

직렬 생산라인에 대한 DBR 방식의 평가 Evaluation of DBR system in a serial production line

고시근

부산광역시 남구 용당동 산100 부경대학교 산업공학과

Abstract

An alternative to traditional production planning and control systems such as MRP and JIT is the drum-buffer-rope (DBR). Using the DBR system, companies can achieve a large reduction of work-in-process (WIP) and finished-goods inventories (FGI), significant improvement in scheduling performance, and substantial earnings increase. The purpose of this paper is to analyze the effect of the DBR system in a serial production line. Using Markov process, we modeled a DBR system with three stages. For the model developed, we analyze the system characteristics and then present an optimization model for system design. The system performance is also analyzed through sensitivity analysis.

Keywords: TOC(Theory of Constraints), DBR(Drum-Buffer-Rope), Markov process

1. 서론

산업사회가 발전함에 따라 생산시스템에 대한 관리기법도 지속적으로 발전해왔다. 특히 기존의 추진(Push)식 생산관리 기법(예를 들어 MRP)에 대한 대안으로 일본에서 개발된 Kanban 방식과 같은 청구(Pull)식 생산관리 기법이 널리 사용되고 있다. 그러나 Spearman 등(1990)은 Kanban 방식의 문제점을 지적하고 대안으로서 또 다른 청구식 시스템인 CONWIP 방식을 제안하면서, 그들의 방식이 기존의 추진식 시스템 및 Kanban 시스템에 비해 우수함을 주장하였다. CONWIP이란 라인 전체의 재공품 수준을 일정하게 (Constant Work In Process) 유지하는 기법으로서 많은 연구가 이어졌다. 특히 Hopp & Spearman(1991)은 고장을 고려한 CONWIP 생산라인에서의 산출을 분석하였고, Hopp & Roof(1998)는 CONWIP 생산라인에서의 확실적인 산출관리를 위한 재공품 재고의 양을 분석하였다. 최근에는 Duri 등(2000)이 세 단계로 이루어진 직렬 CONWIP 생산라인에서 검사작업을 고려한 연구를 수행하였다.

또 다른 관리시스템으로는 Eli Goldratt에 의해 제시된 제약이론(TOC; Theory of Constraints)이 있다. TOC는 “시스템의 목표를 달성하는데 제약이 되는 요인을 찾아 집중적으로 개선함으로써, 단기간에 가시적인 경영 개선의 성과가 나타나고, 장기적으로는 지속적인 경영개선을 추구하여 시스템의 전체적 최적화를 달성하는 프로세스 중심의 경영혁신 기법”이라고 정의된다(Choi, 2001). TOC 개념이 처음 소개되었을 때는 그 적용분야가 생산

분야에 국한되어 있었으나 점점 넓어져 최근에는 1)생산을 포함한 운영(Operations), 2)재무 및 측정(Finance and Measures), 3)프로젝트 관리, 4)공급체인(Supply Chains), 5)영업(Marketing), 6)판매(Sales), 7)인력관리(Managing People), 8)전략 및 전술(Strategic and Tactics) 등의 8개 분야에 적용되고 있다(Blackstone, 2001).

본 연구에서는 TOC를 생산시스템에 적용하는 기법인 DBR(drum-buffer-rope) 시스템에 관심을 둔다. 1980년대 초에 OPT(optimized production technology) 소프트웨어를 통한 컨설팅으로 많은 기업에서 큰 성과를 거둔 Goldratt이 이 소프트웨어의 핵심 원리를 경영기법으로 체계화한 것이 DBR로서, 이 방식은 제약자원을 찾아내어 최대한 효율적으로 활용하고 비제약자원을 제약자원에 종속시켜 제약자원이 생산의 흐름을 통제하도록 함으로써 개선의 효과를 극대화시켜 준다. 또한 DBR은, Spearman 등(1990)이 지적하였듯이, 제약공정을 기준으로 선행공정들은 CONWIP 방식의 청구(Pull)식 시스템이고 후속공정들은 추진(Push)식 시스템인 청구-추진 복합시스템이라고도 볼 수 있다.

TOC 및 DBR에 대한 연구도 전세계적으로 널리 수행되었다. 특히 Goldratt & Cox(1992)는 소설의 형식을 빌려 TOC의 개념을 설명한 “The Goal”을 출간함으로써 TOC에 대한 전세계적인 관심을 불러 일으켰다. 국내에서도 TOC의 개념을 소개하는 책이 Jeong(1999)과 Choi(2001)에 의해 출간되었다.

연구논문으로는 우선 Schragenheim & Ronen(1990)이 DBR을 적용하기 위한 다음의 3개 단계를 제시하고 이 단계들이 매 생산계

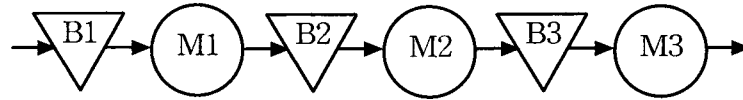
확시 반복되어야 함을 강조하였다.

- 단계 1. 제약자원의 능력이 충분히 활용되는 일정계획을 작성한다.
- 단계 2. 버퍼의 크기를 결정한다.
- 단계 3. 위의 두 단계에 따른 원자재 투입계획을 작성한다.

Cook(1994)은 흐름생산 환경에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 TOC, JIT, 그리고 기존의 제조환경을 비교하여 TOC의 우수성을 강조하였다. Miltenburg(1997)는 JIT, MRP, TOC 등을 비교한 후 MRP의 개념을 약간 변형하면 MRP 시스템 내에서도 JIT 및 TOC의 개념을 구현할 수 있음을 주장하였다. Chakravorty(1996)는 DBR의 실제 적용사례를 소개함으로써 그 우수성을 주장하였고 Russel & Fry(1997)는 DBR 시스템에서 주문처리 및

- $1/\lambda_2, 1/\lambda_3$ 인 음지수분포를 따르는 상호 독립인 확률변수이다.
- 4) 두 번째 공정(M2)이 시스템의 제약이다. 즉, $\lambda_2 < \lambda_1$ 및 $\lambda_2 < \lambda_3$ 를 만족한다.
- 5) DBR 방식을 적용하기 위해 제약자원인 M2에서 한 단위의 생산이 완료된 경우에만 원자재를 B1 에 투입한다. 따라서 B1, M1, B2, M2 에 존재하는 품목의 수는 항상 일정하게 유지되며 이 값을 K 라고 놓는다.
- 6) B3 및 M3에 존재하는 품목의 수는 N을 초과할 수 없다. 따라서 B3 및 M3에 존재하는 품목의 수가 N일 경우 M2는 작동을 멈춘다.

여기서 n_i 를 B_i 및 M_i 에 존재하는 부



<그림 1> 세 단계로 이루어진 직렬 생산라인

로트 분할의 효과를 시뮬레이션을 통해 제시하였다. 또한 Radovitsky(1998)는 버퍼의 크기에 대한 Queueing 모형을 제시하였고 이 모형은 Koh & Yoon(2001)에 의해 좀더 일반화되었다. 최근에는 Koh & Kim(2002)이 DBR의 세가지 버퍼(제약버퍼, 조립버퍼, 출하버퍼)를 기준으로 CONWIP 시스템을 적용한 새로운 시스템을 제안하기도 하였다.

본 연구에서는 DBR의 적용효과를 분석하기 위해 세 개의 공정이 직렬로 연결된 간단한 생산라인을 고려하였다. 두 번째 공정이 제약공정이라고 가정하고 DBR을 적용하면 두 번째 공정에서 처리가 완료됨과 동시에 첫 공정에 원자재가 투입되므로 첫 공정과 두 번째 공정이 CONWIP 라인과 같이 운영된다. 제약공정을 거친 재공품은 세 번째 공정 앞에서 대기하다가 차례가 되면 세 번째 공정에서 처리되어 완성품이 되는 것이다. 이러한 시스템을 Queueing Network으로 모형화하여 버퍼의 크기에 따른 시스템의 수행도를 평가한 뒤 시스템 설계에 대한 최적화 문제를 제안하고 최적해를 구하였다.

2. 모형의 개발

2.1 Markov 프로세스 모형

문제의 모형화를 위해 다음과 같이 가정한다.

- 1) 생산라인은 <그림 1>과 같이 세 개의 공정(M1, M2, M3)이 직렬로 연결된 형태이다. 각 공정의 앞에는 대기물량을 위한 대기장소(B1, B2, B3)가 있다.
- 2) 각 공정은 고장을 일으키지 않는다.
- 3) 각 공정의 처리시간은 평균이 각각 $1/\lambda_1,$

품의 개수(단, $i = 1, 2, 3$)라고 하자. 예를 들어 n_1 이 3 이라면 B1 에서 두 개의 부품이 대기중이고 M1 이 한 개를 처리하고 있다는 의미이다. 즉, $n_i > 0$ 이면 i 번째 공정이 가동중이라는 것을 의미한다. 그러나 위의 가정 (6) 에 의해 n_3 가 N 일 경우에는 $n_2 > 0$ 라 하더라도 두 번째 공정은 작동을 중단하게 된다.

시스템의 상태는 (n_2, n_3) 와 같이 두 개의 변수를 사용해 완벽하게 표현할 수 있다. 위의 가정 (5) 에 의해 $n_1 = K - n_2$ 가 항상 만족되므로 n_1 은 시스템 상태변수에 포함되지 않아도 된다. 시스템의 상태변수가 가질 수 있는 값은 다음 집합으로 표현될 수 있다.

$E = \{(i, j) \mid i=0, 1, \dots, K, j=0, 1, \dots, N\}$
또한 시스템 상태변수의 총갯수를 NS 라고 하면 $NS = (K+1)(N+1)$ 이 된다.

우리가 해야할 첫 번째 작업은 시스템이 안정상태(steady state)에 도달하였을 때 시스템이 각 상태에 머물게 될 확률분포를 구하는 것이다. 그 확률을 다음과 같이 표시하자.

$$p(i, j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{\text{시점 } t \text{에서의} \quad (1)$$

시스템 상태 = $(i, j)\}$

그런데 시스템 상태를 이렇게 두 개의 값으로 표시하면 앞으로의 분석작업이 상당히 복잡해 지므로 표기의 편의를 위해 NS개의 시스템 상태를 정수 집합 $\{0, 1, \dots, NS-1\}$ 로 연결해주는 함수 $\Psi: E \rightarrow \{0, 1, 2, \dots, NS-1\}$ 를 생각한다. 즉,

$$\Psi(i, j) = i + j(K+1) \quad (2)$$

와 같은 함수를 사용한다. 예를 들어 $K = 10$ 인 경우 시스템 상태 (5, 3)은 정수 38 과 연결된다. 이제 정수화된 시스템 상태변수를 사용해 안정상태에서의 시스템 상태별 확률값을 표기하면 다음과 같다.

$$p_k = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{\text{시점 } t \text{에서의 시스템 상태} = k\} \quad (3)$$

정수화된 상태변수 k 를 사용해 원래의 상태변수 (i, j) 를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$j = \left\lfloor \frac{k}{K+1} \right\rfloor \text{ 및 } i = k - j(K+1) \quad (4)$$

여기서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 작거나 같은 정수 중 최댓값을 의미한다.

시스템의 상태는 마코프 프로세스에 따라 변화하게 되며 안정상태의 확률분포를 구하기 위해서 우선 이 마코프 프로세스의 전이 행렬

(Transition Matrix)을 구하도록 한다. NS 개의 시스템 상태가 존재하므로 이 전이 행렬은 행과 열의 개수가 NS 이다. 이 행렬의 요소값은 다음과 같은 성질을 이용해 쉽게 구할 수 있다. 즉, $X_i (i=1, \dots, n)$ 가 평균이 각각 $1/\lambda_i$ 인 음지수 분포의 상호독립 확률변수라면 이들 중 X_k 가 최소일 확률은 다음과 같다.

$$\Pr[X_k \leq X_1, X_k \leq X_2, \dots, X_k \leq X_n] \quad (5)$$

$$= \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

이 성질을 이용해 전이 행렬을 구한 결과가 <표 1>에 정리되어 있다. 이 표에서 지정하지 않은 요소값은 모두 0 이므로 표에서 생략하였다. 표에서 제시한 확률을 몇 가지만 예

<표 1> 전이(Transition) 확률

전이 전 상태	전이 후 상태	확률	첨자 설명
0	1	1.0	-
i	i+1	$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$	i=1, ..., K-1
	i+K	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$	
K	2K	1.0	-
j(K+1)	j(K+1)+1	$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_3}$	
	(j-1)(K+1)	$\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3}$	
i+j(K+1)	i+j(K+1)+1	$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$	i=1, ..., K-1 j=1, ..., N-1
	i+j(K+1)+K	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$	
	i+(j-1)(K+1)	$\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$	
K+j(K+1)	2K+j(K+1)	$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_3}$	
	j(K+1)-1	$\frac{\lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$	
i+N(K+1)	i+N(K+1)+1	$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_3}$	i=0, ..., K-1
	i+(N-1)(K+1)	$\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3}$	
N(K+1)+K	N(K+1)-1	1.0	-

로 들어본다. K는 10 그리고 N은 5라고 가정하자. 시스템이 상태 7, 즉 상태 (7, 0)에 있다면 세 번째 공정은 작동을 멈추고 있는 상태이므로, 다음 상태는 첫 공정의 처리가 완료되어 8, 즉 (8, 0) 이거나 두 번째 공정의 처리가 종료되어 17, 즉 (6, 1) 이 될 수 있고 각 상태로 갈 확률은 각각 $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 과 $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 이다.

만약 현재 상태가 23, 즉 (1, 2) 라면 전이 가능한 상태는 24, 즉 (2, 2), 33, 즉 (0, 3), 그리고 12, 즉 (1, 1)의 세 개이고, 각 상태로 전이 될 확률은 각각 $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$,

$\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$, $\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$ 가 됨을 쉽게 알 수 있다. 그런데 시스템이 상태 55 와 64 사이에 있는 경우(즉 상태 (i, 5), i=0, ..., 9)에는 가정 (6)에 의해 두 번째 공정이 작동을 멈추므로 전이 가능한 상태가 두 가지라는 사실에 유의하여야 한다.

또한 $X_i (i=1, \dots, n)$ 중 최소의 분포는 다음과 같은 분포함수를 갖는다.

$$\Pr[\min(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq z] = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i z\right] \quad (6)$$

즉, 또 다른 음지수 분포가 되는 것이다. 따라서 이제 Y_i 를 시스템이 상태 i 를 한번 방문했을 때 그 상태에 머무르는 시간이라고 하면 Y_i 도 음지수분포를 갖는 확률변수가 되며 그 평균이 $1/\mu_i$ 이 된다. 단, μ_i 의 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_0 = \lambda_1 \quad (7)$$

$$\mu_i = \lambda_1 + \lambda_2, \text{ 단 } i=1, \dots, K-1 \quad (8)$$

$$\mu_K = \lambda_2 \quad (9)$$

$$\mu_{j(K+1)} = \lambda_1 + \lambda_3, \text{ 단 } j=1, \dots, N-1 \quad (10)$$

$$\mu_{i+j(K+1)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \text{ 단 } i=1, \dots, K-1 \text{ 그리고 } j=1, \dots, N-1 \quad (11)$$

$$\mu_{K+j(K+1)} = \lambda_2 + \lambda_3, \text{ 단 } j=1, \dots, N-1 \quad (12)$$

$$\mu_{i+N(K+1)} = \lambda_1 + \lambda_3, \text{ 단 } i=1, \dots, K-1 \quad (13)$$

$$\mu_{K+N(K+1)} = \lambda_3 \quad (14)$$

이제 $\nu = (\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{NS-1})$, $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ 라고 하면 전이 행렬 P를 사용해 다음 식을 만족하는 ν 를 구할 수 있다.

$$\nu P = \nu \text{ 그리고 } \nu e = 1 \quad (15)$$

이 연립방정식은 NS 개의 변수와 NS+1 개의 식으로 이루어져 있으므로 다음과 같이 변환하여 해를 구하도록 한다.

$$\nu Q = b \quad (16)$$

단, $b = (1, 0, 0, \dots, 0)$ 이고 Q 는 I - P 의 첫 열을 모두 1 로 바꾼 행렬이다. 물론 여기서 I 는 크기 NS \times NS 의 단위행렬이다. 그러면

$$\nu = b Q^{-1} \quad (17)$$

가 되므로 ν 는 Q^{-1} 의 첫 번째 행에서 얻을 수 있다.

또한 시스템이 상태 k 를 방문한 시점에서 그 상태를 떠난 후 다시 k 로 돌아올 때까지 소요되는 시간의 기대치를 $CYCLE_k$ 라고 하면

$$CYCLE_k = \mu_k^{-1} + \nu_k^{-1} \sum_{i \neq k} \nu_i / \mu_i = \nu_k^{-1} \sum_{i=0}^{NS-1} \nu_i / \mu_i \quad (18)$$

가 되고 따라서 시스템이 상태 k 에 머물 확률은

$$p_k = \frac{1/\mu_k}{CYCLE_k} = \frac{\nu_k / \mu_k}{\sum_{i=0}^{NS-1} \nu_i / \mu_i} \quad (19)$$

가 된다. 일단 이 확률값들이 구해지면 이 값들을 사용해 시스템의 특성을 분석할 수 있게 된다.

2.2 시스템 성과의 측정

쓰루풋(T : Throughput)은 제약이론에서 가장 중요하게 취급되는 재무척도로서 제품의 판매를 통한 수입에서 그 제품의 생산에 투입된 자재비를 뺀 값으로 정의된다. 즉 시스템이 판매를 통해 창출할 수 있는 총 수입이다. 제품의 판매단위당 쓰루풋이 일정한 크기를 갖는다면 단위시간당 쓰루풋은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$T = \lambda_3 C_T \Pr[M3 \text{가 가동중}] = \lambda_3 C_T \left[1 - \sum_{i=0}^K p(i,0)\right] \quad (20)$$

단, C_T 는 완제품 한 단위당 쓰루풋 (즉, 단위 가격과 단위당 재료비의 차이)이다.

또한 제약이론에서의 운영비(OE: Operating Expense)는 총비용에서 재료비를 제외한 부분이다. 본 연구에서는 이 비용을 재고유지비용과 버퍼 공간 유지비의 합으로 생각하였다.

$$OE = C_H \left[K + \sum_{j=1}^N j \sum_{i=0}^K p(i,j) \right] + C_S (K+N) \quad (19)$$

단, C_H 는 단위시간당 재공품 1단위의 재고 유지비용이고 C_S 는 단위시간당 버퍼공간 유지비용이다.

이 두 개의 평가항목을 사용하면 제약이

른 개념에서의 순이익(NP : Net Profit)을 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$NP = T - OE$$

$$= \lambda_3 C_T \left[1 - \sum_{i=0}^K p(i,0) \right]$$

$$- C_H \left[K + \sum_{j=1}^N j \sum_{i=0}^K p(i,j) \right] - C_S(K+N) \quad (20)$$

3. 시스템 설계

이제 우리의 관심을 시스템의 설계에 두도록 하자. 본 연구에서 제시된 형태의 시스템을 사용하는 경우 과연 어느 정도의 버퍼를 유지하는 것이 가장 좋겠느냐 하는 문제이다. 식 (20)을 목적함수로 하고 K 와 N 을 결정변수로 하는 최적화 문제가 바로 시스템 설계 문제가 된다.

문제의 형태가 간단하지 않으므로 분석적인 방법으로 최적해를 구하기는 불가능하다. 따라서 수치적 탐색(Numerical Search) 기법을 사용하기로 한다. 증명은 할 수 없지만 직관에 의해 그리고 많은 문제를 풀어본 결과에 의하면 N 이 (혹은 K 가) 고정되어 있을 때 K 의 (혹은 N 의) 변화에 따른 NP 의 변화모양은 단일 봉우리(Unimodal)의 위로 볼록(Concave) 함수이므로 간단한 탐색절차를 쉽게 말할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 생산시스템에 TOC 개념을 적용하는 가장 중요한 기법인 DBR 방식을 다루었다. 생산시스템을 세단계로 이루어진 직렬 생산라인으로 가정하고 DBR 방식을 적용하였을 때의 시스템 상태를 마코프 프로세스 이론을 사용해 모형화하였다. 시스템의 형태가 너무 간단하고, 공정의 처리시간을 지수분포로 가정하는 등 실제 문제와는 조금 거리가 있지만 DBR을 적용했을 때의 시스템 상태를 이론적으로 분석하였다는 점이 본 연구의 의의라 할 수 있다.

분석과정은 우선 시스템의 상태를 나타낼 수 있는 상태 변수를 정의하고 시스템이 안정 상태에 도달하였을 때의 각 상태별 확률분포를 구하였다. 이 확률분포를 사용해 쓰루풋과 운영비용, 그리고 순이익과 같은 시스템의 평가항목들을 계산할 수 있었다. 또한 시스템의 형태에 대한 최적화 모형을 제시하고 시스템의 각종 파라미터의 변화에 의한 시스템 형태 변화를 관찰하였다.

현재 저자는 CONWIP과 DBR을 비교하는 연구를 수행중이며 여기에는 본 연구의 최대 약점인 현실성을 제고하기 위해 좀더 복잡한 형태의 시스템을 다루고 있다. 물론 이러한

시스템을 분석적으로 연구하는 것은 어려우므로 시뮬레이션을 이용해야 할 것이다.

참고문헌

- Blackstone, J.H. Jr. (2001), Theory of constraints - a status report, *International Journal of Production Research*, 39(6), 1053-1080.
- Chakravorty, S.S. (1996), Robert Bowden Inc.: a case study of cellular manufacturing and drum-buffer-rope implementation, *Production and Inventory Management Journal*, 37(3), 15-19.
- Choi, K.S. (2001), *Password for Company Resurrection - TOC*, Haneon, Seoul, Korea.
- Cook, D.P. (1994), Simulation comparison of traditional, JIT, and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks, *Production and Inventory Management Journal*, 35(1), 73-78.
- Duri, C., Frein, Y. and Lee, H.S. (2000), Performance evaluation and design of a CONWIP system with inspections, *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 219-229.
- Goldratt, E.M. and Cox, J. (1992), *The Goal*, North River Press.
- Hopp, W.J. and Roof, M.L. (1998), Setting WIP levels with statistical throughput control (STC) in CONWIP production lines, *International Journal of Production Research*, 36(4), 867-882.
- Hopp, W.J. and Spearman, M.L. (1991), Throughput of a constant work in process manufacturing line subject to failures, *International Journal of Production Research*, 29(3), 635-655.
- Jeong, N.K. (1999), *TOC - Constraint Management*, Daecheong Media, Seoul, Korea.
- Koh, S.G. and Kim, J.H. (2002), Implementation of DBR system with Kanban in a production line of static demand, to appear in *IE Interfaces*.
- Koh, S.G. and Yoon, H.Y. (2001), On the size of the constraint buffer in the TOC, *IE Interfaces*, 14(4), 334-340.
- Miltenburg, J. (1997), Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP, *International Journal of Production Research*, 35(4), 1147-1169.
- Radovilsky, Z.D. (1998), A quantitative approach to estimate the size of the

- time buffer in the theory of constraints,
International Journal of Production Economics, 55(2), 113-119.
- Russel, G.R. and Fry, T.D. (1997), Order review/release and lot splitting in drum-buffer-rope, *International Journal of Production Research*, 35(3), 827-845.
- Schragenheim, E. and Ronen, B. (1990), Drum-buffer-rope shop floor control, *Production and Inventory Management Journal*, 31(3), 18-22.
- Spearman, M.L., Woodruff, D.L. and Hopp, W.J. (1990), CONWIP: a pull alternative to kanban, *International Journal of Production Research*, 28(5), 879-894.