

▣ 연구논문

Beer Distribution Game에서의 최적 재고정책
- Optimal Inventory Policy in Beer Distribution Game -

조 면 식¹
 Cho, Myeonsig
 김 현 수¹
 Kim, Hyunsoo

Abstract

Recently, many studies on the supply chain management have been published due to increasing attention placed on the design and performance analysis of the supply chain as a whole. Using the Beer distribution game introduced in Sterman[1995], we develop a simple order-up-to-R inventory model to minimize sum of the inventory holding cost and shortage cost under probabilistic demand. We show that performance of the model is robust through extensive simulation experiment. Applying the model to serially connected supply chain, we observe that, if the unit shortage cost is relatively high, R value computed independently is an optimal solution.

1. 서론

산업구조 변화 및 경영의 국제화에 따라, 전세계적인 경쟁력 확보를 위해 물류 서비스의 고도화 및 전문화는 필수적이다. 다시 말해 과거에는 제품 혹은 서비스를 저가(低價)로 제공하기 위해 소품종 대량생산하는 원가경쟁을 하였으나, 앞으로는 고객이 원하는 제품/서비스를 적시에 확보하여 원하는 시간에 납품을 하는 시간경쟁을 하게 된다. 즉 다품종 소량의 단납기 공급을 하게 된다. 이와 같은 시간에 기초한 경쟁을 하기 위해서는 소매상, 도매상, 공장, 부품 공급업체와 같은 공급체인(supply chain)내 각 요소들의 국지적인 최적화보다는, 이들을 하나의 시스템으로 간주하여 전체적인 최적화를 도모해야 한다. 이를 위해서는 그림 1에 제시되어 있는 바와 같이 각 요소들로 구성되는 공급체인내에서의 유기적인 정보흐름 및 통합적 관리가 필수적이다.

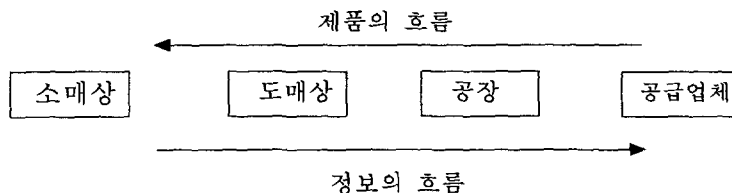


그림 1. 공급체인내의 정보 및 제품의 흐름

¹ 경기대학교 첨단산업공학부 산업공학전공

즉, 공급체인을 통합적으로 관리함으로써 리드타임 감축과 납기내 납품비율 증가 등의 고객 서비스를 향상시킬 수 있으며, 파이프라인 재고 감축, 원자재 구입비용 감소, 생산혼란 감소, 창고비용 및 운송비용 절감, 재고회전을 증가, 안전재고 감축 등의 운영원가를 절감할 수 있다. 한편 경쟁사에 대한 간접 공격효과 및 공급체인상의 공급업자 유통망 team work 강화 등의 효과를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

최근 이들 공급체인 구성요소들에 관한 관리(SCM : supply chain management)의 중요성이 증가함에 따라 많은 수리적 논문과 이들에 관한 review 논문이 (Maloni와 Benton[14], Vidal과 Goetschalckx[20], Beamon[1], Ram et al.[16], 그리고 Erenguc et al.[4] 등) 발표되었을 뿐만 아니라 SCM에 관한 서적도 (Gattorna[7], Tayur et al.[19] 등) 발간되었다

Gattorna[7]는 SCM은 개별적 회사의 기능적 문제가 아니라 최고 경영자가 관심을 기울여야 하는 전략적 요소임을 강조하고 있다. 다시 말해 과거에는 공급체인내의 단일 구성요소에 관한 최적화를 시도하였지만, 앞으로는 모든 구성요소들에 관한 최적화가 절실하다. 이를 위해서는 POS, EDI 등을 이용하여 정보흐름을 효율적으로 수행해야 하며, 또한 VMI(vendor managed inventory), DSD(direct store delivery), CFAR(collaborative forecasting and replenishment), CPFR(collaborative planning, forecasting, and replenishment), TPL(third party logistics) 등을 이용하여, 수송시간 및 공급체인내의 소요시간을 단축해야 하며 또한 공급체인내의 재고를 최소화해야 한다.

공급체인을 조정하는 중요한 메카니즘의 하나는 구성요소들간의 정보흐름이며, 이는 공급체인내에 있는 각 구성요소들의 생산일정계획, 재고관리 및 납품관리에 직접적인 영향을 미친다. 공급체인의 최하위 단계인 소매상에서 발생하는 수요정보에 관한 왜곡으로 인하여, 제품을 생산하는 제조업체가 인지하는 수요는 필요이상으로 증폭되며, 이는 회사에 악영향을 미친다. 예를 들어 제조업체는 무계획적인 구매로 인한 원자재 구입비용 상승, 초과 기계능력으로 인한 추가 제조비용, 비효율적인 이용도 및 잔업시간, 추가적 창고비용, 비효율적인 일정계획 및 긴급발송에 따른 추가 운송비용 등의 손실을 입을 수 있다. 예를 들어, Fuller et al.[6]은 연간 매출규모가 \$3,000억인 식품산업의 공급체인에서, \$750억 내지 \$1,000억의 재고가 부분적으로는 이러한 비효율성 때문에 발생하며, Kurt Salmon Associates[10]은 이런 비효율성으로 인하여 12.5%내지 25%의 추가비용이 발생한다고 보고하였다.

공급자에 대한 주문량의 변동성이 구매자에 의한 판매량의 변동성보다 크며, 이러한 변동성은 상위 구성요소에 접근할수록 증폭되는 현상을 bullwhip 효과 혹은 whiplash효과라 한다. (즉, 상위 구성요소일수록 수요예측 에러가 증폭된다.) 본 논문에서는 Beer distribution game[18]에서 수요가 확률적으로 변동하는 경우에 자재 유지 및 부족비용을 고려한 각 요소별 최적 order-up-to-R 재고정책을 연구한다. 한편 재고정책을 사용할 경우의 주문 만족율(customer satisfaction rate)을 실험적으로 연구한다. 또한 소매상, 도매상, 공장, 부품업체들이 직렬로 연결된 공급체인내에서의 비용 및 주문 만족율을 실험적으로 검증한다.

2. Bullwhip 효과에 관한 연구동향

Bullwhip 효과에 대한 첫 번째 연구는 Forrester[5]에 의해 수행되었다. 그는 제조업자가 감지하는 수요변동폭은 소비자의 수요변동폭보다 훨씬 크고, 제조업자가 감지하는 계절성 역시 소매상이 감지하는 계절성보다 크며, 이런 현상은 공급체인의 각 단계에서 증폭됨을 발견하였다. 이러한 bullwhip 효과는 공급체인내의 정보공유가 어렵고 또한 시스템이 복잡하기 때문에 발생한다고 주장하였다.

Sterman[17]은 네 명의 참가자가 각각 소매상, 도매상, 공장, 부품 공급업체의 역할을 맡아 하위 요소의 주문에 의해서 독립적으로 주문 의사결정을 하는 "Beer distribution game

(Sterman[18])"에 관한 연구에서 bullwhip 효과를 실험적으로 입증하였으며, 이러한 현상은 각 요소들의 체계적인 비합리적 활동 혹은 피드백의 비인지(認知)성에 기인한다고 주장하였다.

Lee et al.[12, 13]은 bullwhip 효과가 발생하는 이유를 수요 신호처리(demand signaling process), 배급게임(rationing game), 주문 묶음(order batching), 가격변동(price variation)으로 분류하였으며, 이들 각각에 관한 수학적 모델과 해결책에 관하여 연구하였다. 한편 Lee et al.[12]은 리드타임이 길고 수요 패턴이 불확실한 경우에는 의사결정자의 합리적인 의사결정에 의해서도 bullwhip 효과가 발생할 수 있다고 주장하였다. 한편 Lee et al.[12]은 수요가 변화함에 따라 시간 t 의 R_t 도 변화해야 하며, 주문비용, 재고 유지비용 및 부족비용을 최소화하기 위한 재고모형을 이용하여 상관계수 값이 양인 경우에는 상위요소로 갈수록 그리고 리드타임이 증가할수록 수요의 변동이 증가함을 증명하였다.

Metter[15]는 수요의 계절성과 수요 예측에러에 의해 bullwhip 효과가 발생되며, 실제적인 사업환경에서 계절적 bullwhip 효과를 제거함으로써 기업의 이익을 10%내지 20% 증가시킬 수 있으며, 한편 수요 예측에러를 감소시킴으로써 기업 이익을 5%내지 10% 증가함을 동적계획법을 이용한 예제들을 통하여 실험적으로 입증하였다. 동적계획법에서 Metter는 공급체인내의 단 한 개의 요소만을 고려대상으로 하였으며 (다시 말해 파이프라인상의 재고를 무시함), 이 요소에서의 생산능력은 유한하며 produce-up-to-R 재고정책을 사용하였다.

Chen et al.[2]은 이동평균법(moving average)과 지수평활법(exponential smoothing)을 이용하여 수요예측을 하는 경우에 발생하는 bullwhip효과에 관하여 연구하였다. 수요가 IID이며 평균이 μ , 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 경우에 근사적인 최적 R_t 값을 다음과 같이 구하였다. $R_t = L\hat{\mu}_t + Z\sqrt{L}\hat{\sigma}_t$. 여기서 $\hat{\mu}_t$ 은 μ 의 예측치, $\hat{\sigma}_t$ 은 σ 의 예측치, L =리드타임 +1, 그리고 Z 는 서비스 수준을 위해 선택된 상수이다 (그러나 Z 값을 어떻게 구할 것인지에 관한 언급은 없다.) 한편 Chen 등은 bullwhip 효과는 부분적으로 향후 수요의 평균과 분산을 예측함에 따라 발생하므로, order-up-to-R 정책에서 R 값을 변화하지 않는다면 bullwhip 효과가 발생하지 않는다고 하였다. 그러나 R 값을 고정함으로써 발생 가능한 재고 유지비용 및 부족비용에 관하여는 연구하지 않았다.

3. 최적 주문정책

Clark와 Scarf[3]는 일련의 네트워크로 구성된 시스템에서 셋업비용이 없고 정기발주정책을 사용할 경우에, order-up-to-R 정책이 최적임을 증명하였다. Lee et al. [12]과 Metter[15]는 R 값을 동적계획법을 이용하여 구하였으나 이를 계산하기는 매우 어렵다. 한편 Lee et al. [12]의 주문처리 방식은 Sterman[18]의 Beer distribution game에서의 주문처리 방식과 상이하며, Metter[15]의 연구는 파이프라인상의 재고를 고려하지 않았으며, Chen et al.[2]는 R 값에 따른 재고 유지비용 및 부족비용에 관한 연구를 수행하지 않았다.

그러므로, 이 절에서는 재고 유지비용, 재고 부족비용, 그리고 파이프라인상의 재고를 고려한 order-up-to-R 재고정책에서의 최적 R 값을 계산하기 위한 공식을 개발한다. 본 연구에서의 수요처리 방식은 다음과 같다. 각 기간 초에 상위요소에 주문한 제품이 도착한 후, 각 기간 초에 발생한 수요를 처리한다. 즉 기간 초에 발생한 수요와 backorder된 양의 합이 기간 초의 재고량보다 많다면 재고 부족비용이 발생하고, 적다면 재고 유지비용이 발생한다. 한편 각 요소는 기간 초에 수요를 처리한 후 order-up-to-R 정책에 의해 상위 요소에 주문을 한다.

기간 초에만 수요가 발생하며, 수요는 평균이 μ , 분산이 σ^2 인 정규분포를 따른다고 가정한다. (Lee와 Billington[11]은 Hewlett-Packard 회사의 Vancouver 사업부에서 대량생산하는 제품의 수요량을 검토한 결과 수요량의 분포는 정규분포를 따른다는 것을 발견하였다.) 주문 후

도착할 때까지의 기간, 즉 리드타임이 τ 이며, 단위당 구매비용이 C , 연간 재고 유지비용을 i , 단위당 부족비용(shortage cost, 부족기간에 독립임)을 π , 그리고 각 기간의 길이를 T 라 한다. 한편 리드타임 기간 동안의 평균수요를 δ 라 한다.

한 요소에서 발생하는 비용은 재고 유지비용, 재고 부족비용, 그리고 주문비용의 합이다. 기간 초에만 수요가 발생하므로 연 평균 재고 유지비용은 다음과 같이 계산된다. (이를 위하여 재고 부족비용은 재고 유지비용에 비해서 매우 크다고 가정하며, 이 가정이 결과에 미치는 민감도 분석을 다음 절에서 수행한다.)

기간 초에만 주문을 하므로, 주문량에 관계없이 리드타임동안 수요가 없다면 주문한 제품이 도착한 직후의 재고량은 R 이다. 그러나 리드타임동안의 수요량이 δ 이므로 주문한 제품이 도착한 직후의 순재고(net inventory)는 $R - \delta$ 이다. 그러므로, 연평균 재고 유지비용은 다음과 같다.

$$\text{연평균 재고 유지비용} = iC(R - \delta) \tag{1}$$

한편 backorder된 양은 다음과 같이 계산된다 $\eta(x, t)$ 가 기간 t 동안의 수요량 x 의 확률밀도함수라면, 각 기간의 종료시점에서 backorder된 양의 평균치는 다음 식으로 표현된다.

$$\int_R^\infty (x - R) \eta(x, \tau) dx \tag{2}$$

그러므로 연평균 backorder양은 다음과 같다.

$$\frac{1}{T} \int_R^\infty (x - R) \eta(x, \tau) dx \tag{3}$$

식 (1)과 (3)으로부터 연평균비용을 다음과 같이 T 와 R 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$K(R, T) = \frac{A+I}{T} + iC(R - \delta) + \frac{\pi}{T} \int_R^\infty (x - R) \eta(x, \tau) dx \tag{4}$$

여기서 A 는 주문 고정비용이며, I 는 매기간에 주문여부를 검토하는데 소요되는 비용이다. 본 연구에서는 T 가 주어졌다는 가정하에 위 식으로부터 최적 R^* 값을 구하기로 한다. (Johnson과 Montgomery[8]는 K^* 를 계산하기 위해서는 여러 개의 T 값을 이용하여 각각 R^* 값을 구한 후, 최적 T^* 를 구하여도 큰 문제가 없다고 주장하였다.) 주어진 T 에 대하여, 식 (4)를 R 에 관하여 미분을 함으로써, R^* 는 다음 식을 만족해야 함을 알 수 있다. 즉,

$$F(R, T) = \int_R^\infty \eta(x, \tau) dx = \frac{iCT}{\pi} \tag{5}$$

위의 식들을 이용하여 간단한 예제를 풀어 보기로 한다. 연평균 수요는 평균이 1200, 분산이 3600인 정규분포를 따르며, 리드타임이 3개월(상위요소에 주문서 도착시간 + 파이프라인상의 지체), 단위당 구매비용이 \$12, 연간 재고 유지비용율이 0.1, (즉, 단위당 연간 재고 유지비용은 \$1.2), 단위당 부족비용이 \$30, 그리고 매월초 order-up-to- R 재고정책을 적용한다. 한편 매월의 수요는 독립적으로 발생한다고 가정한다. 그러므로, 리드타임 기간동안의 수요는 평균

300이며 분산은 900이므로, 식 (5)에서

$$\Phi\left(\frac{R-\mu}{\sigma}\right) = \frac{iCT}{\pi} \tag{6}$$

여기서 $\Phi(u) = \int_u^{\infty} (2\pi)^{-1/2} e^{-x^2/2} dx$ 는 표준 정규분포의 complementary 누적 확률분포함수이다. 식 (6)으로부터

$$\frac{R-300}{30} = 2.7134,$$

즉 R^* 는 $381.4 \approx 381$ 이다.

한편, 식 (4)에서 A 와 J 는 T 가 고정인 경우에 R^* 를 계산하는데 관련이 없으므로 본 연구에서는 제외하기로 한다. 그러므로 총비용은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K(R, T) = iC(R-\delta) + \frac{\pi}{T} \int_R^{\infty} (x-R) \eta(x, \tau) dx \tag{7}$$

여기서 $\eta(x, \tau)$ 의 수요는 정규분포를 따르므로

$$\int_R^{\infty} (x-R) \eta(x, \tau) dx = \sigma\phi\left(\frac{R-\mu}{\sigma}\right) + (\mu-R)\Phi\left(\frac{R-\mu}{\sigma}\right)$$

으로 계산되며,

$$\phi(z) = (2\pi)^{-1/2} e^{-z^2/2}$$

이다. 그러므로 R^* 값 381을 식 (7)에 대입한 결과 연평균 재고 유지비용이 \$97.2, 연간 부족비용이 \$11.45이며, 이들의 합인 총비용은 \$108.65이다.

4. 민감도 분석

앞 절에서 최적 order-up-to-R 값을 계산하기 위해서 단위당 부족비용이 재고 유지비용보다 매우 크다는 가정을 하였으므로, 이 절에서는 앞에서 소개한 예제를 이용하여 이러한 가정이 결과에 미치는 민감도분석을 실시한다. 이를 위하여 고급 시뮬레이션 언어인 ARENA[9]를 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 안정상태하의 결과를 얻기 위하여 각 반복당 충분한 시간의 warm-up을 수행하였으며, 결과치에 관한 95% 신뢰구간을 구하기 위해 20번의 반복을 수행하였다.

표 1은 앞에서 소개된 예제에서 단위당 부족비용을 \$30에서, \$10, \$3.333, \$1.111, \$0.3703으로 변경했을 경우에 해석적인 방법으로 구한 R^* , 연간 재고 유지비용, 연간 재고 부족비용, 그리고 이들의 합인 연간 총비용을 나타내고 있다. 단위당 부족비용이 감소함에 따라 R^* 가 감소하며 총비용이 비선형적으로 감소함을 알 수 있다.

표 1. 단위당 부족비용의 변화에 따른 해석적 R^* 및 비용

단위당 부족비용(\$)	R^*	연간 재고 유지비용	연간 재고 부족비용	연간 총비용
30	381	97.2	11.45	108.65
10	370	84	11.95	95.95
3.333	356	67.2	14.45	81.65
1.111	340	48	16.96	64.96
0.3703	318	21.6	22.49	44.09

표 2는 단위당 부족비용이 \$30인 경우에 관한 시뮬레이션 값들의 95% 신뢰구간을 나타내고 있다. 연간 총비용의 반쪽 구간(half length)의 길이는 총비용의 평균값의 약 1.5%(=1.68/109)이므로, 시뮬레이션의 길이 및 반복 횟수는 안정적인 결과를 얻기에 충분함을 알 수 있다. 한편 부족비용 신뢰구간의 반쪽길이는 재고 유지비용의 반쪽길이보다 큰 것을 알 수 있는데, 이는 단위당 부족비용이 단위당 재고 유지비용보다 크기 때문이다.

표 2. $\pi=30$ 인 경우의 연간 비용 및 주문 만족율

R	재고 유지비용	재고 부족비용	총비용	주문 만족율
376	91.4 ± 0.3	19.6 ± 2.05	111 ± 2.11	0.995
377	92.6 ± 0.3	17.7 ± 1.95	110 ± 2.01	0.995
378	93.8 ± 0.3	16 ± 1.86	110 ± 1.92	0.996
379	95 ± 0.3	14.5 ± 1.78	109 ± 1.83	0.996
380	96.1 ± 0.3	13.1 ± 1.71	109 ± 1.76	0.997
381	97.3 ± 0.3	11.9 ± 1.64	109 ± 1.68	0.997
382	98.5 ± 0.3	10.7 ± 1.57	109 ± 1.61	0.997
383	99.7 ± 0.3	9.67 ± 1.5	109 ± 1.54	0.997
384	101 ± 0.3	8.73 ± 1.43	110 ± 1.48	0.998
385	102 ± 0.299	7.9 ± 1.37	110 ± 1.41	0.998
386	103 ± 0.299	7.16 ± 1.31	110 ± 1.35	0.998

단위당 부족비용이 \$30인 경우에 해석적으로 구한 R^* (381)와 시뮬레이션에서 구한 R^* 가 동일하며, 시뮬레이션에서 R^* 값이 381인 경우에 재고 유지비용과 부족비용의 합인 연 총비용이 \$109이며, 이의 신뢰구간은 해석적으로 구한 총비용 \$108.65를 포함한다. 다시 말해, 본 연구에서 개발된 수리적 모형은 단위당 부족비용이 큰 경우에 R^* 및 총비용을 정확하게 예측한다.

한편 표 3, 4, 5, 그리고 6은 단위당 부족비용이 각각 \$10, \$3.333, \$1.111, \$0.3703인 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 표 7은 단위당 부족비용에 따라 해석적으로 구한 최적 R^* 값과 시뮬레이션에서 구한 최적 R^* 값을 나타내고 있다. (시뮬레이션에서 얻은 95% 신뢰구간이 많은 경우에 겹치므로, 각 R 값에서 얻은 총비용에 대하여 paired-t test를 수행하였다.)

표 3. $\pi=10$ 인 경우의 연간 비용 및 주문 만족율

R	재고 유지비용	재고 부족비용	총비용	주문 만족율
365	78.3 ± 0.301	19 ± 1.25	97.3 ± 1.33	0.986
366	79.5 ± 0.301	17.3 ± 1.17	96.7 ± 1.25	0.987
367	80.7 ± 0.301	15.7 ± 1.11	96.4 ± 1.19	0.988
368	81.8 ± 0.301	14.3 ± 1.04	96.2 ± 1.13	0.989
369	83.0 ± 0.301	13.0 ± 0.988	96.0 ± 1.07	0.990
370	84.2 ± 0.301	11.8 ± 0.938	96.0 ± 1.03	0.991
371	85.4 ± 0.301	10.7 ± 0.89	96.1 ± 0.983	0.992
372	86.6 ± 0.301	9.7 ± 0.843	96.3 ± 0.937	0.992
373	87.8 ± 0.3	8.79 ± 0.798	96.6 ± 0.893	0.993
374	89.0 ± 0.3	7.96 ± 0.756	96.9 ± 0.852	0.994
375	90.2 ± 0.3	7.21 ± 0.718	97.4 ± 0.812	0.994

표 4. $\pi=3.333$ 인 경우의 연간 비용 및 주문 만족율

R	재고 유지비용	재고 부족비용	총비용	주문 만족율
351	61.9 ± 0.299	21.4 ± 0.87	83.3 ± 0.924	0.958
352	63.1 ± 0.299	19.7 ± 0.824	82.8 ± 0.884	0.961
353	64.2 ± 0.299	18.2 ± 0.78	82.4 ± 0.844	0.964
354	65.4 ± 0.3	16.7 ± 0.742	82.1 ± 0.812	0.966
355	66.6 ± 0.3	15.4 ± 0.706	81.9 ± 0.781	0.969
356	67.7 ± 0.3	14.1 ± 0.671	81.8 ± 0.752	0.971
357	68.9 ± 0.3	13.0 ± 0.641	81.8 ± 0.726	0.973
358	70.1 ± 0.3	11.9 ± 0.613	81.9 ± 0.703	0.975
359	71.2 ± 0.3	10.9 ± 0.584	82.1 ± 0.678	0.977
360	72.4 ± 0.3	9.96 ± 0.556	82.4 ± 0.655	0.979
361	73.6 ± 0.301	9.11 ± 0.531	82.7 ± 0.634	0.980

표 5. $\pi=1.111$ 인 경우의 연간 비용 및 주문 만족율

R	재고 유지비용	재고 부족비용	총비용	주문 만족율
335	44.2 ± 0.287	23.5 ± 0.604	67.8 ± 0.63	0.883
336	45.3 ± 0.288	22.0 ± 0.583	67.3 ± 0.615	0.890
337	46.3 ± 0.289	20.5 ± 0.561	66.9 ± 0.598	0.896
338	47.4 ± 0.29	19.1 ± 0.539	66.6 ± 0.58	0.902
339	48.5 ± 0.29	17.8 ± 0.516	66.3 ± 0.561	0.907
340	49.6 ± 0.291	16.6 ± 0.495	66.2 ± 0.545	0.913
341	50.7 ± 0.292	15.4 ± 0.475	66.1 ± 0.531	0.918
342	51.8 ± 0.293	14.3 ± 0.454	66.1 ± 0.518	0.923
343	52.9 ± 0.294	13.3 ± 0.436	66.2 ± 0.507	0.928
344	54.0 ± 0.295	12.4 ± 0.416	66.4 ± 0.494	0.932
345	55.1 ± 0.295	11.4 ± 0.398	66.6 ± 0.483	0.937

표 6. $\pi=0.3703$ 인 경우의 연간 비용 및 주문 만족율

R	재고 유지비용	재고 부족비용	총비용	주문 만족율
310	21.2 ± 0.229	33.6 ± 0.451	54.8 ± 0.416	0.638
311	21.9 ± 0.233	32.0 ± 0.438	54.0 ± 0.408	0.651
312	22.7 ± 0.236	30.5 ± 0.425	53.2 ± 0.4	0.662
313	23.5 ± 0.24	29.0 ± 0.412	52.5 ± 0.393	0.675
314	24.3 ± 0.243	27.5 ± 0.401	51.8 ± 0.386	0.687
315	25.2 ± 0.246	26.1 ± 0.388	51.3 ± 0.38	0.698
316	26.0 ± 0.249	24.8 ± 0.377	50.8 ± 0.374	0.710
317	26.8 ± 0.252	23.5 ± 0.366	50.3 ± 0.369	0.721
318	27.7 ± 0.255	22.3 ± 0.355	50.0 ± 0.365	0.732
319	28.6 ± 0.257	21.1 ± 0.344	49.6 ± 0.361	0.743
320	29.5 ± 0.26	19.9 ± 0.334	49.4 ± 0.357	0.753
321	30.4 ± 0.262	18.8 ± 0.324	49.2 ± 0.353	0.764
322	31.5 ± 0.264	17.8 ± 0.314	49.1 ± 0.349	0.774
323	32.2 ± 0.267	16.8 ± 0.304	49.0 ± 0.346	0.784
324	33.2 ± 0.269	15.8 ± 0.294	49.0 ± 0.343	0.794
325	34.1 ± 0.271	14.9 ± 0.285	49.0 ± 0.341	0.804
326	35.1 ± 0.273	14.0 ± 0.275	49.1 ± 0.338	0.813
327	36.1 ± 0.274	13.2 ± 0.269	49.2 ± 0.336	0.821
328	37.0 ± 0.276	12.4 ± 0.263	49.4 ± 0.334	0.830
329	38.0 ± 0.278	11.6 ± 0.257	49.7 ± 0.332	0.838
330	39.0 ± 0.279	10.9 ± 0.252	50.0 ± 0.328	0.846

표 7. 해석적 방법 및 시뮬레이션에서 구한 R^*

단위당 부족비용(\$)	해석적 R^*	시뮬레이션 R^*
30	381	380, 381, 382 ¹⁾
10	370	369, 370
3.333	356	356, 357
1.111	340	341, 342
0.3703	318	324

1) paired-t test에서 $\alpha=0.05$ 수준에서 귀무가설을 기각할 수 없음

표 3과 4로부터, 해석적으로 구한 R^* 와 시뮬레이션으로부터 구한 R^* 가 일치하며, 한편 총비용의 95% 신뢰구간은 해석적으로 구한 총비용을 포함하고 있다. 다시 말해 시뮬레이션에서 구한 총비용과 해석적 방법으로 구한 총비용이 다르다고 말할 수 없다.

그러나, 단위당 부족비용이 \$1.111인 경우에는 해석적으로 구한 R^* 값이 340인 반면에 시뮬레이션에서 구한 R^* 값은 341로 미미한 차이가 (0.3%) 있다. 또한, 단위당 부족비용이 \$0.3703인 경우에는 해석적인 R^* 값이 318인 반면에 시뮬레이션 구한 R^* 값은 324이다. 단위당 부족비용이 \$3.333인 경우에 비하여 최적 R^* 값의 오차가 커지는 것을 알 수 있다.

즉, 단위당 부족비용이 재고 유지비용보다 매우 크지 않다면, 해석적으로 구한 최적 R^* 값은

실제 최적값보다 약간 과소 평가되는 경향이 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 단위당 월간 재고 유지비용이 $\$0.1(=\$12 \times 0.1 \div 12)$ 이며 단위당 부족비용이 $\$1.111$ 보다 작은 경우에 최적 R 값에 약간의 오차가 발생하고 있다. 그러나 일반적으로 단위당 재고 유지비용에 비하여 단위당 부족비용이 매우 큰 경향이 있으므로, 본 연구에서 개발된 모형을 사용하여 최적 R 값을 계산해도 큰 오차는 없으리라 판단된다.

한편 단위당 부족비용이 감소함에 따라 주문 만족율은, 즉 소비자의 주문 즉시 소비자에게 제품을 배송하는 율은, 점차로 감소함을 알 수 있다. 이는 단위당 부족비용이 감소함에 따라 R 값이 감소하고 그에 따라 재고량이 감소함으로써 주문 만족율이 감소된다.

5. 공급체인 모델

앞 절에서는 공급체인내의 단일 구성요소에 대한 최적 주문정책과 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이 절에서는 그림 1에 표시된 바와 같이 소매상, 도매상, 공장, 공급업체와 같은 4개의 구성요소가 직렬로 연결된 공급체인 모델을 이용하여, 3절에서 개발된 재고모형의 성능에 관한 연구를 수행한다. 이를 위해 소매상에 도착하는 수요는 앞의 예제와 같이 매월 독립적으로 발생하며, 연간 수요는 평균이 1200, 분산이 3600인 정규분포를 따른다고 가정한다. 도매상, 공장, 공급업체에 도착하는 수요량은 각각 하위 요소에서 order-up-to- R 정책의 의해 결정된 주문량이다. 한편, 각 요소에서의 리드타임은 3개월, 단위당 연간 재고 유지비용은 $\$1.2$ 로 동일하다.

본 연구에서는 Sterman[18]의 Beer distribution game에서 사용한 주문절차를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 구성요소 i 의 주문을 상위 요소 $i+1$ 에 전달하는데 1개월이 소요되고, 상위요소 $i+1$ 가 주문을 한 요소 i 까지 제품을 수송하는데 2개월이 소요된다. 즉 파이프라인에는 배달되기까지 1개월 남은 재고와 2개월 남은 재고가 존재한다. 각 기간 초에 파이프라인상의 재고를 주문한 요소에 입고하고, 배달되기까지 2개월 남은 파이프라인상의 재고를 1개월 남은 재고로 변환한다. 입고 후 재고량이 요소 i 에 대한 신규 주문량과 backorder된 양의 합보다 크다면, 신규 주문량과 backorder된 양의 합만큼을 구성요소 $i-1$ 에 배송한다. 이러한 경우에는 구성요소 i 에 발생한 주문 요구를 만족한다고 가정한다. 반면에, 입고 후 재고량이 신규 주문량과 backorder된 양의 합보다 작다면, 구성요소 $i-1$ 에 현 재고량만큼만 배송되고 구성요소 i 에 대한 주문을 만족하지 못한다고 가정한다. 이 경우에는 부족량만큼 backorder가 발생한다. 이후 구성요소 i 는 order-up-to- R 정책에 따라 상위요소 $i+1$ 에 필요한 양을 주문한다.

최하위 단계인 소매상에 도착하는 월 주문량은 앞에서 언급한 바와 같이, 정규분포(100, 17.3)를 따르지만, 도매상, 공장, 공급업체에 도착하는 주문량은 직전 하위요소에서 결정된 주문량이다. 시뮬레이션에서 도매상, 공장, 공급업체에 도착하는 월별 주문량을 각 260,000개씩 수집하여, ARENA에서 제공하는 Input Analyzer를 이용하여 fitting한 결과 도매상, 공장, 공급업체의 주문량은 소매상에 도착하는 주문량과 같이 평균이 100인 정규분포를 따르지만, 표준편차가 17.3, 17.7, 17.8로 약간 증가한다. 즉, 각 요소에서 동일한 재고정책을 사용하였음에도 불구하고, 평균 주문량은 동일하나 상위요소로 갈수록 주문량의 편차가 약간 증가한다. (본 연구에서는 각 구성요소가 동일한 기간마다 체계적인 합리적인 방법으로 주문을 하며, 각 구성요소는 한 개의 업체로 구성되어 있으므로 bullwhip 효과가 미미하나, Sterman[17]에서와 같이 각 요소가 비합리적인 주문을 한다면 bullwhip 효과가 증폭될 것이다.)

표 8은 단위당 부족비용의 변화에 따른 각 구성요소별 재고 유지비용, 재고 부족비용, 총비용, 그리고 주문 만족율을 나타내고 있다. 단위당 부족비용이 큰 경우($\$30$, $\$10$, $\$3.333$)에는 각

요소별 재고 유지비용, 재고 부족비용, 총비용, 그리고 주문 만족율에 큰 변화가 없으나, 단위당 부족비용이 작은 경우(\$1.111, \$0.3703)에는 상위요소로 갈수록 재고 유지비용이 증가하는 반면에 재고 부족비용이 감소하며, 이들의 합인 총비용이 감소한다.

한편, 최상위 요소인 공급업체인 경우에는 단위당 재고 부족비용의 변화에도 불구하고, 앞 절에서 계산된 비용들과 유사하다. 그러나, 단위당 재고비용이 작아질수록 그리고 하위요소로 내려갈수록 앞 절에서 계산된 비용과 매우 상이함을 알 수 있다. (표 7에서 단위당 부족비용이 \$0.3703인 경우에 재고 유지비용은 \$33.2, 재고 부족비용은 \$15.8, 그리고 총비용은 \$49.0이지만, 표 8에서는 소매상의 재고 유지비용은 \$29.3, 재고 부족비용은 \$26.1, 그리고 총비용은 \$55.4이다.)

단위당 재고 부족비용이 작은 경우에는 적은 양을 주문하므로 재고부족 빈도가 상대적으로 높아진다. 그러므로 각 요소별 주문량의 분포가 거의 동일함에도 불구하고, 하위업체일수록 리드타임이 증가되어 재고보충이 늦게 되므로 재고 부족비용이 증가하고 재고 유지비용은 감소한다. (표 8은 단위당 재고부족비용이 작은 경우에, 하위업체일수록 주문 만족율이 작아짐을 보여주고 있다.)

그러나 3절의 재고모델에서는 이러한 현상을 고려하지 않았으므로, 단위당 재고비용이 작은 경우에 각 요소별로 독립적으로 계산된 R 값은 최적치가 아니다. 그러나, 단위당 부족비용이 큰 경우에는 각 요소에서 재고부족이 거의 발생하지 않으므로, 각 요소별로 독립적으로 구한 R 값을 적용하여도 총비용에 큰 영향을 미치지 않는다. 다시 말해, 여러 개의 구성요소가 직렬로 연결된 공급체인에서 모든 요소들이 기간초에 order-up-to- R 재고정책을 사용하고 단위당 부족비용이 상대적으로 크다면, 각 요소에서 독립적으로 계산한 R 값을 사용하여도 무방하다.

표 8. 단위당 재고 부족비용의 변화에 따른 요소별 비용 및 만족율

단위당 재고 부족비용		\$30	\$10	\$3.333	\$1.111	\$0.3703
R^*		381	370	356	341	324
재고 유지비용	소매상	97.3	84.1	67.3	49.3	29.3
	도매상	97.3	84.1	67.3	49.4	29.7
	공장	97.3	84.1	67.3	49.5	30.5
	공급업체	97.3	84.2	67.7	50.7	33.2
재고 부족비용	소매상	12	12.1	15.3	19.1	26.1
	도매상	12	12.1	15.3	18.9	24.6
	공장	12	12.1	15.2	18.2	21.8
	공급업체	11.9	11.8	14.1	15.4	15.8
총비용	소매상	109	96.2	82.6	68.4	55.4
	도매상	109	96.2	82.6	68.3	54.3
	공장	109	96.2	82.5	67.8	52.3
	공급업체	109	96	81.8	66.1	49
주문 만족율	소매상	0.997	0.991	0.969	0.906	0.731
	도매상	0.997	0.991	0.969	0.907	0.738
	공장	0.997	0.991	0.969	0.909	0.753
	공급업체	0.997	0.991	0.971	0.918	0.794

6. 결론

본 연구에서는 bullwhip 효과에 대한 실험에서 많이 사용되는 Beer distribution game에서 제시된 주문처리 방식을 이용하여, 수요가 확률적으로 발생하는 경우에 재고 유지비용과 부족비용의 합을 최소로 하는 각 요소별 order-up-to-R 정책에 관한 연구를 수행하였다. 개발된 모델의 민감도 분석결과 단위당 재고 유지비용에 비하여 단위당 부족비용이 큰 경우에, 본 연구에서 개발된 수리적 모형은 최적 R 값을 정확하게 예측할 뿐만 아니라 재고 유지비용과 부족비용의 합인 총비용도 정확하게 예측함을 통계적으로 입증하였다. 일반적으로 단위당 재고 유지비용에 비하여 단위당 재고 부족비용이 크므로, 개발된 모형을 이용하여 쉽게 최적 R 값을 구할 수 있다.

한편 직렬로 연결된 공급체인내의 요소들에 관한 시뮬레이션을 수행한 결과, 단위당 부족비용이 큰 경우에는 각 요소에서 독립적으로 계산된 R 값을 이용하여 주문정책을 수행하여도 무방함을 알 수 있다. 그러나 단위당 부족비용이 작은 경우에는 각 요소에서 적은 양의 재고를 유지하는 경향이 있고, 이에 따라 하위업체일수록 리드타임이 증가되어 재고부족 빈도가 높아 지므로, 각 요소에서 독립적으로 계산된 R 값을 사용한다면 하위업체에서 발생하는 비용이 증가하고 주문 만족율이 감소함을 실험적으로 입증하였다.

참고문헌

- [1] Beamon, B. M., "Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods", *Int. J. of Production Economics*, 55, 281-294, 1998.
- [2] Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K., and Simchi-Levi, D., "The Bullwhip Effect: Managerial Insights on the Impact of Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain", *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, 417-439, 1999.
- [3] Clark, A. and Scarf, H., "Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem", *Management Science*, 6, 465-490, 1960.
- [4] Erenguc, S. S., Simpson, N. C., and Vakharia, A. J., "Integrated Production/Distribution Planning in Supply Chains: An Invited Review", *European Journal of Operational Research*, 115, 219-236, 1999.
- [5] Forrester, J. W., *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, MA, 1961.
- [6] Fuller, J. B., O'Connor, J., and Rawlinson, R., "Tailored Logistics: The Next Advantages", *Harvard Business Rev.*, May-June, 87-98, 1993.
- [7] Gattorna, J. (ed.), *Strategic Supply Chain Alignment*, Gower Publishing Limited, Hampshire, 1998.
- [8] Johnson, L. A. and Montgomery, D. C., *Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control*, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [9] Kelton, W. D., Sadowski, R. P., and Sadowski, D. A., *Simulation with ARENA*, WCB/MacGraw-Hill, 1998.
- [10] Kurt Salmon Associates, "Efficient Customer Response: Enhancing Customer Value in the Grocery Industry", *The Joint Industry Project on Efficient Customer Response*, Washington D.C., 1993.

- [11] Lee, H. L. and Billington, C., "Material Management in Decentralized Supply Chains", *Operations Research*, 41(5), 835-847, 1993.
- [12] Lee, H. L., Padmanabhan, V., and Whang, S., "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect", *Management Science*, 43(4) 546-558, 1997a.
- [13] Lee, H. L., Padmanabhan, V., and Whang, S., "The Bullwhip Effect in Supply Chains", *Sloan Management Review*, 38(3), 93-102, 1997b.
- [14] Maloni, M. J. and Benton, W. C., "Supply Chain Partnerships: Opportunities for Operations Research", *European Journal of Operational Research*, 101, 419-429, 1997.
- [15] Metters, M., "Quantifying the Bullwhip Effect in Supply Chains", *Journal of Operations Management*, 15, 89-100, 1997.
- [16] Ram, G., Jack, E., Magazine, M. J., and Stephens, P., "A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research", *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, 839-879, 1999.
- [17] Serman, J. D., "Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment", *Management Science*, 35(3), 321-339, 1989.
- [18] Serman, J. D., "The Beer Distribution Games", *Games and Exercises for Operations Management*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 101-111, 1995.
- [19] Tayur, S., Ganeshan, R., and Magazine, M. (ed.), *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [20] Vidal, C. J. and Goetschalckx, M., "Strategic Production-Distribution Models: A Critical Review with Emphasis on Global Chain Models", *European Journal of Operational Research*, 98, 1-18, 1997.