 인해 도입을 꺼린다는데 문제점이 있다. 외국기업의 경우 성공한 사례가 많이 있다고는 하지만 관심을 가지고 있는 국내기업은 소수에 지나지 않으며 TOC에 관심을 가지고 있는 많은 사람들이 자신의 기업에 DBR을 도입시킬 수 있을 만큼 충분한 준비가 되어 있지 않은 것으로 보인다. 게다가 회의적인 시각으로 바라보는 사람들도 적지 않다. 기업에서 참고할 수 있는 서적도 부족한 편이고 그 속에 포함되어 있는 연구내용들은 기업인들이 받아들여서 사용하기엔 기존의 생산기법들과 비교되는 철학적 면이 많고 쉽게 접근할 수 있는 사례는 매우 드물며 성과위주의 보고서이거나 아주 간단한 사례인 경우가 대부분이다. 따라서 국내에서 적용한 사례를 많이 제시하여야 할 것으로 보인다.

최근의 국내 TOC의 DBR 연구는 제조업의 관리에서 있어 철학적 연구와 기존의 생산기법들과 적절히 조화시켜 활용하는 방안에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있다. 고시근의(2002)에서는 KANBAN 시스템을 DBR에 적용시켜 DBR 사용의 효과를 증대시키고자 하였고 DBR 시스템 개발을 위한 최정길의(2001)는 DBR 관련 Process에 중심을 두고 방법론을 제시하였으며 고시근의(2001)는 최적 Buffer 설정에 관해 대기행렬 이론을 응용한 방법을 보여주었다. 그러나 적용사례에 관련한 보고를 찾기 힘들다는 점이 아쉽다. 외국의 경우도 적용사례에 대해서는 결과제시에 치중해 있고 적용과정에 대해서는 찾아보기 힘들다.

본문에서 제시하는 내용은 사례를 통해 DBR의 적용과정에 대해 설명하고 사례의 업체가 적용했던 방법과 비교하여 결론을 살펴보고자 한다. 더불어 Buffer 최적 Buffer 설정에 관해서도 서술할 것이다. Buffer 설정은 Goldratt 박사도 쉽게 단정짓지 못한 부분으로 적용사례에 따라 조금씩 다르게 나타날 수 있다고 생각된다. 또한 전체 공정에서 제약공정만 관리할 때 나타나는 변동적 요소가 많기 때문에 수리적 모형을 만들어 내는 것도 어렵다고 판단된다. 본문에서는 이러한 점을 감안하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 비교 분석한다.

## 2. DBR과 컴퓨터 시뮬레이션

### 2.1 일반 DBR 모형과 컴퓨터 시뮬레이션

TOC의 DBR에서 CCR을 발견해 나가는 방법은 평균치 등을 이용한 고정된 생산시간과 고장과 같은 공급상황이 전혀 발생하지 않는다는 가정 하에서 계산이 이루어진다. 실제 생산 과정에서는 생산시간이 일정한 편차 내에서 변동하고 불규칙한 고장이나 공급상황이 발생하므로 CCR의 Buffer가 존재하는 것이다. 그러나 실제 Buffer가 어떤식으로 변동할 것인지에 대해서는 적용해봐야만 알 수 있다. 한다. 또한 TOC의 5단계 집중개선 Process에서 한 Cycle 이후 발생하는 문제에 대처하기 위해서나 그 후의 CCR을 개선하기 위해서도 적용해봐야만 한다. 이럴 때 사전에 발생할 수 있는 상황에 대해 일부분 만이라도 확인할 수 있다면 DBR 사용가치가 커질 것이다. 이런 점에서 컴퓨터 시뮬레이션은 대단히 유용한 도구이다. 또한 CCR의 발견과정에 있어서도 기존의 계산을 통한 것과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 발견되는 것을 비교하면서 접근하는 것도 좋은 방법일 것이다.

컴퓨터 시뮬레이션은 DBR의 CCR 관리라는 부분에 국한된 점을 활용하여 DBR의 효과를 검증하는데 효과적인 보조도구로 활용할 수 있다. 본 논문에서는 이런 점을 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 사례에서 설명할 기존방법과 DBR을 적용한 생산방법의 결과를 비교할 것이다.

### 2.2 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 Buffer Size의 결정

Buffer Size 결정은 DBR 내용에서 모호한 부분이다. Goldratt은 이 부분에 대해서는 명쾌한 답을 제시하고 있지는 못하지만 고시근의(2001)의 논문에 언급된 내용을 인용하면 Lead Time을 기준으로 결정할 수도 있고, CCR의 처리시간 기준으로 설정할 수도 있고, 아예 구할 필요가 없다는 의견도 있다고 한다. Buffer Size를 결정하는 방법은 기업의 관리자 경험에 의존해 결정하거나 실제상황에 적용하면서 결정하게 된다.(서론에서 언급한 바와 같이 가정에 적합한 사례에 대해서는 수리적 모형을 적용할 수도 있다.) 그러나 이러한 부분은 DBR을 사용하는데 있어 하나의 문제점으로 지적된다. Buffer Size를 너무 작게 할 경우 결품이 발생할 것이고 너무 크게 할 경우 오히려 재고가 누적되고 Buffer Monitoring에 둔감해져서 재고비용이 오히려 문제로 작용할 수도 있는 것이다. 따라서 어떠한 조건에서도 대응이 가능한 최적의 Buffer Size를 결정해야 하는데 어떤 방법을 통해 결정이 되었는지 실제 생산라인에 적용할 때는 이론적으로 감안하지 못한 문제들이 발생하기 마련이므로 Buffer Size 수정의 과정을 줄이기 위해서 초기 Buffer Size 결정을 잘 해야만 한다. 이럴 때 컴퓨터 시뮬레이션은 유용한 결과를 제시해줄 수 있다.

### 3. CCR의 일반적 특징

DBR은 수주생산을 주 대상으로 원자재 투입시점을 조절하여 재고를 줄이고 불필요한 중간품 생산을 막아서 주문의 납기를 원활히 할 수 있는 방법이다. 그러나 가전제품과 같은 산업들은 수주에 의한 것이 아니라 계획생산을 통해 완제품 재고를 보유하고 영업을 통해 판매하는 형태를 가지고 있다. 시장의 규모에 따라 달라질 수는 있지만 제품에 따라서 수요에 비해 공급이 부족할 수도 있고 수요가 많지는 않아도 꾸준히 판매가 되는 상품도 있어서 일정수준의 계획생산은 필요한 산업들이 많다. 특히 단납기를 요구하는 제품들은 창고를 통해 재고를 보유하고 대처하는데 관점에 따라 차이는 있을 수 있으나 DBR에서 출하 Buffer를 확대 해석하면 동일한 내용이 될 것이다.

사례에서 다루고자 하는 Wafer 생산라인은 B2B 거래로 수주생산을 하지만 꾸준히 유지되는 수요가 있고 전체 Lead Time이 길어서 납기준수를 위해 실제 공정에서는 계획생산의 개념을 내포하고 있다. 또한 단위 주문량이 크고 제품종류가 다양하기 때문에 주문별 처리는 어려우므로 사전에 납기일 기준에 의한 일생산량을 정하고 다종의 주문을 복합적으로 생산하면서 부분 납품을 해야한다. 그러나 투입시점을 기준으로 납기까지의 기간을 고려한다면 매우 어려운 점이라는 것을 이해할 수 있다. 그러나 이러한 공정에도 전체 Lead Time을 결정짓는 CCR이 존재하는 것은 틀림없다. 이에따라 CCR에 영향을 주는 ROPE도 결정할 수 있을 것이다. 따라서 우리의 목적인 재고감축과 Lead Time 단축에 관한 방법을 찾아낼 수 있을 것이다.

DBR의 일반적 절차와 동일하게 CCR을 찾아내면 CCR의 특징을 살펴볼 필요가 있다. DBR을 소개를 위해 사용되는 예제에서는 대부분의 CCR이 동일한 작업을 하고 Capacity에서 차이가 나는 설정으로 이루어져 있다. 이때 Capacity는 Cycle Time이나 CCR을 지나가는 부품의 일괄처리량 등을 의미한다. 사례에서 제시되는 Wafer 생산라인에서는 CCR을 최대 활용하기 위한 결정변수로 CCR에 투입되는 부품의 선택문제로 직면한다. DBR에서 CCR을 최대 활용하기 위해 투입우선순위 설정에 사용되는 Throughput의 개념을 적용한 것이다. 어떤면에서는 상식적인 부분으로 치부될 수 있으나 CCR을 찾아내서 최대 활용한다는 개념을 적용하기 전에는 생각하지 못할 경우가 많다. 이와같이 산업종류에 따라서 CCR을 찾아내고 최대 활용하기 위한 방법은 조금씩 다른 형태로 나타날 수 있다. 기업에

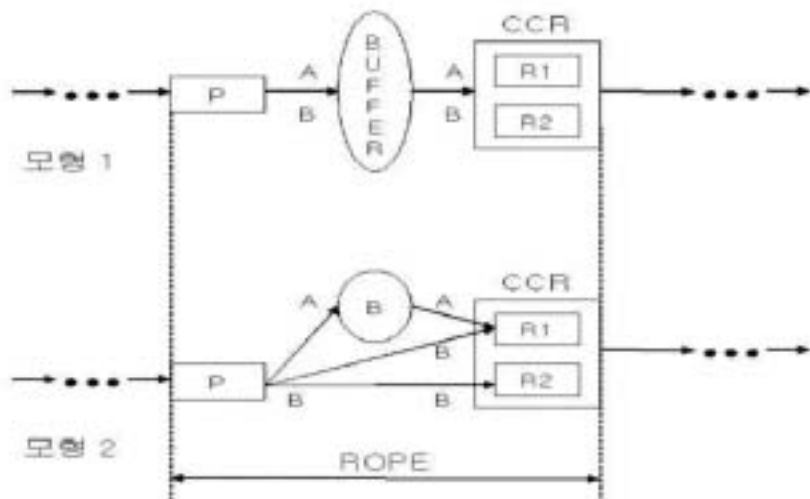
서 적극적으로 DBR을 활용하기 위해서는 각기 다른 업종의 사례를 통해 응용력을 키워야 한다.

#### 4. Buffer 설정을 위한 사례의 DBR 모형

Buffer의 재고는 CCR에 투입되는 부품의 종류에 따라 여러가지가 될 수 있다. 각각의 부품들은 각기 동일한 공정이나 다른 공정을 거치면서 CCR로 모여들게 될 것이고 Buffer를 포함한 ROPE의 크기(시간)에 의해 투입시점을 결정하게 된다. 그리고 이러한 Buffer는 CCR의 앞 공정에서 문제가 발생하였을 때 완충재 역할을 한다. 그리고 CCR은 자체적으로 최대 생산성을 내기 위해 가동이 된다. 여기까지는 DBR의 일반적인 내용을 언급하고 있다. 문제로 제기하고자 하는 것은 CCR이 원활히 생산만 하면 되는 상황이 아니라 Buffer 내의 어떤 재고를 생산하느냐에 따라 생산성이 달라지는 경우이다. 흔하지 상황일 수 있으나 최종제품은 다르더라도 초기 공정의 많은 부분이 동일한 작업을 진행하고 CCR이 이 공정속에 포함되어 있을 경우 발생할 수 있는 상황이다.

이해를 돕기 위해 다음과 같은 상황을 살펴본다. 주문량에 상관없이 24시간 연속생산이 이루어지고 있고 Lead Time을 줄여 생산성 향상을 목적으로 하는 생산라인이 있다. 이때 이 회사는 기존의 생산방식에 혁신을 꾀하기 위해 DBR을 적용하기로 하고 CCR을 찾아본 결과 어떤 공정을 찾아내게 되었다.

CCR은 3대의 설비로 이루어져 있는데 R1 설비가 1대 R2 설비가 3대라고 한다. 그리고 A, B 두개의 부품을 가공할 수가 있는데 원칙적으로 A, B 부품은 모두 같은 최종제품으로 만들어지며 R1 설비는 A, B 모두를 수용할 수 있으나 R2는 B 부품만 수용할 수가 있고 R1 R2의 Cycle Time은 동일하다. A, B 제품은 같은 원자재에서 만들어지며 CCR 공정 앞에 있는 공정인 P 공정에서 A, B로 나뉘어진다. A는 B의 1~1.5배의 가치가 있어서 기업의 이익을 향상시키기 위해서는 A를 우선 생산하는 것이 바람직하므로 A제품을 우선적으로 고려해야 한다고 판단할 수 있다.



[그림 1] DBR의 Buffer 설정의 모형

따라서 Throughput을 높이기 위해 부품 A를 최대 생산하는 상황은 언제나 설비 R1이 부품 A만 작업하게 만드는 것이라는 것을 쉽게 알 수 있고 부품 A만을 관리하여 모델2와

같은 형태가 되어야 한다고 생각할 수 있다. Buffer의 재고를 고려하여 Buffer에 변동이 없을 때는 P 공정에서 B만 생산하면 된다. 더불어 B가 R1에 투입되는 경우는 Buffer 설정을 잘못하여 A가 부족한 상황인 것도 알 수 있다. 그러나 모형 1의 함정은 ROPE에서 투입시점을 결정하기가 어렵게 만드는 문제가 생긴다. A를 위한 Buffer와 Rope만 존재하므로 R2의 이용율이 떨어질 것이고 그렇다고 B를 별도의 Buffer로 관리하면 제약공정이 이원화되어 관리가 더욱 곤란해지는 것이다. 따라서 동일작업을 묶어서 처리하는 DBR의 일반적 사항을 고려하여 R1, R2를 묶어서 관리하는 것이 바람직하다. 따라서 모형 1의 형태를 따라야 한다. 모형 1의 경우는 A, B를 동시에 관리하는 형태이다. 우선순위는 A에 있으므로 Buffer내 A를 전문적으로 Monitoring하고 B는 상황만 파악만 하면 되지만 설비 비율이 R1에 비해 R2가 3배나 되므로 그 점을 충분히 감안하여야 한다. 이 두가지 설비에 대해서만 고려할 때는 간단히 설비비율에 맞춰 투입하면 된다는 사실을 알 수 있다.

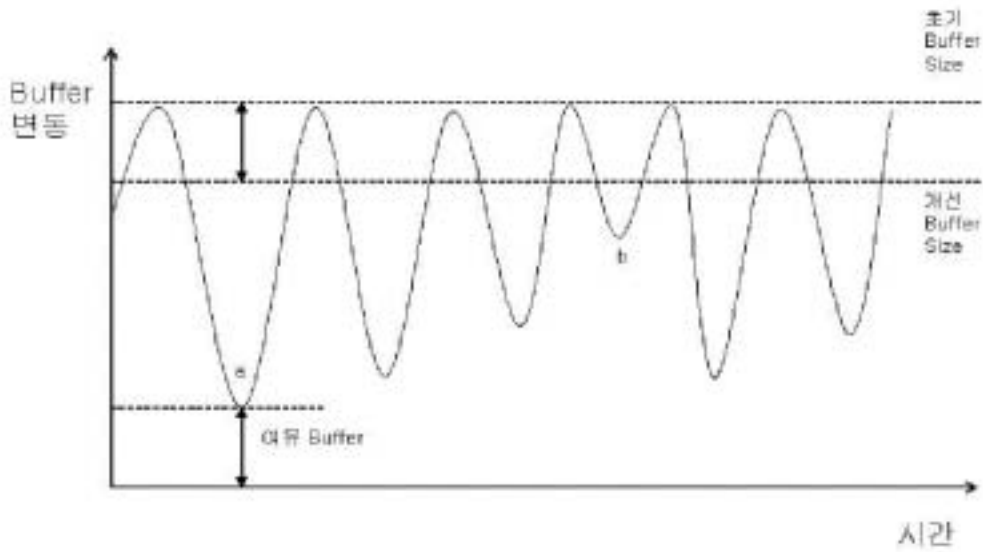
투입부품의 우선순위 설정을 위해 M개의 설비에 N개의 부품종류가 존재할 때의 문제는 LP(Linear Programming)나 IP(Integer Programming)를 활용하여 해결할 수도 있을 것이다. 그러나 본 논문에서는 제외한다

참고적으로 기존의 생산방법을 사용했을 때 CCR 공정으로 원자재 투입은 R1, R2의 설비 능력을 기준으로 투입되는데 R1, R2의 비율이 1:2이므로 P에서 A, B의 생산비율을 1:2로 하여 R1:R2에 각각 투입한다. 기존모형과 DBR을 사용할 때의 가장 큰 차이점은 CCR을 포함하고 있는 ROPE에 투입되는 부품의 양이다. 만약 기존의 방법대로 생산할 경우 분업화의 원칙에 따라 P공정에서는 후공정을 신경쓰지 않고 설비를 최대한 가동하여 A, B를 비율에 따라 만들어내고 R1, R2는 그에 맞춰 투입되는 부품들을 처리할 것이다. 그러나 실제상황에서는 설비의 Cycle Time은 분포에 따라 약간씩 차이가 있고 설비관리나 고장과 같은 상황이 발생한다면 그 균형은 무너지게 된다. Buffer의 개념이 없는 상태에서는 R1의 설비는 A, B 모두 수용할 수 있으므로 R2의 공급상황에서 R1이 B를 흡수할 수 있으나 R1에서 이상이 발생하였을 경우에는 재고가 누적되는 결과를 가져온다. 만약 R1, R2 별개로 관리하여 각자의 재고에 대해서는 상관하지 않는다고 할 경우에는 한쪽으로 재고가 치우치는 현상도 생길 수 있을 것이다. 이런 상황에서 DBR의 효과는 Buffer를 통해 일정수준 이상의 투입이 이루어지지 않게 함으로써 재고 통제가 이루어지게 한다는 점을 생각할 수 있고 DBR을 사용하면 재고가 감축한다는 점도 충분히 이해할 수 있다.

## 5. Buffer내 재고 변동과 Buffer Size 결정

실제 생산라인에서 시간변동에 따른 Buffer 변동을 살펴보면 [그림 2]와 같은 것이다. a점의 경우 CCR이 가장 원활하게 가동된 상황을 보여주고 있고 b의 경우 고장이나 공급상황이 많이 발생하는 기간에 사용된 Buffer로 CCR의 가동이 원활하지 못한 상황을 보여주고 있다. 이때 관측된 기간동안 개선될 수 있는 Buffer Size는 초기 Buffer Size에서 여유 Buffer를 뺀 것이다. 그러나 실제 현장에서는 관측된 시간의 길이에 과거의 생산방식 습성으로 안전재고를 확보하려고 할 수 있고 때문에 개선없이 초기값으로 유지할 가능성도 있다. 이는 향후 Buffer Size의 변동에 관해 얻을 수 있는 정보가 부족하기 때문이다.

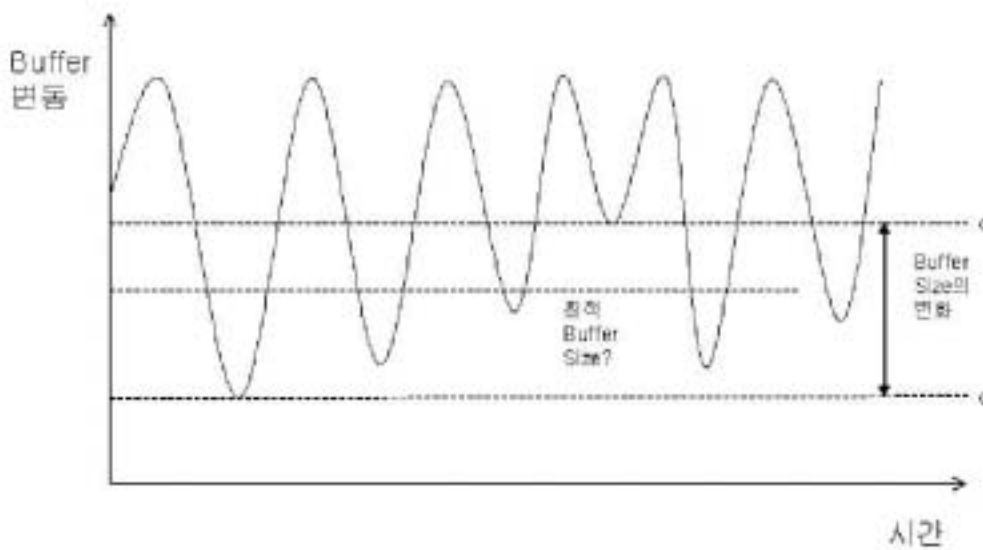
컴퓨터 시뮬레이션에서 모델링 과정은 실제 상황을 축약해 놓은 것이므로 완벽한 재현은 어려울 수 있으나 생산환경 변화에 따른 Buffer Size를 사전에 관찰해 볼 수 있고 재고상황, 새로운 제약공정의 발견에 관련하여 많은 정보를 제공할 수 있다.



[그림 2] 단일품목의 Buffer 내 재고변동

Buffer Size 결정은 여러 가지 기준으로 접근이 가능하겠지만 본 논문에서는 간단한 비용 (생산량 부족으로 발생하는 비용) 접근방법으로 결과를 비교해 보고자 한다. 비용에서 사용될 항목은 재고비용과 결품비용이다. Buffer Size를 크게 할 경우 생산은 원활히 이루어지지만 재고비용은 커질 것이고 재고 비용을 줄이기 위해 Buffer Size를 작게 할 경우 생산 차질로 인한 결품비용이 발생한다고 본 것이다.

납기가 매우 중요한 산업에서는 결품비용이란 개념은 생각하지도 않을 부분이지만 계획생산이 이루어지는 경우나 가전제품과 같은 경우 재고부족으로 판매의 기회를 잃었을 때 발생할 수 있는 경우라고 보면 좋을 것이다.

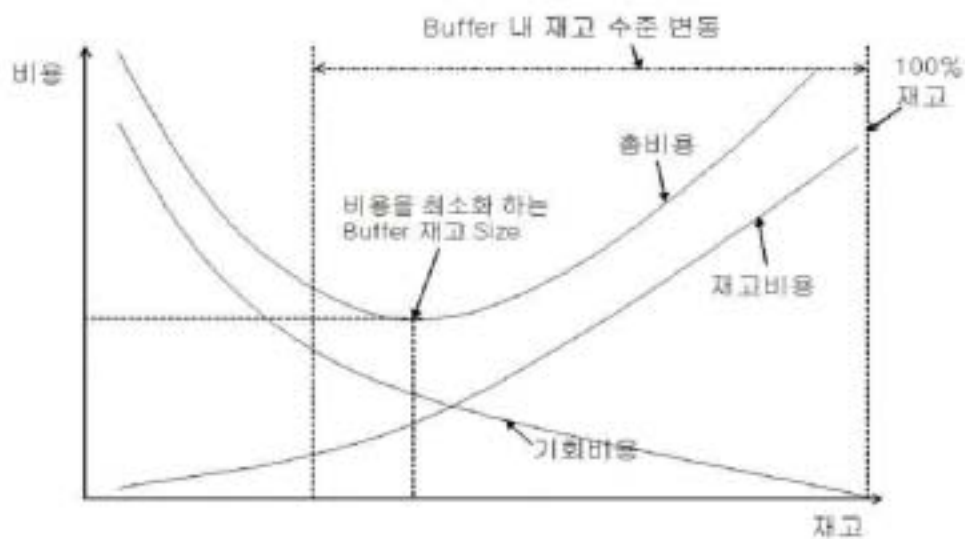


[그림 3] 단일품목의 Buffer 내 재고 변동에 따른 Buffer Size 결정과정

[그림 3]을 다시 살펴보면 제약공정의 생산부진으로 인한 c 지점과 가장 생산이 원활했던 d 지점 사이에서 최적 buffer size를 결정 할 수 있는데 c 지점의 경우 직선 아래에 있는 Buffer 부족은 기회비용으로 발생하고 d 지점의 경우 직선 위에 있는 Buffer 공간은 재고 확보를 위해 재고투입이 발생하므로 재고 비용이 커지게 된다.

Buffer Size를 결정하는 관점이 [그림 3]의 결품이 발생하지 않는 Buffer Size에서 비용이 최소화되는 Buffer Size로 바뀌었음을 알 수 있다. 즉 기업의 비용/수익 목표와 비교하여 Buffer Size를 결정하는 것이다.

비용의 관점에서 Buffer Size를 살펴보면 [그림 4]와 같이 볼 수 있다. 문제점은 결품비용이 관점에 따라 차이가 있을 수 있으므로 적용하는 기업실정에 맞게 가정할 필요가 있다.



[그림 4] 재고비용과 결품비용에 따른 최적재고점

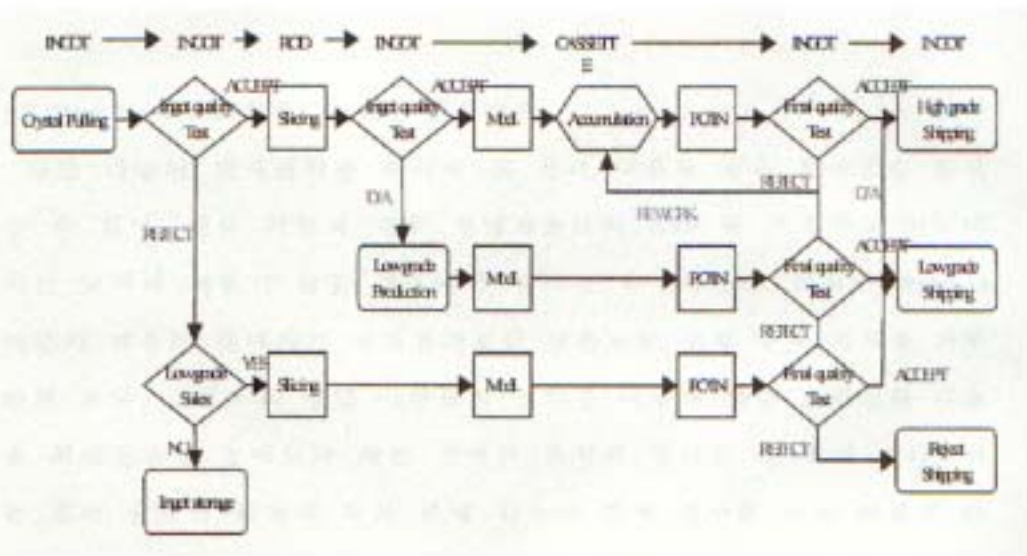
#### 6. 사례(Wafer 생산라인)

본 사례는 문제창 외(2001)에 적용되었던 사례로 제약공정은 Microsoft 사의 Excel을 이용하여 이미 구해져 있다. 제약공정을 구하는 과정은 이미 여러 문헌을 통해 충분히 알려진 것이므로 생략한다.

Wafer 생산공정은 각 공정의 처리시간이 매우 길고 몇개의 중간품이 배치를 이루어 가공되는 공정이 많다. 배치를 형성하기 위해 대기시간도 길어져서 실제 DBR 모형을 적용하기가 용이하지 않은 편이다. 예로 ROPE의 길이 측정의 경우 공정마다 배치 단위를 달리하기 때문에 정확한 시간을 선택하는게 쉽지 않다. 그렇다고 설비 수가 많지 않은 공정에서 배치 단위를 적게 설정할 수도 없는 상태다. 컴퓨터 시뮬레이션은 이러한 문제를 좀 더 쉽게 접근할 수 있도록 해 줄 것으로 예상하고 있다.

간단히 공정진행 과정을 살펴보면 원자재 투입이후 제품가공과 Cutting 공정의 반복으로 구성되어 있다. 공정 중에 생성되는 중간품으로 보면 INGOT, ROD, CASSETT, Wafer의 단계를 거치며 중간품 사이는 모두 Cutting 공정을 가지고 있다. 공정의 진행 과정은 [그림 5]과 같다.





[그림 5] Wafer 생산라인의 전체 공정도

품질문제로 인해 원자재를 가공해서 생성된 INGOT의 길이가 여러 종류여서 후공정의 Cutting에서도 각기 다른 길이의 중간품을 Cutting 하게된다. 예를 들어 공정 중에 품질체크를 위해 처음 생성된 INGOT 단위로 배치단위가 결정되므로 ROD를 길게 Cutting 할수록 배치 이동은 빨라질 수 있을 것이다. 그러나 CASSETT의 경우는 길이의 편차가 거의 없게 Cutting 된다.

이미 언급한 바와 같이 CCR은 이미 결정되어 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 새로운 제약공정을 발견할 수도 있겠지만 현재는 결정된 제약공정을 기준으로 진행한다. CCR은 [그림 6]과 같이 S 공정이다. S 공정은 ROD를 CASSETT으로 Cutting하는 공정으로 Capacity (ROD의 길이를 수용할 수 있는 정도) 기준으로 6대의 X형 설비와 10대의 Y형 설비가 있다. 이 설비에 투입되는 ROD는 X형, Y형 설비의 Capacity를 기준으로 L-ROD, S-ROD로 구분하고 길이가 긴 ROD를 L-ROD로 하고 길이가 작은 ROD를 S-ROD로 정하였다. 그리고 X형 설비는 L-ROD, S-ROD 모두 수용 가능한 반면, Y형 설비는 S-ROD만 수용이 가능하다. 처음 설명 때 품질문제로 인해 INGOT의 길이가 다르게 나타난다고 하였는데 생성되는 INGOT을 기준으로 만들어질 수 있는 ROD의 수를 [표 1]에서 보여주고 있다. [표 1]의 내용은 실제 상황을 바탕으로 가상으로 결정한 사항이다.

INGOT 사이즈 군	발생비율	S-ROD	L-ROD
A군	10%	2개	2개
B군	20%	3개	2개
C군	60%	4개	3개
D군	10%	5개	4개

[표 1] INGOT 군별 ROD 생성 수

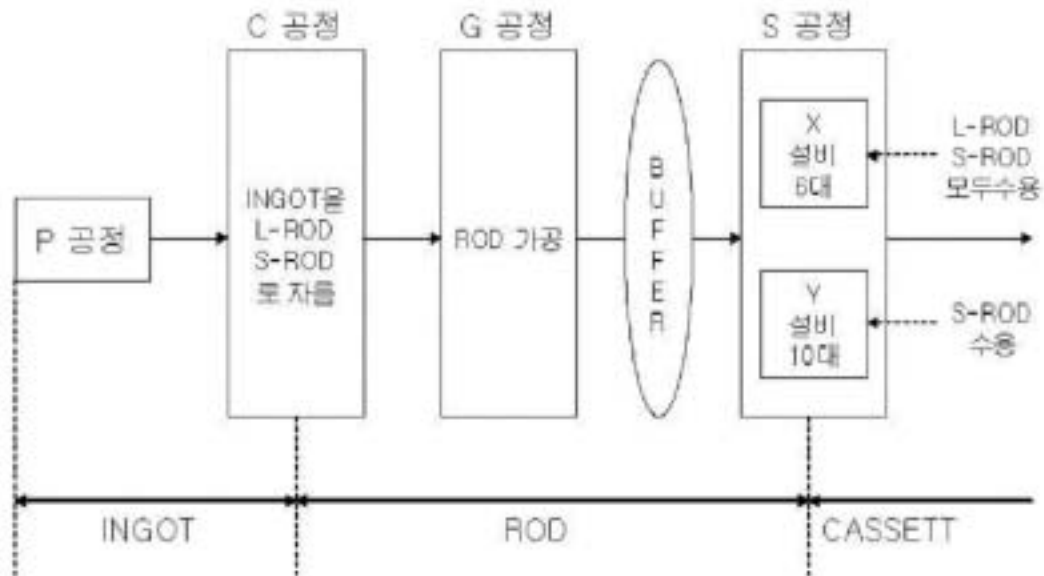
ROD가 S공정에 투입되기 위해서는 INGOT에서 ROD로 Cutting 하는 공정이 필요한데



이를 C공정이라고 한다. C공정 후에 ROD는 몇차례 걸쳐 가공작업을 하는데 이를 통틀어 G 공정으로 표현하였다. 앞에 설명한 상황들을 요약하면 [표 2], [그림 6]과 같다.

	P 공정	C 공정	G 공정	S 공정
작업	INGOT 변형	INGOT을 ROD로 가공	ROD를 가공작업	ROD를 CASSETT으로 가공
특징	다양한 Size	S 공정을 대비하여 L-ROD, S-ROD로 가공	S-ROD만 가능한 설비가 3대, 모두 가능한 설비가 1대	S-ROD만 가능한 설비가 10대, 모두 가능한 설비가 6대

[표 2] CCR 관련 공정현황



[그림 6] DBR 기준의 공정개요

DBR에서는 CCR을 최대한 이용하는데 중점을 두고 있다. "4. Buffer 설정을 위한 사례의 DBR 모형"에서 설명한 바와 같이 CCR을 최대한 활용하기 위해서는 Throughput이 높도록 유지해야 한다. 통상의 Throughput은 CCR 가동대비 이익으로 표시되지만 여기서는 재고를 줄이고 공정을 원활히 하는 것을 기준으로 하여 X설비에 L-ROD만 받도록 만들고 항상 L-ROD가 투입될 수 있게 Buffer를 설정하여야 한다. 그리고 Buffer를 포함한 ROPE의 크기에 따라 C 공정에서는 ROD를 Cutting한다. 여기서 ROPE는 C공정에서 시작한다. P 공정은 INGOT을 생성하는 공정으로 전체 Lead Time의 1/3 정도에 해당하는 생산시간을 가지고 있다. Buffer 변동에 따라 P 공정 투입을 조절하기엔 너무나 긴 시간이 소요되므로 생산된 INGOT은 불필요할 경우 외부판매나 외주가공으로 넘긴다는 개념으로 재고문제에서는 제외하는 것으로 가정한다.

S 공정에서 X 설비가 원활히 L-ROD를 생산할 수 있도록 하기 위해서는 Buffer내 L-ROD 재고수준을 파악하고 L-ROD를 공급할 수 있어야 하는데 C 공정은 Buffer의 재고수준에 대한 정보를 수용하여 Buffer내 L-ROD가 유지되도록 해야 한다. 더불어 Y공정도

CCR이므로 이용율이 벌어지지 않도록 S-ROD 투입이 유지되어야 한다. CCR 내에서 이원화된 부품관리를 처리하는 방법은 앞에서 언급한 대로 LP나 IP등을 이용하는 방법도 있을 것이지만 본 내용에서 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 사용한 방법은 아래와 같다

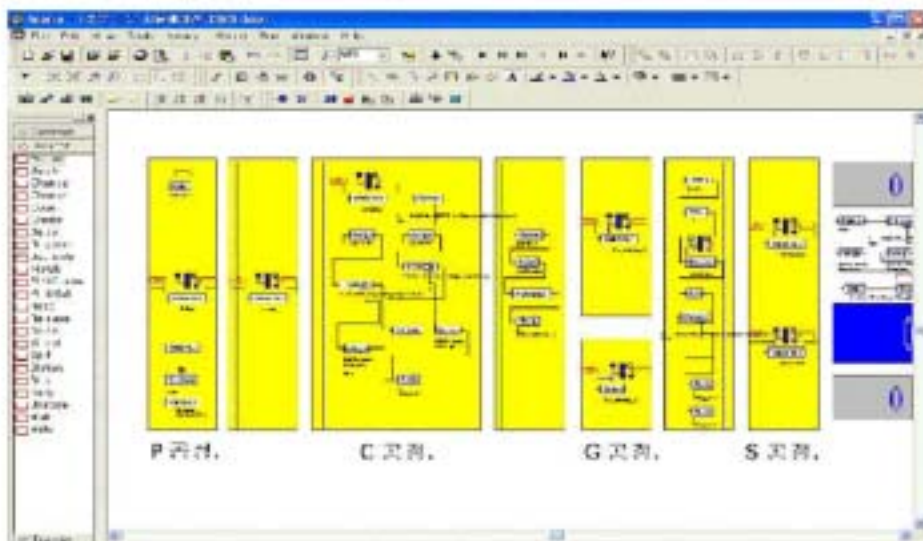
$$P에서 A의 생산량 = P에 투입되는 부품의 양 * \frac{X설비수 * ROPE내 A재고량}{(X설비수 * ROPE내 A재고량) + (Y설비수 * ROPE내 B재고량)} \dots \textcircled{1}$$

그리고 ROPE의 시작점인 C공정으로 부품투입 간격은 전체 ROPE의 길이에 따라 결정한다.

[표 3]은 DBR의 효과를 확인하기 위해 기존의 생산방법과 DBR 방법을 공정별로 정리한 것이다. 기존 시스템의 생산방식은 일반적으로 시행하는 생산계획 수립 후 변동없이 시행하는 것을 원칙으로 하여 중간품 재고누적에 대한 별다른 대응을 하지 않으며 S공정에 투입되는 L-ROD, S-ROD의 양을 S공정의 설비 Capacity 기준으로 만들어낸다. 즉, X설비 6대와 Y설비 10대를 기준으로 하여 C공정에서는 L-ROD:R-ROD=6:10 으로 생산된다. 이때 비교하고자 하는 내용은 시뮬레이션 모델이 전체 공정을 완성되었을 경우 전체 Lead Time과 재고수준 비교를 하고자 하였으나 현재는 CCR을 기준으로 DBR의 ROPE 범위로만 한정 짓는다. 앞에서 언급한 대로 ROPE는 C공정에서 시작한다.

	P 공정	C 공정	G 공정	S 공정
기존 시스템	생산계획에 의해 생산 (변동없음)	S 공정의 X, Y 설비 비율에 따라 INGOT을 ROD로 Cutting	ROD 가공	X 설비는 L-ROD 우선가공
DBR 시스템	①생산계획에 따라 투입 ②Buffer 수준에 따라 변동발생	Buffer Size에 따라 작업우선 순위 설정(L-ROD 우선)Cutting	ROD 가공	X 설비는 L-ROD 우선가공

[표 3] 비교대상 시스템의 생산방식

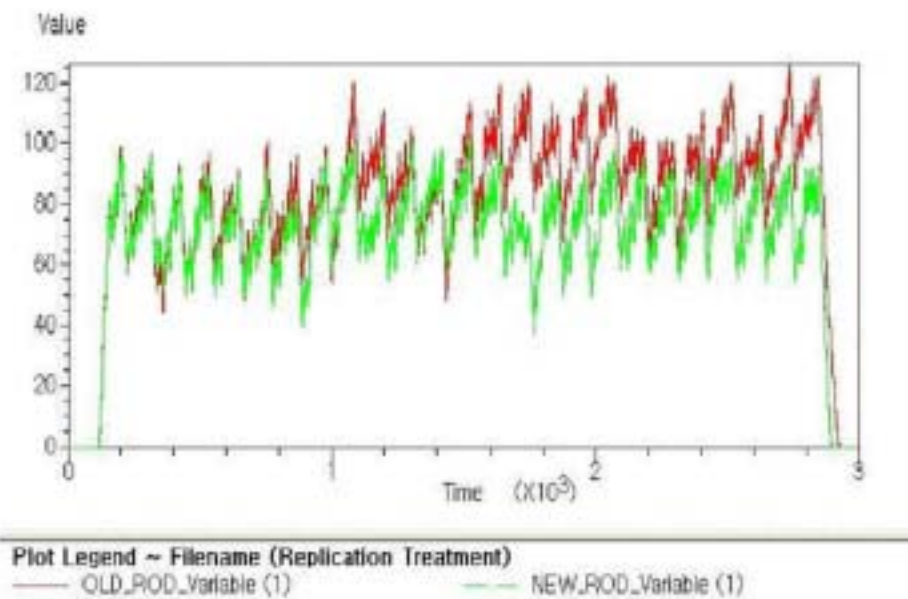


[그림 7] 컴퓨터 시뮬레이션 모델링

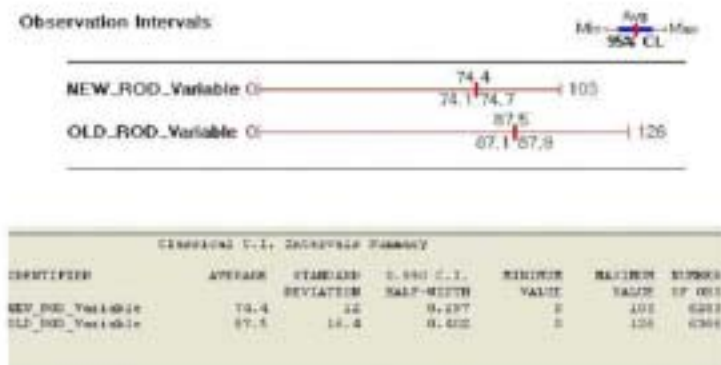
## 7. 분석결과

DBR을 적용할 때 나타나는 효과는 CCR을 중심으로 단위(일) 생산량에 대한 투입이 이루어지므로 공정 중에 불필요한 재공품이 없기 때문에 리드타임이 짧아지고 재공품이 줄어들게 된다. 연구가 진행중인 상태이므로 신뢰성 검증이 이루어진 결과는 아니지만 컴퓨터 시뮬레이션 결과도 비슷한 상황을 보여주고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 주문 단위의 자료가 정리되지 않은 관계로 1500 INGOT 생산을 기준으로 실험하였고 모델링의 범위가 원자재 투입에서 CCR까지의 범위이므로 주로 ROPE 내 재고변동에 대해서 언급한다.

[그림 8]은 ROPE내의 시간대별 재고변동을 보여주고 있다. 붉은색이 비율에 의해 투입되는 기존의 생산방법의 결과로 대체적으로 재고수준이 높게 나타난다는 것을 알 수 있다.



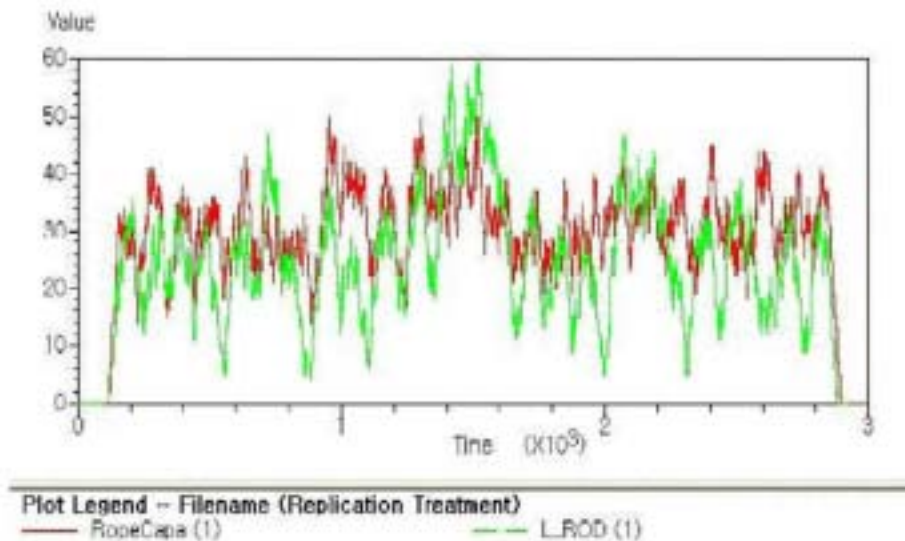
[그림 8] ROPE 내 재고변동(ROD 수)



[그림 9] ROPE 내 재고의 평균과 편차

그리고 [그림 9]에서 보는 바와 같이 관측된 구간에서 평균을 기준으로 하였을 때 기존 방법에 비해 DBR을 적용한 방법이 약 15%의 재고절감 효과가 나타났다. 이 결과는 컴퓨터 시뮬레이션에 좀 더 첨가시켜야 할 사항들(전체 모델링에 의한 결과, 고장분포 등)과 DBR의 모형 개선 등으로 좀 더 좋은 결과가 나올 수도 있을 것으로 예상된다.

INGOT 단위로만 따지고 볼 때도 평균 Lead Time은 기존방법이 340.97시간, DBR을 적용한 방법이 335.28시간으로 DBR을 적용한 방법이 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 비록 ROPE 범위의 Lead Time이지만 전체 공정에서는 차이가 더 커질 것을 보인다. 두 방법의 Lead Time에 차이가 나는 가장 큰 이유는 L-ROD 생산량이다. X, Y 설비 모두 일정한 가동이 이루어지는 상태에서 L-ROD 생산량이 많다는 것은 그 만큼 INGOT의 흐름이 빨라진다는 것이기 때문이다. [그림 9]에서 보는 바와 같이 L-ROD의 양은 DBR 방법쪽이 많다는 것을 알 수 있다.



[그림 9] ROPE 내 L-ROD의 변화

처음 이 사례를 DBR에 적용할 때 가장 곤란한 점은 CCR을 찾아서 CCR 기준으로 재공품을 투입하면 되는 것이 아니라 계층우선순위가 존재한다는 점이었다. DBR 예제에서 많이 다뤄지는 어떤 순서로 투입할 것이냐의 문제가 아니라 상황에 따라서는 완전히 분리된 두개의 CCR이 될 수도 있는 문제였다. 이 문제는 여러가지 접근방법이 있을 수 있으나 식 ①을 개발해서 적용해보았고 그 결과로 [그림 9]와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 붉은 색으로 표시된 부분이 DBR에 식 ①을 적용시킨 것으로 언뜻 눈으로 보기에도 기존의 방법인 비율투입보다 좋은 결과가 나왔음을 알 수 있다.

## 8. 결론

처음 시도했던 내용은 Buffer Size 측정과 결정에 관한 것이었으나 시간적 이유로 많은 부분을 다루지 못하였다. 전체 모델에서 CCR과 관련된 일부분만 뽑아서 다뤘기 때문에 분석결과가 어느 정도의 신뢰성을 가지고 있는지 확실하기 어려운 것은 사실이다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 부분 모델링의 결과만 봐도 DBR의 효과는 시사하는 바가 크다.

적어도 낮은 재고를 유지하면서도 동일한 생산성을 가져올 수 있다는 점과 관리대상을 CCR에 한정하는 것만으로도 전체공정을 관리하는 것과 동일한 효과를 제시한다는 점에서 전면이 부각되지 않은 숨겨진 비용 효과가 클 것으로 예상된다. 컴퓨터 시뮬레이션으로 실험을 진행하면서 가장 곤란했던 점은 Buffer Size 설정에 관한 것이었다. Buffer 값을 설정해도 ROPE 내의 공정시간이 너무 길었기 때문에 Buffer의 설정자체가 의미가 없게 되어버린 것이다. 직접 CCR을 결정하지 않은 관계로 CCR이 다른 것일 수도 있다는 의구심도 들었지만 전체 모델링이 끝나기 전에는 확인이 어려울 것 같다. 그러나 Buffer Size의 조절이 어려운 대신 ROPE 전체를 Buffer 처럼 관리함으로써 재공품 투입 스케줄을 조절하는 것이 가능했다. 본 논문의 진도가 미진한 관계로 많은 정보를 제시하는데 한계가 있었다는 점이 아쉽지만 추후 좀 더 나은 분석결과를 제시할 것이며 앞으로 많은 TOC 사례 발표가 이어지기를 바라며 글을 마친다.

## 9. 참고문헌

- [1] 고시근, 윤훈용(2001), 제약이론에서 제약버퍼의 크기 결정, *IE Interfaces*, 14(4), 334-340
- [2] 고시근, 김재환(2002), 안정된 수요를 갖는 생산라인에서 Kanban을 사용한 DBR 시스템의 구현, *IE Interfaces*
- [3] 김기동, 우상복, 한형상(2001), 자원 제약을 고려한 조선산업에서의 탑재 일정계획에 관한 연구, *IE Interfaces*, 14(3), 218-226
- [4] 문세창, 임석철(2001), 제약이론 기반의 기업이익 최적화 방법론, *IE Interfaces*, 14(4), 356-364
- [5] 최정길, 김수진, 추정민, 정선화, 정남기(2001), DBR 기반의 APS 시스템 상세 설계, *IE Interfaces*, 14(4), 348-355
- [6] 한영근, 김연균(2001), 인터넷을 통한 주문생산환경에서의 실시간 생산 DBR 스케줄링, *IE Interfaces*, 14(4), 341-347
- [7] 함정근(2002), 버퍼와 버퍼 관리, 대한산업공학회/한국경영과학회 2002 춘계공동학술대회
- [8] Atwater, J. B., Chakravorty, S. S.(2002), A Study of the Utilizaion of Capacity Constrained Resource in Drum-Buffer-Rope Systems, *Production and operations management*, 11(2), 259-273
- [9] Cheng, L.(2002), Line balancing VS. Theory of Constraints You can't use line balancing to optimize a flow line, *IIE solutions*, 34(4), 30-33
- [10] COMAN, A., ROENE, B.(2000), Production outsourcing: a linear programming model for the Theory-of-Constraints, *International journal of production research*, 38(7), 1631-1640
- [11] Constraints Management Group, LLC, About Drum-Buffer-Rope, [www.thoughtwarepeople.com](http://www.thoughtwarepeople.com)
- [12] Gamble, D.(2002), Abstract: Application of the Theory of Constraints in a Ceramic Plant, 23(2), 69-70
- [13] Guide, V. D.(1995), A Simulation Model of Drum-Buffer-Rope for Production Planning and Control Naval Aviation Depot, *Simulation*, 65(3), 157



- [14] Jaideep Motwani and Kathleen Vogelsang(1996), The Theory of constraints in practice at Quality Engineering, Inc., *Managing Service Quality*, 6(6), 43-47
- [15] John F. Tanner, Jr., Earl D. Honeycutt, Jr.(1995), Reengineering Using the Theory of Constraints, *Industrial Marketing Management*, 25, 311-319
- [16] Mabin, V. J.(2001), Toward a Greater Understanding of Linear Programming, Theory of Constraints, and the Product Mix Problem, 42(3), 52-54
- [17] Michalski, L.(2000), Applying the Theory of Constraints Managing Multiple Deadlines, *Pharmaceutical Technology*, 24(9), 126-133
- [18] Miller, B.(2000), Applying TOC in the real world HOW a manufacturer of custom-engineered products experienced dramatic performance improvement by implementing the theory of constraints, *IIE solutions*, 32(5), 49
- [19] R VERMA(1997), *Management Science*, Theory of Constraints/Optimized Production Technology and Local Optimization, 25(2), 189-200
- [20] Russell, G. R., Fry, T. D.(1997), Order review/release and lot splitting in drum-buffer-rope, *International journal of production research*, 35(3), 827-845
- [21] Simons, J. V., Simpson, W. P., Carlson, B. J., James, S. W., Lettiere, C. A., Mediate, B. A(1996), Formulation and solution of the drum-buffer-rope constraints scheduling problem(DBRCSP), *International journal of production research*, 34(9), 2405-2420
- [22] Shams-ur Rahman(1998), Theory of Constraints A review of the philosophy and its applications, *International Journal of Operations & Production Management*, 18(4), 336-355
- [23] Steven J. Balderston and Victoria J. Mabin(2000), A Review of Goldratt's Theory of Constraints(TOC)-lessons from the international literature, The St. Press
- [24] Tyan, J. C., Chen, J. C., Wang, F. -K.(2002), Development of a state-dependent dispatch rule using theory of constraints in near real world wafer fabrication, 14(3), 253-261
- [25] Umble, M. M. Umble, E. J.(1999), Drum-Buffer-Rope for Lower Inventory, *Industrial management*, 1999 Sept./Oct., 24-33
- [26] Wu, S. -Y, Morris, J. S., Gordon, T. M.(1994), A simulation analysis of the effectiveness of Drum-Buffer-Rope scheduling in furniture manufacturing, *Compuer & industrial engineering*, 26(4), 757
- [27] Zinovy D. Radovilsky(1998), A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints, *Production Economics*, 55, 113-119