

공급사슬에서 채찍효과 최소화 대 비용 최소화

조면식^{1†}

Bullwhip Effect Minimization vs. Cost Minimization in Supply Chain

Myeon Sig Cho

ABSTRACT

Tendency for small changes in end-consumer demand to be amplified as one moves further up the supply chain is known as bullwhip effect (BE). BE is usually defined as $\text{variance}(\text{order})/\text{variance}(\text{demand})$. Since such distorted information throughout the supply chain can lead to inefficiencies, many studies to reduce variance(order) have been performed. However, in this study, we show that minimization of BE may increase inefficiencies of the supply chain. We introduce a new objective function to increase system efficiency using smoothed ordering policies. Simulation optimization is utilized to find optimal smoothed ordering policies.

Key words : Supply chain, Bullwhip effect, Smoothed replenishment policy, Simulation optimization

요약

하류업체에 발생하는 소비자 수요의 조그만 변화가 상류업체로 올라갈수록 증폭되는 현상을 채찍효과(BE)라 한다. BE는 일반적으로 주문량 분산/수요량 분산으로 정의된다. 이와 같이 왜곡된 정보는 공급사슬의 비효율성을 유발하므로, 주문량의 분산을 줄이는 많은 연구들이 수행되고 있다. 그러나 본 연구에서는 BE를 최소화하는 것이 오히려 공급사슬의 비효율성을 증가시킬 수 있음을 보여 주며, 스무딩된 주문 정책을 사용하여 공급사슬의 효율성을 증가시키기 위한 새로운 목적함수를 설정한다. 최적화된 스무딩 주문정책을 연구하기 위해 시물레이션 최적화 기법을 사용한다.

주요어 : 공급사슬, 채찍효과, 스무딩된 주문정책, 시물레이션 최적화

1. 서론

공급사슬의 하류업체에서 발생하는 주문의 변동성이 상류업체로 올라갈수록 증폭되는 현상을 Lee 등 (1997a, 1997b)은 Bullwhip Effect (채찍효과, BE)라고 정의하였으며, 이에 대한 해석적 분석 및 대응책을 제시하였다. BE가 발생하면 공급사슬내의 각 주체들은 주문의 변동성

에 대응하기 위해 추가적인 생산능력 보유 비용, 더 많은 안전 재고비용, 비계획적인 구매로 인한 원자재 구입비용 상승, 비효율적인 이용도 및 잔업비용, 과도한 창고비용 및 추가적인 수송비용 등으로 인하여 비용이 증가된다 (Mettters, 1997).

특히 시장 수요가 급격히 증가하며 제품 수명주기가 짧은 제품의 경우에는, 제품 공급이 부족하게 되리라는 예상에 따라 필요 이상으로 더 많은 제품을 상류업체에 주문하는 경향이 있다. 이런 현상에 의해 Cisco가 2001년 21억 달러를 결손 처분하게 된 경우 (Lee 등 2004), 1996년에 다마꼬치(장난감 이름)의 주문량이 급격히 증가함에 따라 생산능력을 확충하였으나 이후 급격히 감소한 주문으로 인한 부실재고 증가로 막대한 손실을 입은 Bandai 회사의 경우 (Higuchi와 Troutt 2004) 등으로부터 볼 수

*이 논문은 2011학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

접수일(2013년 3월 22일), 심사일(2013년 5월 14일), 게재 확정일(2013년 6월 10일)

¹⁾ 경기대학교 산업경영공학과

주 저 자 : 조면식

교신저자 : 조면식

E-mail; mscho@kgu.ac.kr

있듯이 BE는 회사에 치명적인 손실을 끼칠 수도 있다.

BE의 문제점이 부각됨에 따라 많은 연구가 수행되고 있다. 이들 연구들은 BE의 존재 및 측정에 관한 연구, BE의 원인에 관한 연구, BE의 영향을 줄이기 위한 연구 등으로 분류될 수 있다 (Cho와 Chang, 2008). 이들에 의하면 많은 연구에서 BE의 크기는 $Var(\text{주문})/Var(\text{수요})$ 으로 계량화되며, 이 값이 1 보다 큰 경우에 BE가 존재한다고 한다. 이러한 BE의 크기는 공급사슬의 각 단계에서 사용하는 수요예측기법, 주문정책, 정보공유 유무 등에 의해서 영향을 받는다.

BE의 크기에 영향을 미치는 요소들은 수요 예측기법 및 리드타임이며 (Chen 등 2000a; Luong과 Phien 2007), POS 데이터를 공유한다 하더라도 BE는 완전히 제거되지 않으며 (Chen 등 2000a; Hsiao와 Shieh 2006), BE는 공급사슬에 소속된 단계 수에 영향을 받는 것이 아니라 총 리드타임에 의해서만 영향을 받으며 (Gilbert 2005), BE는 상류업체로 올라갈수록 덧셈 (additive)이 아니라 곱셈 (multiplicative) 형태로 표시되며 (Dejonckheere 등 2002), 주기적으로 목표 재고량까지 주문을 하는 정책을 사용할 경우에는 수요 예측방법에 상관없이 BE가 발생하지만 (Dejonckheere 등 2003), 목표재고량을 변경하지 않을 경우에는 BE가 발생하지 않는다 (Kim 등 2006). 한편 여러 가지 스무딩된 주문정책이 BE에 미치는 영향을 연구되었다 (e.g., Chen 등 2000a, 2000b; Boute 등 2007; Disney와 Towill 2003a, 2003b; Dejonckheere 등 2004).

즉, 적절한 주문정책을 사용하여 주문의 변동성을 줄여 BE를 최소화하는 것이 공급사슬의 효율성을 극대화하는 것으로 인식되는 경향이 있다. 그러므로 본 연구에서는 스무딩된 주문정책을 사용하여, BE를 최소화하기 위한 최적의 스무딩 계수값을 실험적으로 탐색한다.

한편, Chen과 Samroengraja (2004)는 1개의 유한한 생산능력을 지닌 제조업체와 n개의 동일한 포아송 수요를 따르는 하류업체로 구성된 공급사슬에서, BE를 줄이는 재고 보충정책이 공급사슬의 비용을 항상 감소시키지 않음을 실험적으로 보여 주었다. 즉, BE가 제거된다고 하더라도 공급사슬의 효율성이 항상 개선되는 것이 아님을 보여 주었다.

이에 따라 본 연구에서는 공급사슬의 효율성을 제고하기 위한 새로운 목적함수 및 제약조건을 제시하고 이를 만족시키는 스무딩된 계수값을 실험적으로 탐색하여, 여러 가지 스무딩된 주문정책의 우수성에 대한 비교 연구를 수행하고자 한다.

2. 주문 정책에 관한 기존 연구

하류업체에서 사용되는 주문 정책은 주기적으로 재고를 파악하여 목표 재고량까지 주문하는 Order Up To (OUT) 정책과 (s,S)정책 및 이들의 변형으로 분류될 수 있다. OUT 정책은 매우 많은 논문에서 사용되고 있으며 (e.g., Chen 등 2000a, 2000b; Zhang, 2004; Gaalman과 Disney, 2006; Boute 등, 2007), 주문량의 분포가 정규분포를 따르고 고정 주문비용이 없으며 주기적으로 주문을 할 경우에는 최적의 주문정책이다 (Clark과 Scarf, 1960). 그러므로 본 연구에서는 하류업체가 주기적으로 재고를 조사하여 목표 주문량까지 주문하는 OUT 정책 및 이를 스무딩한 주문정책을 사용한다.

OUT 정책에서 각 주문 검토기간 말에서의 주문량 (O_t)은 다음과 같이 결정된다.

$$O_t = S_t - IP_t \tag{1}$$

S_t 는 기간 t 의 목표 재고량이며, IP_t 는 기간 t 말의 재고 수준 (inventory position)으로 이는 순 재고량 (NS_t)과 주문 중인 재고량 (WIP_t)를 합한 값이다. 여기서 순 재고는 현재 보유하고 있는 재고 (on hand inventory)에서 미충족 주문 (backorder)을 뺀 값이다.

목표 재고량은 주문 검토기간 (R)과 주문 후 주문량이 도착하기까지 소요되는 물리적 생산 리드타임 (T_p)을 합한 기간 $L (= R + T_p)$ 동안에 발생하는 수요 예측량 (\hat{D}_t^L)과, L 기간 동안 발생할 수 있는 불확실한 수요에 대비하기 위한 안전 재고 ($k\hat{\sigma}_t^L$)의 합으로 계산된다. 한편 \hat{D}_t^L 은 $L\hat{D}_t$ 로 계산되며, 기간 t 말에서의 수요 예측치인 \hat{D}_t 은 지수평활법 혹은 이동평균법 등으로 구해진다. 즉, $S_t = L\hat{D}_t + k\hat{\sigma}_t^L$. 여기서 $\hat{\sigma}_t^L$ 은 L 기간 동안 추정된 수요의 표준편차이며, k 는 원하는 수준을 만족하기 위해 설정된 계수이다. k 값 및 $\hat{\sigma}_t^L$ 을 구하는 것이 쉽지 않기 때문에 본 논문에서는 Dejonckheere 등 (2004)에서와 같이 k 값을 0으로 설정하고, 목표 재고량에 한 기간 동안의 수요 예측치를 더하기로 한다. 즉, $S_t = (L+1)\hat{D}_t$. 그러므로 식 (1)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} O_t &= S_t - IP_t \\ &= (L+1)\hat{D}_t - IP_t \\ &= (L+1)\hat{D}_t - (NS_t + WIP_t) \\ &= \hat{D}_t + (\hat{D}_t - NS_t) + (L-1)\hat{D}_t - WIP_t \\ &= \hat{D}_t + (INS_t - NS_t) + (DWIP_t - WIP_t) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 TNS_t 는 목표 순 재고량으로 $k=0$ 으로 추정된 안전재고량과 유사하며, $DWIP_t$ 는 목표 주문 중 재고량으로 $(L-1)\hat{D}_t$ 로 나타낼 수 있다.

Dejonckheere 등 (2004)은 식 (3)과 같이 식 (2)의 두 번째 항 및 세 번째 항에 스무딩 계수를 적용하는 APIOBPCS (Automatic Pipeline, Inventory and Order Based Production Control System)라는 주문정책을 제안하였다. 즉 이들은 목표 순 재고량과 현재 보유하고 있는 순 재고량의 차이, 그리고 목표 주문 중 재고량과 실제 주문중인 재고량의 차이에 스무딩을 하였다.

$$O_t = \hat{D}_t + \beta_2(TNS_t - NS_t) + \beta_3(DWIP_t - WIP_t) \quad (3)$$

한편, Boute 등 (2007)은 식 (4)와 같이 목표 재고량과 재고수준의 차이에 스무딩을 취하는 주문 정책을 사용하였다.

$$O_t = \beta(S_t - IP_t) = \beta\hat{D}_t + \beta(TNS_t - NS_t) + \beta(DWIP_t - WIP_t) \quad (4)$$

즉, 이들이 사용한 정책은 APIOBPCS와는 달리 첫 번째 항에도 스무딩을 하였으며, 세 개 항 모두에 동일한 스무딩 계수를 사용했다.

Jaksic과 Rusjan (2008)은 식 (5)와 같이 식 (3)의 두 번째 항 및 세 번째 항에 동일한 스무딩 계수를 취하는 주문정책에 관하여 연구하였다. 여기서 TIP_t 는 기간 t 말의 목표 재고수준이다.

$$O_t = \hat{D}_t + \beta(TIP_t - IP_t) = \hat{D}_t + \beta(TNS_t - NS_t) + \beta(DWIP_t - WIP_t) \quad (5)$$

즉, Dejonckheere 등 (2004)은 두 번째 항과 세 번째 항에 각기 다른 스무딩 계수를 취하는 스무딩된 OUT 주문정책, Boute 등은 모든 항에 동일한 스무딩 계수를 취하는 주문정책, 그리고 Jaksic과 Rusjan (2008)은 두 번째 항과 세 번째 항에 동일한 스무딩 계수를 취하는 OUT 정책에 관하여 연구를 하였다.

즉 최근 OUT 주문정책을 스무딩하여 주문의 변동성을 감소시켜, 즉 BE를 감소시켜 공급사슬의 성과를 개선시키려는 연구가 진행되고 있다. 그러나 이런 주문정책이 하류업체에서 발생하는 재고유지비용, 재고 부족비용, 그리고 주문 중 재고로 인한 비용에 미치는 영향에 대한 연구는 부족하다.

3. 실험 모델

본 연구에서는 앞 절에서 소개한 스무딩된 OUT 정책을 사용한 시뮬레이션 모델을 구축하기 위해 Arena (Kelton 등 2007)를 사용하였다. 한편 BE 값을 최소화하기 위한 최적 스무딩 계수를 구하기 위해 Arena에서 제공하는 최적화 패키지인 OptQuest를 사용하였다.

하류업체는 주문 검토 기간 말에 다음과 같이 결정된 주문량을 상류업체에 주문한다. 실험에서 검토 기간(R)은 1일이라고 가정한다.

$$O_t = \beta_1\hat{D}_t + \beta_2(TNS_t - NS_t) + \beta_3(DWIP_t - WIP_t) \quad (6)$$

즉, $\beta_1=1$ 인 경우에는 Dejonckheere 등 (2004)에서 사용된 APIOBPCS, $\beta_1=\beta_2=\beta_3$ 인 경우에는 Boute 등 (2007)에서 사용된 주문정책, $\beta_1=1, \beta_2=\beta_3$ 인 경우에는 Jaksic과 Rusjan (2008)의 주문정책과 동일하다. 한편 본 연구에서는 이들 연구와는 달리 $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ 인 주문정책도 연구한다.

하류업체에 발생하는 소비자 주문의 도착 간격시간은 평균 1시간인 지수분포를 따르며, 각 소비자 주문 당 수요량 분포는 EXPO(2.5), TRIA(1.2, 2.5, 3.8), NORM(2.5, 0.281)을 따르는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 즉 각 주문 당 주문 평균 개수는 2.5개이며, 지수분포를 따르는 경우의 주문량 분산은 6.25, 삼각분포 및 정규분포의 경우 분산은 0.281이다.

한편 식 (7)과 같이 표현되는 1차 자기회귀 프로세스(first-order autoregressive process, AR(1))는 BE 연구에서 많이 사용되는 수요 형태이므로 (e.g., Lee 등 1997b; Chen 등 2000a, 2000b; Zhang 2004; Chandra와 Grabis 2005; Luong과 Phien 2007), 주문량의 분포가 AR(1)을 따르는 경우에 대한 실험도 수행하였다.

$$D_t = \mu + \rho D_{t-1} + \epsilon_t, \quad |\rho| < 1 \quad (7)$$

D_t 는 시간 t 에서의 수요, μ 는 음수가 아닌 상수, ϵ_t 은 평균 0 분산이 σ^2 인 독립적이며 동일한 정규분포를 따르는 오차 항이며, ρ 는 1차 자동 상관관계수 (autocorrelation coefficient)이다. $|\rho| < 1$ 는 수요가 공분산 안정 (covariance stationary)임을 의미한다. Chen 등 2000a, Luong 2007은 BE의 크기가 ρ 의 크기에 의해서 영향을 받는다고 하였으므로 본 논문에서는 $\rho=0.5$ 와 $\rho=-0.5$ 인 경우에 대한 실험을 수행한다. 즉 $\rho=0.5$ 인 경우의 수요량, $D_t = 1.25 + 0.5D_{t-1}$

$+ \epsilon_t, \epsilon_t \sim NORM(0, 0.21075)$, 그리고 $\rho = -0.5$ 인 경우의 수요량, $D_t = 3.75 - 0.5D_{t-1} + \epsilon_t, \epsilon_t \sim NORM(0, 0.21075)$ 에 대한 실험을 수행한다. 여기서 μ 와 σ^2 는 위에서 언급한 삼각분포와 정규분포와 동일한 평균값 및 분산을 갖도록 결정되었다 ($E(D_t) = \mu/(1-\rho)$, $Var(D_t) = \sigma^2/(1-\rho^2)$). 즉, 본 연구에서는 다섯 가지 수요 패턴에 대한 실험을 수행한다.

소비자로부터의 주문 도착시, 하류업체가 주문량보다 같거나 많은 양의 재고를 보유하고 있다면 주문은 즉각적으로 만족된다. 그러나 충분한 재고가 없다면 소비자로부터의 주문은 불만족 처리되며, 현재 보유하고 있는 재고만 소비자에게 보내진다. 부족한 주문량은 추후 상류업체로부터 납품이 이루어질 때 FCFS 방식에 의해 보충된다. 즉, 판매 손실(lost sales)은 발생되지 않으며, 일부 납품을 허용한다. 일부 납품이 될 경우에도 소비자는 불만족한다. 만족율은 총 만족횟수/총 주문횟수로 정의된다.

Make to order 방식을 사용하는 상류업체에 도착한 주문은 상류업체의 대기행렬에서 대기하다가, 주문된 양이 FCFS 방식으로 모두 생산된 후 즉시 하류업체로 배송된다. 상류업체 제조시간의 분포가 재고 유지비용, 재고 부족비용, 그리고 주문 중 재고로 인한 비용에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음과 같은 세 개의 분포를 사용하였다. 1) EXPO(20)분/개, 2) TRIA(15, 20, 25)분/개 3) NORM(20, 4.162)분/개. 제조시간 분포의 모수는 상류업체의 이용도가 83.3%가 되도록 설정하였으며, 삼각분포 제조시간의 표준편차는 정규분포와 동일한 표준편차를 가지도록 하한치와 상한치를 설정하였다. 하류업체와 상류업체는 하루에 12시간 운영을 한다고 가정한다.

하류업체에서의 주문 발생부터 생산이 완료되어 하류업체에 제품이 도달할 때까지의 시간을 리드타임이라고 한다. 하류업체에 배송된 제품은 미충족 주문들이 있다면, 이들은 FCFS에 의해 먼저 서비스하고 나머지 제품은 하류업체의 재고로 쌓인다.

식 (2)에서 리드타임은 하류업체에서 발생하는 수요 분포, 주문 정책에 따라 상류업체에 도착하는 주문량 분포 및 상류업체 제조시간 분포의 함수이므로 이를 정확하게 예측하기는 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 리드타임이 2일 또는 4일이라고 가정하고, 리드타임이 성과지표에 미치는 영향을 분석한다.

앞에서 언급하였듯이 본 연구에서는 소비자의 주문 도착 간격 시간 및 주문량이 확률분포를 따르며, 상류업체에서의 제조시간 분포 역시 확률적이다. 이런 확률적 현

상이 실험결과에 미치는 영향을 최소화하기 위한 분산 감소기법으로 CRN (common random number) 기법을 사용하였다.

한편 실험 초기에 보유하고 있는 재고, 주문 중인 재고, 미충족 주문량 등이 실험결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해, 각 replication에서 150일을 warm up 기간으로 설정하였으며, warm up 이후에 500일, 즉 500번의 주문 검토 주기 동안 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 이렇게 독립적으로 수행된 replication들의 신뢰구간을 구하기 위해 80회씩 반복하였다. 즉, replication-deletion 기법을 이용하여 steady state 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

4. BE 최소화 모델

BE는 $Var(\text{주문})/Var(\text{수요})$ 로 정의된다. 많은 논문에서 주문정책이 OUT이고, 소비자 수요 예측기법으로 이동평균, 지수평활, 혹은 최소평균자승오차 등을 사용할 경우에 BE의 크기를 수학적으로 연구하였다 (Chen 등 2000a, 2000b; Alwan 등 2003; Chandra와 Grabis 2005; Luong 2007). Boute 등 (2007)은 하류업체에서의 BE가 감소한다면, 상류업체에 대한 주문이 스무딩해지므로 상류업체로부터 하류업체에 주문이 도착하는 리드타임이 감소할 뿐만 아니라 이의 변동성이 줄어들어 결과적으로 하류업체의 안전재고가 감소함을 보여 주고 있다. 한편 이들은 목표 재고량 S_t 가 시간에 관계없이 동일한 경우, 식 (4)의 주문정책을 사용하면 $BE = \beta/(2-\beta)$ 임을 보여 주었다. 즉 $0 < \beta < 1$ 인 경우에는 BE가 1보다 적지만, $1 < \beta < 2$ 인 경우에는 BE가 발생한다.

하류업체에 도착하는 소비자 수요의 분산보다 하류업체에서 상류업체에 주문하는 주문량의 분산이 클 경우에는, 즉 $BE > 1$ 일 경우에는, 상류업체에서 생산평균화가 어려울 것이므로 많은 경우에 BE를 1보다 적게 혹은 최소화하고자 하는 경향이 있다. 본 논문에서는 식 (3), (4), (6)의 스무딩된 OUT 주문정책을 이용하여 BE를 최소화 하는 스무딩 계수값을 찾고자 한다. 이를 위해 Arena에서 제공하는 시뮬레이션 최적화 패키지 OptQuest를 이용하며, 목적함수 및 제약조건은 다음과 같다.

목적함수	Min BE	
제약조건	$0.0001 < \beta_1, \beta_2, \beta_3 < 2$	(8)

Table 1은 소비자 수요가 지수분포(2.5)인 경우에 OptQuest를 이용하여 구한 최적 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 값 및 BE 값을

보여주고 있다. 식 (4)의 Boute 등의 주문정책을 사용할 경우 혹은 식 (6)의 스무딩 계수를 모두 변경하는 주문정책을 사용할 경우에는, 가공시간 분포에 상관없이 스무딩 계수 범위의 최소값인 0.0001에 접근할 경우에 BE의 최소값이 0.001로 근접함을 알 수 있다. 이와 같은 주문정책을 사용할 경우에는 BE를 줄이기 위해, 다시 말해 시물레이션에서 $Var(\text{주문})$ 을 감소하기 위해, 주문량 자체를 줄이는 경향이 있다. 그러므로 실험 시간이 증가함에 따라 주문 중 재고 및 현재 보유하고 있는 재고량은 0으로 되고, 미충족 주문은 지속적으로 증가한다. 즉, 이와 같은 주문정책을 사용할 경우에 BE 값은 0으로 접근하지만, 시물레이션 실험이 안정적 상태에 도달하지 않기 때문에 이 값은 의미없는 수치라 할 수 없다.

한편 Table 1에서 식 (3)의 APIOBPCS 주문정책을 사용할 경우에는 β_2 와 β_3 가 설정된 스무딩 범위의 최소값인 0.0001인 경우에 BE 최소값은 0.175이며, 이 값은 가공시간의 분포 및 주문량 결정시 사용된 추정 리드타임의 결과에 관계없이 동일함을 알 수 있다.

Table 2는 \hat{D}_t^L 추정시 사용되는 리드타임을 2일 혹은 4일로 임의로 설정하여 APIOBPCS 주문정책을 사용할 경우에 각 가공시간 분포 및 소비자 수요 분포에 대한 실

제 리드타임, 소비자 만족율, 보유 재고량, 주문 중 재고량, 미충족 주문량의 평균값 및 95% 신뢰구간의 1/2 폭을 보여주고 있다. 주문량 계산 시 임의로 사용된 리드타임 (2일 혹은 4일)은 실제 시물레이션에서 구한 리드타임에 영향을 주지 못함을 Table 2로부터 알 수 있다. (가공시간 분포가 지수분포(20), 소비자 수요 분포가 지수분포(2.5), 추정 리드타임이 2와 4인 경우에 실제 리드타임의 95% 신뢰구간은 각각 3.31 ± 0.37 , 3.32 ± 0.37 로 유의한 차이가 있다고 할 수 없다.) 한편 임의로 사용된 리드타임은 각 가공시간 및 수요 분포의 조합에 대해 실험을 통해 얻은 만족율, 보유 재고량, 주문 중 재고량, 미충족 주문량에 대하여도 유의한 차이를 보이지 않고 있다. (가공시간 분포가 정규분포와 삼각분포를 따르는 경우에는 여러 성과 지표 중 보유 재고량만이 임의로 사용된 리드타임에 의해 유의한 차이를 보이지만 보유 재고량 차이는 약 0.6%로 매우 작다.) 그러므로 이후 실험에서는 추정 리드타임을 2로 설정한 경우에 대해서만 언급하기로 한다.

가공시간이 지수분포인 경우에는 다른 가공시간 분포에 비해 작업시간의 변동성이 상대적으로 높기 때문에 실제 리드타임이 길어진다. 이에 따라 주문 중인 재고가 상대적으로 늘어나고, 보유 재고량이 상대적으로 감소하

Table 1. Optimal BE and smoothing coefficients when customer demand is EXPO(2.5)

Processing time	Estimated lead time	Replenishment policy	β_1	β_2	β_3	BE
EXPO (20)	2	APIOBPCS (eq. 3)	1	0.0001	0.0001	0.175
		Boute et al. (eq. 4)	0.0001	0.0001	0.0001	0.001
		$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ (eq. 6)	0.0029	0.0001	0.0033	0.001
	4	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	0.175
		Boute et al.	0.0001	0.0001	0.0001	0.001
		$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.0064	0.0001	0.0008	0.001
TRIA (15, 20, 25)	2	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	0.175
		Boute et al.	0.0001	0.0001	0.0001	0.001
		$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.0030	0.0001	0.0033	0.001
	4	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	0.175
		Boute et al.	0.0001	0.0001	0.0001	0.001
		$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.0067	0.0001	0.0007	0.001
NORM (20, 4.162)	2	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	0.175
		Boute et al.	0.0001	0.0001	0.0001	0.001
		$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.0030	0.0001	0.0033	0.001
	4	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	0.175
		Boute et al.	0.0001	0.0001	0.0001	0.001
		$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.0084	0.0001	0.0002	0.001

We obtain similar results when customer demand follows AR(1), triangular or normal distributions.

Table 2. Performance measures with APIOBPCS.

Processing time	Customer demand	Estimated lead time (days)	Real lead time (day)		Order fulfillment ratio (%)		On hand inventory		WIP		Backorder	
			mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length
EXPO (20)	EXPO(2.5)	2	3.31	0.37	94.1	2.4	306.1	9.1	100.8	11.4	4.0	2.9
		4	3.32	0.37	94.1	2.4	308.3	9.2	101.0	11.5	3.9	2.9
	TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	2	3.09	0.29	95.1	1.9	311.8	7.7	93.3	8.9	2.2	1.6
		4	3.10	0.30	95.1	1.9	314.0	7.8	93.4	8.9	2.2	1.6
	NORM (2.5, 0.281)	2	3.09	0.29	95.1	1.9	311.9	7.7	93.3	8.9	2.2	1.6
		4	3.10	0.30	95.1	1.9	314.0	7.8	93.4	8.9	2.2	1.6
TRIA (15, 20, 25)	EXPO(2.5)	2	0.90	0.01	99.8	0.2	374.9	0.7	28.1	0.4	0.0	0.0
		4	0.91	0.01	99.8	0.2	377.2	0.7	28.1	0.4	0.0	0.0
	TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	2	0.86	0.01	99.9	0.1	376.8	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
		4	0.86	0.01	99.9	0.1	379.1	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
	NORM (2.5, 0.281)	2	0.86	0.01	99.9	0.1	376.8	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
		4	0.86	0.01	99.9	0.1	379.1	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
NORM (20, 4.162)	EXPO(2.5)	2	0.90	0.01	99.8	0.1	374.9	0.7	28.1	0.4	0.0	0.0
		4	0.90	0.01	99.8	0.1	377.2	0.7	28.1	0.4	0.0	0.0
	TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	2	0.86	0.01	99.9	0.1	376.8	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
		4	0.86	0.01	99.9	0.1	379.1	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
	NORM (2.5, 0.281)	2	0.86	0.01	99.9	0.1	376.8	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0
		4	0.86	0.01	99.9	0.1	379.1	0.4	26.1	0.2	0.0	0.0

로, 미 충족 주문량이 커진다. 그러므로 소비자 만족율이 타 가공시간 분포에 비해 상대적으로 감소하는 경향이 있다. 즉, 가공시간 분포가 지수분포인 경우에 만족율이 약 95%인 반면에, 가공시간 분포가 삼각분포 혹은 정규분포인 경우에는 만족율이 거의 100%이다. 실험 입력자료에서 하루에 평균적으로 12회 주문이 도착하고, 매 주문 당 수요가 평균 2.5개이므로 일일 소비자 주문량은 30개다. 그러나 가공시간 및 소비자 수요 분포가 모두 지수분포인 경우, 시뮬레이션에서 구한 보유 재고량은 306~314개로 약 10일치의 수요, 주문 중인 재고량은 93~100개로 약 3일치 수요로 매우 높음을 알 수 있다.

한편 가공시간이 정규분포와 삼각분포일 경우에는 소비자 수요분포에 상관없이 만족율이 거의 100%에 달하므로, 즉 미충족 주문량이 거의 0이 되므로, 재고 부족비용은 발생하지 않는다. 그러나 보유재고량이 374~379개로 약 12일치의 이상의 재고를 보유하게 되므로 재고유지비용이 매우 높아지게 됨을 알 수 있다. 이때 주문 중 재고량은 실제 리드타임이 감소함에 따라 약 26~28개이며, 이는 지수분포인 경우에 비해 매우 감소함을 알 수 있다.

즉, APIOBPCS를 사용할 경우에 BE 값은 0.175로 최소화되었지만, 보유 재고량 및 주문 중 재고량의 합이

가공시간 및 소비자 수요분포에 상관없이 모두 400개를 상회하게 되므로 과도한 비용이 소요된다. 즉 BE를 최소화하는 것만이 공급사들의 최종 목적이 될 수는 없다. 그러므로 본 연구에서는 보유 재고량과 주문 중 재고량의 합을 최소로 하는 스무딩된 OUT 정책을 연구한다.

5. 보유 재고량과 주문 중 재고량 합의 최소화 모델

앞 절에서 언급했듯이, BE 값의 최소화가 공급사들의 비용 최소화를 의미한다고 할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 소비자에 대한 최소 요구 만족율을 유지하면서 공급사에서 발생하는 비용을 최소화하기 위한 스무딩된 OUT 주문정책에 관한 연구를 수행한다. 이를 위해 다음과 같은 목적함수 및 제약조건을 설정한다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수} & \text{ Min } \text{ 보유 재고량} + \text{ 주문 중 재고량} \\ \text{제약조건} & \text{ 요구 만족율} > 95\% \end{aligned}$$

$$0.0001 < \beta_1, \beta_2, \beta_3 < 2 \tag{9}$$

공급사에서 재고로 인한 비용은 하류업체에서 발생

하는 재고 유지비용과 재고 부족비용, 그리고 상류업체에 주문된 주문 중 재고 비용의 합이다. 단위 당 재고 유지비용과 주문 중인 재고량으로 인해 발생하는 비용의 상대적 비율을 알 수 없으므로, 본 연구에서는 이들 재고에 대하여 동등한 가치를 할당하고 이들 합을 최소화하고자 한다.

요구되는 만족율이 매우 높은 경우에는 과도한 재고를 보유해야 하므로 재고 유지비용이 커지는 반면에 미충족 주문으로 인한 재고 부족비용은 거의 발생하지 않는다. 그러나 요구되는 만족율이 매우 낮은 경우에는 하류업체에서 보유해야 하는 재고 및 상류업체에 주문 중인 재고로 인한 비용은 감소하지만, 미충족 주문으로 인한 재고 부족비용은 매우 커지게 된다. 즉 최소 요구 만족율은 재고 부족비용에 영향을 미치게 되므로, 이에 대한 제약조건은 미충족 주문량에 대한 간접적인 제약조건이라고 할 수 있다.

Table 3은 상류업체에서의 가공시간이 지수분포(20)분인 경우에 시뮬레이션에서 구한 최적 스무딩 계수, 보유 재고량과 주문 중 재고량 합이 최소값, BE, 실제 리드타임, 미충족 주문량에 대한 평균값 및 이들에 대한 95% 신뢰구간의 1/2 폭을 보여주고 있다. 스무딩 계수를 모두 달리 할당할 수 있는 경우에도 APIOBPCS와 같이 $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = \beta_3 = 0.0001$ 인 경우에 보유 재고량과 주문 중 재고량 합이 약 405.1~406.9개로 최소가 되었으며, BE값은 0.172~0.175, 시뮬레이션에서 구한 실제 리드타임은 3.09~3.31일, 미충족 주문량은 2.23~3.96개이다. 그러나 이들 값들에 대한 신뢰구간은 겹치므로 소비자 수요 분포에 의하여 영향을 받는다고 할 수는 없다. 즉, 가공시

간 분포가 지수분포를 따르는 경우에는 APIOBPCS나 모든 스무딩 계수를 달리 적용하는 주문정책의 결과는 동일하였다. Boute 등이 제안한 식 (4)의 주문정책을 사용할 경우에는, 상류업체의 기대 이용도가 83.3%가 되도록 입력자료가 설계되었음에도 불구하고, 소비자 수요 분포에 관계없이 모든 경우에 있어서 95% 만족율이란 제약조건을 충족하는 스무딩 계수를 찾을 수 없었다.

Table 4와 Table 5는 가공시간이 각각 삼각분포와 정규분포를 따르는 경우의 성과지표들을 보여주고 있다. Boute 등의 주문정책을 사용하며 수요가 지수분포일 때는 앞에서와 같이 실행가능한 해를 구할 수 없었지만, 수요가 삼각분포 혹은 정규분포를 따르는 경우에는 실행가능한 해를 구할 수 있었다. $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0.5$ 인 경우에 보유 재고량과 주문 중 재고량 합이 약 75.8개이며, 이때 BE 값은 약 1.4, 리드타임은 1.03으로, Boute 등의 주문정책을 사용할 경우에는 APIOBPCS나 스무딩 계수를 모두 달리 할당하는 경우에 비해 성과지표들이 열악함을 알 수 있다.

Table 4와 5에서 소비자 수요가 삼각분포 혹은 정규분포를 따르는 경우에 APIOBPCS 주문정책을 사용할 경우에는 보유 재고량과 주문 중 재고량 합이 63.54~64.17개이며, 모든 스무딩 계수를 달리 할당시키는 정책을 사용시에는 β_1 에 0.9358~1의 값을 할당할 경우 보유 재고량과 주문 중 재고량 합이 63.0~63.54로 APIOBPCS에서 구한 값보다는 약간 작지만 통계적으로 유의한 차이가 있다고 할 수는 없다. (단 가공시간이 정규분포이고 수요가 삼각분포인 경우에는 유의한 차이가 있지만 평균값의

Table 3. Optimal smoothing coefficients and performance measures when processing time is EXPO(20) (estimated lead time = 2 days)

Customer demand	Replenishment policy	Smoothing coefficients			On hand inventory + WIP		BE		Real lead time (day)		Backorder	
		β_1	β_2	β_3	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length
EXPO (2.5)	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	406.92	2.92	0.175	0.00	3.31	0.37	3.96	2.91
	BOUTE et al.	Infeasible										
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	1	0.0001	0.0001	406.92	2.92	0.175	0.00	3.31	0.37	3.96	2.91
TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	405.11	1.65	0.172	0.00	3.09	0.29	2.23	1.62
	BOUTE et al.	Infeasible										
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	1	0.0001	0.0001	405.11	1.65	0.172	0.00	3.09	0.29	2.23	1.62
NORM (2.5, 0.281)	APIOBPCS	1	0.0001	0.0001	405.12	1.65	0.173	0.00	3.09	0.29	2.23	1.62
	BOUTE et al.	Infeasible										
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	1	0.0001	0.0001	405.12	1.65	0.173	0.00	3.09	0.29	2.23	1.62

When demand follows AR(1) with $\rho=0.5$ and $\rho=-0.5$, we obtain similar results with triangular and normal distributions.

차이는 약 1.3%에 불과하다.) 그러나 BE는 신뢰구간이 겹치지 않으므로, 모든 스무딩 계수를 변경시키는 정책을 사용할 경우에 BE 값이 같거나 더 적다라고 할 수 있다.

Table 4와 5에서 수요가 지수 분포인 경우에는 APIOBPCS에 비해 모든 스무딩 계수를 달리 적용할 경우에 보유 재고량과 주문 중 재고량 합이 확연히 적어짐을 알 수 있으며 또한 실제 리드타임도 짧아짐을 알 수 있다. 즉, 지수 분포와 같이 소비자 수요의 변동이 클 경우에는 APIOBPCS보다 모든 스무딩 계수를 달리 할당하는 것이 좋지만, 정규분포 혹은 삼각분포와 같이 변동성이 작을 경우에는 APIOBPCS와 모든 스무딩 계수에 다른 값을 사용하는 주문정책의 성능에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

한편 Table 4에서 수요가 지수분포일 때, 모두 스무딩하는 주문정책을 사용할 경우에는 BE가 0.476, 보유 재고량과 주문 중 재고량 합은 84.47이다. 그리고 APIOBPCS 정책을 사용할 경우에는 BE가 이 보다 적은 0.403이지만 보유 재고량과 주문 중 재고량 합은 이보다 큰 90.23이다. 즉 BE와 보유 재고량과 주문 중 재고량 합에는 비례적인 관계가 존재하지 않는다고 할 수 있다.

Table 6은 하류업체에서 APIOBPCS 주문정책을 사용할 경우에, 식 (8)의 BE를 최소화하는 모델과 식 (9)의 보유 재고량과 주문 중 재고량 합을 최소화하는 모델에서 구한 최적 스무딩 계수와 여러 가지 성과지표들의 평균값 및 95% 신뢰구간의 1/2 폭을 보여주고 있다.

Table 4. Optimal smoothing coefficients and performance measures when processing time is TRIA(15, 20, 25) (estimated lead time = 2 days).

Customer demand	Replenishment policy	Smoothing coefficients			On hand inventory + WIP		BE		Real lead time (day)		Backorder	
		β_1	β_2	β_3	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length
EXPO (20)	APIOBPCS	1	0.0933	0.0593	90.23	0.63	0.403	0.01	1.069	0.022	0.75	0.13
	BOUTE et al.	Infeasible										
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.4481	0.1495	0.4378	84.47	0.38	0.476	0.01	0.934	0.008	0.61	0.12
TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	APIOBPCS	1	0.0333	0.0068	64.17	0.47	0.245	0.00	0.881	0.008	0.47	0.08
	BOUTE et al.	0.5039	0.5039	0.5039	75.84	0.24	1.400	0.01	1.031	0.011	0.45	0.06
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.9673	0.0324	0.0252	63.54	0.27	0.232	0.00	0.872	0.007	0.43	0.08
NORM (2.5, 0.281)	APIOBPCS	1	0.0273	0.0051	63.56	0.45	0.231	0.00	0.875	0.008	0.48	0.08
	BOUTE et al.	0.5049	0.5049	0.5049	75.51	0.22	1.405	0.01	1.032	0.011	0.45	0.06
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.9504	0.0274	0.0334	63.18	0.33	0.217	0.00	0.865	0.006	0.41	0.07

When demand follows AR(1) with $\rho=0.5$ and $\rho=-0.5$, we obtain similar results with triangular and normal distributions.

Table 5. Optimal smoothing coefficients and performance measures when processing time is NORM(20, 4.162) (estimated lead time = 2 days).

Customer demand	Replenishment policy	Smoothing coefficients			On hand inventory + WIP		BE		Real lead time (day)		Backorder	
		β_1	β_2	β_3	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length	mean	1/2 length
EXPO (20)	APIOBPCS	1	0.2176	0.1719	98.11	0.56	0.758	0.01	1.2	0.02	0.76	0.13
	BOUTE et al.	Infeasible										
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.3823	0.1855	0.5177	86.19	0.35	0.609	0.01	0.95	0.01	0.64	0.12
TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	APIOBPCS	1	0.0301	0.0059	63.84	0.46	0.238	0.00	0.88	0.01	0.48	0.08
	BOUTE et al.	0.5032	0.5032	0.5032	75.76	0.24	1.397	0.01	1.03	0.01	0.46	0.06
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	0.9358	0.0321	0.0426	63.00	0.16	0.223	0.00	0.87	0.01	0.41	0.08
NORM (2.5, 0.281)	APIOBPCS	1	0.0270	0.0050	63.54	0.45	0.231	0.00	0.87	0.01	0.49	0.08
	BOUTE et al.	0.5041	0.5041	0.5041	75.86	0.24	1.401	0.01	1.03	0.01	0.45	0.06
	$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$	1	0.0270	0.0050	63.54	0.45	0.231	0.00	0.87	0.01	0.49	0.08

When demand follows AR(1) with $\rho=0.5$ and $\rho=-0.5$, we obtain similar results with triangular and normal distributions.

Table 6. Comparison of minimize BE model and minimize sum of on hand inventory and WIP with APIOBPCS

Customer demand	Processing time	Objective function	Smoothing coefficients		BE	Order fulfillment ratio (%)	Real lead time	On hand inventory	WIP	Backorder
			β_2	β_3						
EXPO (2.5)	EXPO (20)	minimize BE	0.0001	0.0001	0.175	94.07	3.31	306.11	100.81	3.96
		minimize on hand inventory +WIP	0.0001	0.0001	0.175	94.07	3.31	306.11	100.81	3.96
TRIA (1.2, 2.5, 3.8)	TRIA (15, 20, 25)	minimize BE	0.0001	0.0001	0.172	99.92	0.86	376.81	26.08	0.00
		minimize on hand inventory +WIP	0.0333	0.0068	0.245	95.67	0.88	37.05	27.13	0.47
NORM (2.5, 0.281)	NORM (20, 4.162)	minimize BE	0.0001	0.0001	0.173	99.93	0.86	376.81	26.08	0.00
		minimize on hand inventory +WIP	0.0270	0.0050	0.231	95.64	0.88	36.66	26.88	0.49

소비자 수요와 가공시간의 분포가 모두 지수분포를 따르는 경우에는, BE를 최소화하는 모델에서 구한 소비자 만족율이 95% 이상이므로, 식 (9)의 보유 재고량과 주문 중 재고량 합을 최소화하는 모델에서 구한 값과 스무딩 계수가 동일하다. 이때 최소 BE값은 0.175이며 보유 재고량은 306.1개, 주문 중 재고량은 100.8개, 그리고 미충족 주문량은 3.96개이다.

그러나 소비자 수요와 가공시간의 분포가 모두 정규분포 혹은 삼각분포를 따르는 경우에는 BE 최소화 모델을 사용할 경우에 보유 재고량이 약 376.8개로 재고 유지비용은 증가하나, 소비자 주문을 만족시키는 확률은 거의 100%로 매우 커지게 되므로 미충족 주문량은 0으로 접근한다. 그러나 소비자 만족율을 최소 95% 만족하면서 보유 재고량과 주문 중 재고량 합을 최소화하는 모델을 사용하는 경우에는, $\beta_2=0.027 \sim 0.0333$ $\beta_3=0.005 \sim 0.0068$ 와 같이 매우 작은 스무딩 계수를 적용할 경우에 BE 값은 약 0.172에서 0.231~0.245로 증가하지만, 보유 재고량이 376.8개에서 약 37개로 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이는 BE 최소화 모델에서의 보유 재고량의 약 10%에 지나지 않는다. 즉, 상당한 재고 유지비용을 감소시킬 수 있다. 다시 말해 BE 최소화 모델에서는 Var(주문) 값을 감소시키기 위해 더 많은 재고량을 보유해야 하는 단점이 있다. 그러나 보유 재고가 감소함에 따라, BE 최소화 모델에 비해서는 미충족 주문량이 약간 증가함을 볼 수 있다. 주문 중 재고량은 BE 최소화 모델이나 보유 재고량과 주문 중 재고량 합 최소화 모델에 상관없이 거의 비슷하며, 이 값은 상류업체에서의 가공시간 분포에 의해 영향을 받는 실제 리드타임에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

6. 결 론

기존 공급사슬 연구에서는 BE의 존재를 밝히고 원인을 찾아내어 이의 영향을 줄이기 위한 연구가 주로 수행되었다. Var(주문)/Var(수요)로 표시되는 BE를 줄이기 위해, 즉 주문의 분산을 줄이기 위한 스무딩된 OUT 주문정책들이 연구되었다.

본 연구에서는 BE를 최소화하는 스무딩된 OUT 주문정책을 연구한 결과 BE만을 최소화할 경우에는 하류업체에서의 보유 재고량과 주문 중 재고량의 합이 매우 커짐을 알게 되었다. 이에 본 논문에서는 소비자의 최소 요구 만족율을 유지하면서 보유 재고량과 주문 중 재고량의 합을 최소화하는 스무딩된 OUT 주문정책을 연구하였다. 즉, 본 논문에서는 재고 유지비용, 주문 중 재고비용, 재고 부족비용을 최소화하는 OUT 정책에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 Arena에서 제공하는 시뮬레이션 최적화 도구인 OptQuest를 사용하였다.

실험 결과, Boute 등 (2007)이 제시한 동일한 스무딩 계수를 사용하는 주문 정책이 연구된 주문 정책 중 성과 지표가 가장 나빴다. 가공시간 분포가 지수분포를 따르는 경우에는 소비자 수요 분포에 상관없이 APIOBPCS나 모든 스무딩 계수를 달리 적용하는 주문정책의 결과는 동일하였다. 그러나 가공시간 분포가 삼각분포 혹은 정규분포와 같이 변동성이 작은 경우에는 소비자 수요의 변동에 따라 이 두 정책의 성능이 영향을 받았다. 즉 소비자 수요의 변동성이 지수분포와 같이 매우 클 경우에는 모든 스무딩 계수에 다른 값을 적용하는 주문정책이 좋았지만, 소비자 수요가 정규분포 혹은 삼각분포와 같이 변동성이 적은 경우에는 모든 스무딩 계수에 다른 값을 사용하는

주문정책과 APIOBPCS에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편 BE와 보유 재고량과 주문 중 재고량 합에는 비례적인 관계가 존재하지 않음을 알 수 있었다.

References

- Alwan, L.C., Liu, J.J., and Yao, D.Q., "Stochastic Characterization of Upstream Demand Processes in a Supply Chain", *IIE Transactions*, No. 35, pp. 207-219, 2003.
- Boute, R.N., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., and Houdt, B.V., "An Integrated Production and Inventory Model to Dampen Upstream Demand Variability in the Supply Chain", *European Journal of Operational Research*, Vol. 178, pp. 121-142, 2007.
- Chandra, C. and Grabis, J., "Application of Multi-Steps Forecasting for Restraining the Bullwhip Effect and Improving Inventory Performance under Autoregressive Demand", *European Journal of Operational Research*, Vol. 166., pp. 337-350, 2005.
- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J.K., and Simchi-Levi, D., "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information", *Management Science*, Vol. 46, No. 3, pp. 436-443, 2000a.
- Chen, F., Ryan, J.K., and Simchi-Levi, D., "The Impact of Exponential Smoothing Forecasts on the Bullwhip Effect", *Naval Research Logistics*, Vol. 47, pp.269-286, 2000b.
- Chen, F. and Samroengraja, R., "Order Volatility and Supply Chain Costs", *Operations Research*, Vol. 52, No. 5, pp. 707-722, 2004.
- Cho, M.S. and Chang, T.W., "A Survey on the Operational Studies about Bullwhip Effect in a Supply Chain", *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol. 8, No. 2, pp. 17-28, 2008.
- Clark, A.J. and Scarf, H., "Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem", *Management Science*, Vol. 6, pp. 475-490, 1960.
- Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., and Towill, D.R., "Transfer Function Analysis of Forecasting Induced Bullwhip in Supply Chains", *International Journal of Production Economics*, Vol. 78, pp. 133-144, 2002.
- Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., and Towill, D.R., "Measuring and Avoiding the Bullwhip Effect: A Control Theoretical Approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 147, No. 3, pp. 567-590, 2003.
- Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., and Towill, D.R., "The Impact of Information Enrichment on the Bullwhip Effect in Supply Chains: A Control Engineering Perspective", *European Journal of Operational Research*, Vol. 153, No. 3, pp. 727-750, 2004.
- Disney, S.M. and Towill, D.R., "Vendor Managed Inventory and Bullwhip Reduction in a Two Level Supply Chain", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 6, pp. 625-651, 2003a.
- Disney, S.M. and Towill, D.R., "On the Bullwhip and Inventory Variance Produced by an Ordering Policy", *International Journal of Management Science*, Vol. 31, pp. 157-167, 2003b.
- Gaalman, G. and Disney, S.M., "State Space Investigation of the Bullwhip Problem with ARMA(1,1) Demand Processes", *International Journal of Production Economics*, Vol. 104 No. 2, pp. 327-339, 2006.
- Gilbert, K., "An ARIMA Supply Chain Model", *Management Science*, Vol. 51, No. 2, pp. 305-310, 2005.
- Higuchi, T. and Troutt, M.D., "Dynamic Simulation of the Supply Chain for a Short Life Cycle Product - Lessons from the Tamagotchi Case", *Computers & Operations Research*, Vol. 31, pp. 1097-1114, 2004.
- Hsiao, J.M. and Shieh, C.J., "Evaluating the Value of Information Sharing in a Supply Chain using an ARIMA Model", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 604-609, 2006.
- Jaksic, M. and Rusjan, B., "The effect of replenishment policies on the bullwhip effect: A transfer function approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 184, pp. 946-961, 2008.
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., and Sturrock, D.T., *Simulation With Arena*, Fourth Ed., McGraw-Hill, 2007.
- Kim, J.G., Chatfield, D., Harrison, T.P., and Hayya, J.C., "Quantifying the Bullwhip Effect in a Supply Chain with Stochastic Lead Time", *European Journal of Operational Research*, Vol. 173, pp. 617-636, 2006.
- Lee, H.L., Padmanabhan, V., and Whang, S., "The Bullwhip Effect in Supply Chains", *Sloan Management Review*, Vol. 38, No. 3, pp. 93-102, 1997a.
- Lee, H.L., Padmanabhan, V., and Whang, S., "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect", *Management Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 546-558, 1997b.
- Lee, H.L., Padmanabhan, V., and Whang, S., "Comments on Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effects". *Management Science*, Vol. 50, No. 12, pp. 1887-1893, 2004.

24. Luong, H.T., "Measure of Bullwhip Effect in Supply Chains with Autoregressive Demand Process", *European Journal of Operational Research*, Vol. 180, pp. 1086-1097, 2007.
25. Luong, H.T. and Phien, N.H., "Measure of Bullwhip Effect in Supply Chain: The Case of High Order Autoregressive Demand Process", *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, pp. 197-209, 2007.
26. Metters, R., "Quantifying the Bullwhip Effect in Supply Chains", *Journal of Operations Management*, Vol. 15, pp. 89-100, 1997.
27. Zhang, X., "The Impact of Forecasting Methods on the Bullwhip Effect", *International Journal of Production Economics*, Vol. 88, pp. 15-27, 2004.



조 면 식 (mscho@kgu.ac.kr)

1981 고려대학교 산업공학과 학사
 1983 Wayne State University 산업공학과 석사
 1990 University of Michigan 산업공학과 박사
 1991~현재 경기대학교 산업경영공학과 교수

관심분야: SCM, 생산물류시스템 분석 및 설계, 시뮬레이션