

수요 불확실성과 공급 불확실성의 상호 작용이 공급 사슬 비용에 미치는 효과에 대한 연구*

박상욱** · 김수욱**

Study on the Effects of the Interactions between Demand and Supply Uncertainties on Supply Chain Costs*

Sangwook Park** · Soo-Wook Kim**

■ Abstract ■

This paper models supply chain uncertainties in the dynamic Newsboy problem context. The system consists of one supplier and one retailer who place an order to the supplier every period. Demand uncertainty is modeled as stochastic period demand, and supply uncertainty as the uncertainty in quantities delivered by the supplier. The supplier delivers exactly the amount ordered by the retailer with probability of β and the amount minus K with probability of $(1 - \beta)$. We formulate the problem as a dynamic programming problem and derive the first-order optimality condition. Through a numerical study, we measure the extent to which the cost decrease due to the reduction in supply uncertainty depends on the level of demand uncertainty. One of the most important findings in this paper is that this cost decrease is relatively small if demand uncertainty is kept high, and vice versa. We also backup this numerical result by analyzing the distribution of ending inventory under the supply and demand uncertainties.

Keyword : Supply Uncertainty, Supply Chain Management, Newsboy Problem, Stochastic Demand

논문접수일 : 2005년 2월 15일 논문게재확정일 : 2005년 6월 20일

* 본 연구는 서울대학교 경영대학 경영연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

** 서울대학교 경영대학

1. 서 론

지난 10년 간 생산관리 분야에서 가장 활발하게 연구되고 있는 주제는 공급사슬 관리(Supply Chain Management, SCM)이다. 이러한 현상은 기업간 경쟁이 어느 때 보다는 치열한 현실에서 기업이 경쟁력을 갖기 위해서는 낮은 비용과 높은 서비스 수준을 동시에 달성하여야 한다는 사실에 기인한다고 할 수 있다. 요즘의 경쟁은 기업 대 기업의 경쟁이 아니라 공급사슬 대 공급사슬의 경쟁이라고 말하여진다. 공급사슬의 구성원이 자신의 입장만을 고려하여 내린 의사결정은 더 이상 최적의 의사결정이라고 볼 수 없으며, 공급사슬 참가자들의 상호작용을 고려한 의사결정이 보다 우월한 성과를 낼 수 있다. 공급 사슬 관리와 관련하여 여러 중요한 의사결정 들이 존재하지만 그 중에서 가장 중요하다고 할 수 있는 것은 역시 공급 사슬에 존재하는 불확실성을 관리하는 것이다. 공급 사슬 상에서 제조업자나 중간상들은 크게 두 가지의 불확실성에 직면한다. 즉, 공급의 불확실성과 수요의 불확실성이 그것이다. 공급의 불확실성은 공급 사슬 상의 공급업자가 제조업자나 중간상에게 약속한 조달 시간이나 조달량을 지키지 못하는 것과 관련된 불확실성이며, 수요의 불확실성은 최종 고객의 수요를 정확하게 예측할 수 없다는 것과 관련된 불확실성이다.

수요의 불확실성에 못지 않게 공급의 불확실성도 기업 경영에 중요한 영향을 미치는 예는 많다. 그 중에서도 가장 대표적인 예가 Dell 컴퓨터 조립 공장의 경우이다. Dell은 고객의 주문에 맞춰 컴퓨터를 조립한다. 그러나, 조립을 위한 구성 부품들은 미리 재고로 쌓아두고 있으며 주문이 도착하면 그 구성 부품으로 바로 조립이 시작된다. 부품 재고의 수준을 계획할 때 Dell은 분명 수요의 불확실성을 고려한다. 그러나, 핵심 공급자들이 품질의 문제 때문에 Dell이 원하는 시간에 요구되는 부품을 배달하지 못할 수 있다. Dell은 안전 재고를 계획할 때 이러한 공급의 불확실성도 또한 고려한다. 이는 효율적인 공급 사슬 관리와 공급 사슬 다이내믹스에

영향을 미칠 수 있는 요인의 하나로서 수요 불확실성과 공급 불확실성의 균형을 생각해 보아야 함을 강조한다.

요즘 많은 기업들이 JIT 시스템을 채택하고 있으며, 그들의 성공여부는 적은 양의 재고로 공급사슬 상에 존재하는 불확실성의 부정적 효과를 어떻게 최소화 할 수 있는 가에 달려있다. 현재까지 이와 같은 불확실성에 대한 대부분의 문헌들은 위에서 설명한 두 가지 불확실성 중 하나에 초점을 맞춘 연구들이다. 즉, 하나는 주어진 것이라고 간주하고 다른 하나의 불확실성이 재고관련 비용에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행하였다. 이 논문의 목적은 이 둘 두 불확실성 간의 상호작용에 대해 연구하는 것이다. 즉, 공급의 불확실성으로 인한 재고 관련 비용의 증가와 수요의 불확실성의 크기와 의 상관관계를 밝히고자 한다.

공급의 불확실성을 모형화 하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 하나는 확률적 조달 기간을 사용하는 방법이고 다른 하나는 확률적 공급량을 사용하는 방법이다. 확률적 조달 기간이란 공급업자의 조달 기간이 일정한 확률 분포를 따른 다고 가정하는 것이며, 확률적 공급량이란 공급업자의 조달 기간은 일정하나 주문한 양과 실제로 배달된 양의 차이가 일정한 확률 분포를 따른다고 가정하는 것이다. 이 논문에서는 공급업자가 소매상의 주문에 따라 배달해 주는 실제 배달량과 원래 주문량과의 차이가 확률분포를 따르는 경우를 모형화 하여 분석한다. 즉, 공급업자가 소매상의 주문량을 전량 배달해주는 경우도 있으나, 주문량보다 적게 배달해 줄 가능성이 있는 경우를 모형화 한다. 또한 공급 사슬 상에는 수요의 불확실성도 존재하는데 이러한 수요의 불확실성은 일반적으로 확률 분포를 따르는 수요로 모형화 한다.

본 연구는 공급 및 수요 불확실성 문제를 다기간 Newsboy 문제로 모형화 한다. 소매상은 정규분포를 따르는 수요를 충족시켜야 하며, 각 기간 수요는 동일한 확률분포를 따르며, 또한 상호 독립적으로 분포한다. 소매상은 매 기간마다 공급업자에게 주

문을 하며, 공급업자는 이것을 l 기간이 지난 후에 배달하는데, 이때 공급업자가 배달하는 양이 주문량 전량일 확률이 β 이고 (주문량 $-K$)개일 확률이 $(1-\beta)$ 이다. 구입 단가는 c 이고 배달되는 시점에 지급된다. 논의의 간결성을 위하여 주문에 따른 고정비가 없다고 가정한다(주문 고정비가 존재하는 경우에도 유추적인 결과를 얻을 수 있다는 것을 보일 수 있다). 만약 가지고 있는 재고로 모든 수요를 만족시킬 수 없는 경우에는 다음 기의 주문량에서 충족시킨다(= backordering). 소매상의 재고유지 비용 함수와 재고고갈 비용 함수는 선형이라고 가정한다. 사용되는 모형에서는 할인요소(discounting factor)를 사용하며, 할인된 총 비용(= 무한기간 동안 발생하는 구매 비용, 재고유지 비용, backorder 비용의 합)을 최소화하는 주문정책을 구하고자 한다. 모형 분석에서 구한 최적 주문정책을 사용한다는 가정 하에서 수치분석(numerical study)을 통해 공급 불확실성과 수요 불확실성이 재고 비용에 미치는 개별적 영향뿐 아니라 두 불확실성의 상호 작용이 비용에 미치는 영향을 분석한다. 또한 이러한 분석결과가 공급사슬 관리에 주는 시사점을 설명한다.

이 논문의 가장 중요한 발견 중의 하나는 수요의 불확실성이 매우 높은 경우 공급의 불확실성의 감소에 따른 재고 비용의 감소는 수요의 불확실성이 낮은 경우에 비해 상대적으로 낮다는 사실이다. 마찬가지로 논리로 공급의 불확실성이 매우 높은 경우 수요 불확실성의 감소로 인한 비용의 절감 효과가 공급의 불확실성이 낮은 경우에 비해 상대적으로 낮다는 사실을 유추할 수 있다. 이러한 결과는 중요한 경영상의 의미를 갖는다. 즉, 공급사슬 상의 불확실성을 효과적으로 관리하기 위해서는 두 가지 불확실성 수준이 적절한 균형을 이루어야 한다는 것이다. 다시 말하면 공급의 불확실성을 줄이는 투자를 한다 할지라도 수요의 불확실성이 매우 큰 경우에는 큰 비용 감소 효과를 거두기 어렵다는 것이다. 같은 논리로 추가적인 투자를 통해 수요의 불확실성을 줄인다 하더라도 공급업자의 신뢰도가 낮은 경우에는 공급 사슬 전체의 효율성은 크게 개선

되지 못하는 일종의 불확실성의 병목 현상이 발생한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 공급 사슬 불확실성이 존재하는 경우의 동적 재고 모형에 대한 과거의 연구를 살펴본다. 3장에서는 문제를 동적 계획 문제로 모형화하여 최적 주문 정책을 유도한다. 4장에서는 수치 분석을 통해 수요 및 공급의 불확실성의 상호작용이 공급 사슬 비용에 미치는 영향을 측정하고, 5장에서는 기말 재고량의 불확실성과 총 기대 재고 비용과의 관계에 대한 직관적 분석을 수행하여 4장의 수치 분석 결과를 설명한다. 6장에서는 수치 분석의 결과가 공급 사슬의 불확실성 관리에 주는 시사점을 찾아보며, 7장에서는 본 논문의 결과를 요약하고 본 논문의 결과를 확장할 수 있는 미래 연구에 대해 설명한다.

2. 과거의 연구

수요 측면의 불확실성을 모형화 하는 일반적인 방법은 확률적 고객 수요(stochastic demand)를 사용하는 것이나, 공급측면의 불확실성을 모형화 하는 방법은 크게 두 가지가 있을 수 있다. 공급의 불확실성을 모형화 하는 첫 번째 방법은 공급측면의 불확실성을 공급업자 조달 기간(lead-time)의 불확실성으로 모형화 하는 것이며 여러 논문들이 이러한 접근법을 사용하고 있다. Kaplan[11]은 확률분포를 따르는 조달 기간을 갖는 정기 주문 시스템을 모형화 하였다. 그는 조달 기간은 배달 주기의 배수라고 가정하였다. 두 가지 가정 하에서(즉, 나중에 주문한 것이 먼저 주문한 것보다 일찍 배달될 수 없다는 가정(= no order-crossing)과 조달 기간은 현재 처리 중인 주문의 수나 양에 영향을 받지 않는다는 가정 하에서), 최적 주문정책은 조달 기간이 확정적인 경우의 최적 주문정책과 같이 기본재고 정책의 형태를 갖지만 최적 기본재고(base-stock) 수준에 차이가 있음을 보이고 그 이유를 설명하였다. Ehrhardt[5]는 조달 기간에 대해 Kaplan과 동일한 가정을 하고 있다. 그는 미시적 기본재고 정책이

최적이 되는 조건을 제시하였으며, 무한기간(infinite horizon) 또는 유한기간(finite horizon) 문제 모두에서 주문 고정비가 양의 값을 갖는 경우 (s, S) 정책이 최적 주문정책이라는 것을 증명하였다. Park 등[21]은 조달 기간이 주문 주기보다 작은 경우를 분석하여 Ehrhardt[5]와 같은 결과를 도출한다. Nahmias[20]는 재고가 부족하면 판매기회를 상실하는 경우(lost-sales case)를 가정하고 배달의 불확실성을 분석하고 있다.

두 번째 방법은 공급의 불확실성을 공급량의 불확실성으로 모형화 하는 것이다. 박상욱[1, 2]은 확률적 수요를 갖는 경우 Newsboy 문제를 기본모형으로 하여 공급량의 불확실성을 무한기간 문제로 모형화하고 몇 가지 가정 하에서 최적 주문 정책이 안정적 기본 재고 정책(stationary base-stock policy)임을 증명하였으며 최적 주문량이 만족하여야 하는 최적 조건을 유도하였다. Gullu 등[7]은 공급량의 불확실성을 세 개의 사건으로 나누어 모형화하였다. 즉, 공급업자가 주문량 전량을 공급할 수 있는 경우, 전혀 공급하지 못하는 경우, 부분적으로 충족시키는 경우의 세 가지로 나누고 각각의 경우에 확률을 부여하였다. 확률적 동적 계획법을 사용하여 기본 재고 정책이 최적임을 보였으며, 수요가 기간별로 변화하나 그 값을 미리 알 수 있는 경우(deterministic demand의 경우)를 분석하여 Newsboy 공식 형태의 최적조건을 구하였다.

비록 연구의 직접적인 목적은 아니지만 수요 불확실성과 공급 불확실성의 상호 작용이 공급 사슬 성과에 미치는 영향을 다룬 정성적인 연구는 다수 발견할 수 있다. 수요 불확실성-공급 불확실성 균형의 중요성은 공급 사슬에서의 수요-공급의 균형 및 거래 제품의 특성과의 역학 관계에 의해서 설명할 수 있다. 즉, 만일 완제품 제조업자가 완제품에 대한 고객 수요를 충족시키기에 충분한 원자재 재고를 가지고 있다면 제조업자는 원자재 공급자와의 협상에 있어 어느 정도의 여유를 가질 수 있다. 그러나, 제조업자가 충분한 원자재 재고를 가지고 있지 못하다면 공급자에 의해 좌지우지될 가능성이

대단히 높다. 이는 수요-공급 균형이 구매자-공급자 관계에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 하지만, 이러한 수요-공급 균형의 영향은 거래되는 제품의 특성에 따라 달라질 수 있다. 즉, 표준화된 제품의 경우, 일반적으로 제품 다양성 정도가 낮고[8], 수요가 안정적이며[17], 수요 영역이 넓다[18, 22]. 그래서, 제조업자는 이미 만들어진 완제품을 가지고 수요에 대처할 수 있다. 또한, 시장 거래적 관계 구조가 지배적이기 때문에 구매자-공급자 관계의 강도가 상대적으로 약하다. 그러나, 고객화된 제품의 경우, 제품 다양성 정도가 높고[18, 22], 수요가 불안정하다[17]. 그래서, 제조업자가 완제품을 가지고 수요에 대처하기 보다는 원자재의 형태로 재고를 보유하고 주문을 받는 시점에서 제품 생산을 시작하는 것이 바람직스럽다. 또한, 수요 불확실성에 효과적으로 대처하기 위한 공급 사슬 멤버들 사이의 지원과 협력이 상대적으로 강하게 요구된다 [3, 13, 19, 25]. 따라서 구매자와 공급자간 전략적 파트너십에 의한 계층적 지배 구조가 더욱 강하게 형성될 수 있다[6, 13]. 그러므로, 구매자가 앞에서 언급한 수요-공급 균형으로부터의 혜택을 받기가 상대적으로 어려울 수 있다. 위의 논의는 결국 공급의 불확실성을 최소화하기 위한 구매자 노력의 효과가 수요의 불확실성 수준에 따라 달라질 수 있음을 암시한다. 즉, 수요의 불확실성이 낮을수록 구매자가 여유를 가지고 공급자와의 협상력을 유지하면서 보다 적극적으로 능동적으로 공급의 불확실성을 줄이기 위해 노력할 수 있다는 것이다.

앞에서 설명한 것처럼 공급 사슬에 존재하는 두 가지 불확실성 중 하나에 초점을 맞추어 그것이 재고 관련 비용에 미치는 영향을 계량적으로 분석한 연구와 두 가지 불확실성의 상호 작용을 설명한 정성적 연구는 발견할 수 있으나, 이들 두 가지 불확실성의 상호 작용이 공급 사슬 비용에 미치는 영향을 직접적으로 모형화 하여 분석한 연구는 찾아볼 수 없다. 본 연구는 수요와 공급의 불확실성을 확률적 고객 수요와 공급량의 불확실성으로 각각 모형화 하여, 수요 불확실성과 공급 불확실성의 상호 작

용이 재고 관련 비용에 미치는 영향에 대해 분석하고 이러한 정보가 공급사슬 경영에 던져주는 시사점을 밝히고자 한다.

3. 공급 사슬 불확실성 모형

본 논문에서 사용되는 정의들을 정리해 보면 다음과 같다.

- K = 공급업자가 주문량 전량을 공급하지 못하는 경우 주문량에 미달하는 양
- l = 공급업자의 조달 기간
- a = 할인 요소
- β = 공급업자가 주문량 전량을 공급 해줄 확률
- p = backorder 비용/개*기간
- h = 재고유지 비용/개*기간
- c = 구입단가
- x = 주문할 당시의 재고수준(=보유재고 + 배달 중에 있는 주문량 - backorder)
- z = 당기주문량
- y = $x+z$
- δ = 일 기간 수요를 나타내는 확률변수, 평균이 μ 이고, 표준편차가 σ 인 정규분포를 따른다.

$L(y) = h \int_{-\infty}^y (y-\delta)\phi(\delta) d\delta + p \int_y^{\infty} (\delta-y)\phi(\delta) d\delta$, 기 초재고가 y 일 때 일 기간 총 기대비용. 단, $\phi(\cdot)$ 는 일 기간 수요의 확률 밀도함수.

앞의 정의들을 이용하여 공급의 불확실성이 존재하는 무한기간 문제를 동적계획 문제로 모형화 하여 보자. 논의의 간결성을 위해, 문제의 일반성을 해치지 않고 $l=0$ 이라 가정할 수 있다. $f_t(x_t)$ 를 t 번째 주문량 결정시 재고수준(inventory position)이 x_t 일 때, t 번째 주기부터 발생하는 총 기대비용의 합이라 정의하면 배달량에 불확실성이 존재하는 문제는 동적 계획법을 사용하여 다음과 같이 모형화 할 수 있다. $t=1, 2, \dots$ 에 대해 다음이 성립한다.

DP :

$$f_t(x_t) = \min_{y \geq x_t} \left\{ \begin{array}{l} \beta c(y_t - x_t) + (1 - \beta)c(y_t - x_t - K) \\ + \beta L(y) + (1 - \beta)L(y_t - K) \\ + aE[\beta f_{t+1}(y_t - \delta)] \\ + (1 - \beta)f_{t+1}(y_t - K - \delta) \end{array} \right\} \quad (1)$$

식 (1)의 괄호 안에 있는 첫 두 항목은 t 번째 주기의 구입비용을, 다음 두 항목은 t 번째 주기의 기대 재고유지 비용과 backorder 비용의 합을, 마지막 항목은 $(t+1)$ 번째 주기 이후에 발생하는 총 기대비용의 합을 나타낸다.

박상욱[2]에서 증명한 바와 같이 구입비용 항목들을 재배치하면 무한 기간 문제를 푸는 것은 미시적(일기간) 문제를 푸는 것과 동일해지며, 매 주기마다 최적 주문량은 변하지 않는다(stationary policy). 앞으로의 논의에서는 표현의 간결성을 위해 주기를 나타내는 첨자 t 를 생략한다. 주기 초의 재고 x 가 주어졌을 때 미시적 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

MP :

$$f(x) = \min_{y \geq x} \left\{ \begin{array}{l} c(1 - \alpha)(y - (1 - \beta)K) + \alpha c \mu \\ + \beta L(y) + (1 - \beta)L(y - K) \end{array} \right\} \quad (2)$$

박상욱[2]에서 증명한 바와 같이 최적 주문량 y 는 일차 최적 조건(first-order optimality condition)인 다음 조건을 만족한다.

$$\beta \Phi(z_1^*) + (1 - \beta)\Phi(z_2^*) = \frac{p - (1 - \alpha)c}{p + h}, \quad (3)$$

단, $z_1^* = \frac{y^* - \mu}{\sigma}$ 이고, $z_2^* = \frac{y^* - K - \mu}{\sigma}$.

따라서, 미시적 문제의 최적 주문정책은 기본재고 정책이다. 즉, 만약

- $x < y^*$ 이면, y^* 까지 재고수준을 올리고,
- $x \geq y^*$ 이면, 주문을 하지 않는다.

식 (3)은 closed-form이 아니므로 역함수를 사용하여 바로 최적해를 구할 수 없기 때문에 수치 탐색법(numerical search)을 사용하여 해를 구하여야 한다. 식 (3)의 좌변이 y 값이 증가함에 따라 단조

증가하기 때문에 최적해는 유일하며 수치 탐색법을 사용하여 그 해를 쉽게 구할 수 있다.

이러한 결과는 보다 일반적 문제에 대해서도 유효하다는 것을 보일 수 있다. 즉, $l \geq 1$ 인 경우, 실제 배달량이 3개 이상의 서로 다른 값을 갖는 경우에도 동일한 결과를 유도할 수 있으며, 주문 고정비가 있는 경우에도 (s, S) 정책이 최적 주문 정책임을 증명할 수 있다.

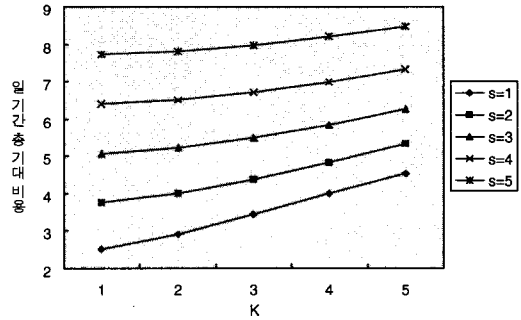
4. 수치 분석

본 절에서는 수요와 공급의 불확실성의 상호작용이 재고비용에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치 분석을 수행한다. 이러한 목적을 위해 8개의 시스템 계수들을 다음과 같이 변화시켜 300개의 서로 다른 계수 집합을 구성하였다.

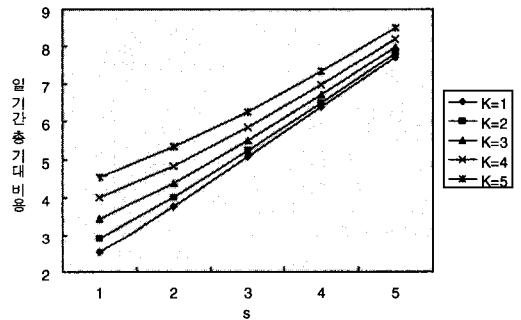
- $l=0$,
- $\alpha=0.9$,
- $\mu=10$,
- $\sigma=1, 2, 3, 4, 5$,
- $p=3, 4, 5$,
- $h=1$,
- $c=1, 3, 5, 7$,
- $K=1, 2, 3, 4, 5$,
- $\beta=0.5$

총 300개의 문제에 대해 3장에서 구한 최적조건을 만족하는 최적 주문량과 일기간 총 기대비용을 계산하였다. 모형의 가정을 설명할 때 밝힌 바와 같이 일기간 수요는 평균이 μ 이고 표준편차가 σ 인 정규분포를 따른다고 가정하였으며 각 문제의 최적 주문정책은 최적 조건인 식 (3)을 만족하는 y 의 값을 수치 탐색법을 사용하여 찾아냄으로써 신속하게 구할 수 있었다. 일기간 총 기대비용은 식 (2)에 있는 총 비용함수를 수치적으로 평가함으로써(numerical evaluation) 그 값을 계산하였다. 수행된 수치분석의 결과 중 σ 와 K 의 변화에 따른 일 기간

총 기대비용은 p 와 c 의 12개 조합 각각에 대해 <별첨 1>에 정리되어 있다.



[그림 1] 공급 불확실성(K)에 따른 비용의 증가



[그림 2] 수요 불확실성(σ)에 따른 비용의 증가

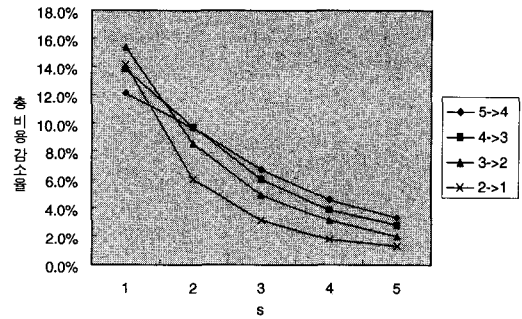
[그림 1]과 [그림 2]는 ($p=3, c=1$)인 경우 K 와 σ 의 변화에 따른 일 기간 총 기대 비용의 변화를 나타내고 있다. 두 그림에 나타나 있는 비용의 변화 패턴은 모든 12개의 p 와 c 의 조합에서 동일하게 관찰되었다. 이들 그림을 관찰하면 수요 불확실성의 크기를 나타내는 σ 와 공급 불확실성의 크기를 나타내는 K 의 값이 증가함에 따라 총비용이 증가함을 관찰할 수 있다. 그러나 어떤 형태이든 간에 불확실성에는 항상 비용이 따르는 것이기 때문에 이와 같은 결과는 누구나 쉽게 예상할 수 있으며 새로운 것이 아니다. 우리가 관심이 있는 것은 수요와 공급의 불확실성의 상호작용이 일 기간 총 기대비용에 어떻게 영향을 주는가 이다.

($p=3, c=1$)인 경우에 대해 공급 불확실성의 감소에 따른 비용 감소율은 <표 1>에 정리되어 있

다.1) <표 1>에 있는 값들은 다른 시스템 계수들의 값은 고정되어 있고 K 의 값이 1단위 줄어들었을 때(공급의 불확실성이 한 단위 줄어들었을 때) 비용의 감소율을 나타낸다. <표 1>을 관찰해 보면 수요의 불확실성이 증가함에 따라 공급의 불확실성 감소로 인한 비용의 증가가 오히려 작아진다는 것을 알 수 있다. 즉, σ 가 1, 2, 3, 4, 5로 증가함에 따라 K 가 한 단위 줄어들는데 따른 비용 감소율이 작아지는 것을 관찰할 수 있다. σ 가 1인 경우 K 가 5에서 4로 감소하는 경우 비용 감소율은 12.1%이나 σ 가 2인 경우 그 감소율은 9.6%이며 σ 가 3, 4, 5로 증가함에 따라 비용 감소율은 각각 6.7, 4.6, 3.3%로 계속 줄어든다. K 가 4에서 3으로, 3에서 2로, 2에서 1로 감소되는 경우에도 같은 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 단지 $p=3, c=1$ 인 경우에서만 관찰된 것이 아니라 모든 12개의 p 와 c 의 조합에 대해서 똑 같이 관찰되었기 때문에 일반적으로 성립한다고 말할 수 있다. [그림 3]은 ($p=3, c=1$)인 경우 수요 불확실성(σ)의 크기가 K 값의 감소에 따른 비용 감소율에 어떤 영향을 주는지를 도시화 하고 있다. 이러한 결과는 공급 사슬의 불확실성 관리와 관련하여 매우 중요한 시사점을 던져줄 수 있다. 다음 절에서는 이러한 수치 분석의 결과가 공급 사슬 관리와 관련하여 갖는 중요 시사점들을 살펴보도록 하자.

<표 1> 공급 불확실성 감소에 따른 총비용 감소율 ($p=3, c=1$)

K	$\sigma=1$	2	3	4	5
5 → 4	12.1%	9.6%	6.7%	4.6%	3.3%
4 → 3	13.8%	9.7%	6.0%	3.9%	2.8%
3 → 2	15.4%	8.5%	4.9%	3.1%	2.0%
2 → 1	14.1%	6.0%	3.1%	1.8%	1.3%



[그림 3] 수요 불확실성이 공급 불확실성 감소에 따른 총비용 감소율에 미치는 영향($p=3, c=1$ 인 경우)

5. 수요와 공급 불확실성의 상호 작용의 이해

앞 절의 수치 분석 결과를 보면 수요와 공급의 불확실성 중 하나가 매우 높은 경우 다른 하나의 불확실성을 줄인다 해도 총 비용의 감소 효과가 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 이러한 흥미로운 발견은 기말 재고량의 불확실성과 총 기대 재고 비용의 관계를 분석해 봄으로써도 직관적으로 설명될 수 있다.

표현의 간결성을 위해 할인이 없다고 가정하는 경우(즉, $\alpha=1$), 3장의 일 기간 총 기대 재고 비용은 확률 분포를 따르는 기말 재고의 함수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h \int_0^{\infty} \delta \phi(\delta) d\delta + p \int_{-\infty}^0 -\delta \phi(\delta) d\delta \quad (4)$$

단, $\phi(\cdot)$ 는 기말 재고의 확률 밀도 함수를 나타낸다. 식 (4)에 의하면 기말 재고의 평균이 일정한 경우 기말 재고의 분산이 커짐에 따라 총 재고 비용이 증가함을 알 수 있다. 예를 들어 기말 재고가 정규 분포를 따르는 경우 식 (4)은 다음과 같이 변환시킬 수 있다.

$$\sigma_{EI} \left(h \int_0^{\infty} \delta \phi^s(\delta) d\delta + p \int_{-\infty}^0 -\delta \phi^s(\delta) d\delta \right) \quad (5)$$

1) 식 (5)에 있는 총 기대비용의 계산 시 $\alpha \mu$ 는 상수로 변하지 않기 때문에 포함하지 않았다

〈표 2〉 공급의 불확실성 감소에 따른 기말 재고의 불확실성의 감소율

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	1-(5)/(3)	1-√(5)/√(3)
$Var(X)$	$Var(Y)$	$Var(X) + Var(Y)$	$Var(Y)/2$	$Var(X) + Var(Y)/2$	분산의 감소율	표준 편차의 감소율
6	2	8	1	7	0.1250	0.0646
5	2	7	1	6	0.1429	0.0742
4	2	6	1	5	0.1667	0.0871
3	2	5	1	4	0.2000	0.1056
2	2	4	1	3	0.2500	0.1340
1	2	3	1	2	0.3333	0.1835

단, $\phi^*(.)$ 는 표준 정규 분포의 확률 밀도 함수를, σ_{ER} 는 기말 재고의 표준 편차를 나타낸다. 식 (5)을 보면 총 재고 비용이 σ_{ER} 에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 기말 재고가 정규 분포와 다른 분포를 따르는 경우에도 유사한 총 재고 비용과 기말 재고의 불확실성과의 관계가 존재할 것이라는 것을 예상할 수 있다.

기말 재고의 분산에 대해 살펴보자. t 기 초에 주문이 도착한 직후의 재고량을 Y 라 하고, t 기의 수요를 X 라 정의하자. Y 와 X 의 정의에 의하여 t 기 말의 재고량은 $(Y-X)$ 이 되며, 기말 재고량의 분산은 $Var(Y-X)$ 이다. 이 논문에서는 Y 와 X 가 상호 독립이라고 가정하고 있으므로 분산의 성질에 의해 다음이 성립한다.

$$Var(T-X) = Var(Y) + Var(X) \quad (6)$$

〈표 2〉는 수요의 불확실성 수준인 $Var(X)$ 의 주어진 값에 대해 공급의 불확실성을 나타내는 $Var(Y)$ 가 반으로 줄어들 경우 기말 재고의 불확실성의 감소율을 예시하고 있다. 〈표 2〉를 살펴 보면 $Var(X)$ 가 작아짐에 따라 $Var(Y)$ 의 감소로 인한 기말 재고의 분산과 표준 편차의 감소율이 커짐을 알 수 있다.

식 (4)와 식 (5)에 나타난 기말 재고의 불확실성과 총 기대 재고 비용의 관계와 〈표 2〉에서 관찰된 수요/공급의 불확실성과 기말 재고의 불확실성의 관계를 종합하면, 수요의 불확실성이 줄어들

에 따라 공급 불확실성의 감소에 의한 총 재고 비용의 감소율이 더 커진다는 것을 알 수 있다. 물론 이러한 논리는 수요의 불확실성을 기준으로 전개되어도 동일하게 성립할 것이라는 것을 알 수 있다. 즉, 공급의 불확실성이 줄어들에 따라 수요 불확실성의 감소에 의한 총 재고 비용의 감소율이 더 커진다는 것을 알 수 있다.

6. 수요-공급 불확실성의 상호 작용과 불확실성 관리

기업은 공급 사슬 비용을 증가시키는 불확실성을 줄이기 위해 노력을 해야 한다. 기업은 수요 예측 기법의 정교화, 추가적 시장 조사, 전문가 의견의 수렴, 유통 시스템의 개선 등을 통해 수요의 불확실성을 감소시킬 수 있으며, 공급업자와의 통합된 정보 시스템 구축, 실시간 정보 교환 및 공유, 엄격한 공급업자 선정 지침의 도입 등을 통해 공급의 불확실성을 감소시킬 수도 있다. 불확실성의 효과적 관리와 관련하여 기업이 내려야 하는 첫 번째 의사결정은 공급 사슬의 두 가지 불확실성 중 어느 것을 우선적으로 줄여야 하는가 이다. 즉, 수요와 공급의 불확실성 중 어느 것을 우선적으로 줄이기 위해 투자를 해야 하는가를 결정하여야 한다. 본 논문의 수치 분석 결과는 공급 사슬의 불확실성을 줄이려는 기업의 노력, 즉, 위의 첫 번째 의사결정 문제를 해결하는데 중요한 시사점을 던져 준다. 즉, 기

업이 직면한 수요의 불확실성이 크다면 공급의 불확실성을 줄이기 위해 많은 투자를 하여도 효과적인 비용 감소를 달성할 수 없다는 것이다. 따라서 기업이 재고관련 비용을 보다 효과적으로 줄이기 위해서는 공급 불확실성을 줄이는 노력뿐 아니라 수요의 불확실성을 줄이려는 노력을 동시에 실행하여 두 가지 불확실성의 적절한 균형을 추구하여야 한다는 것이다.

이러한 수요-공급 불확실성의 균형을 추구해야 한다는 사실은 공급 사슬의 불확실성 관리와 관련된 경영 의사 결정에도 실질적인 도움을 줄 수 있다. 공급업자의 선정이라는 의사 결정의 예를 들어 보자. 한 기업이 직면하고 있는 수요의 불확실성이 큰 경우에는 공급 불확실성을 줄이기 위해 많은 투자를 하여도 얻을 수 있는 이득이 상대적으로 작기 때문에 수요의 불확실성을 합리적인 수준으로 낮추기 전까지는 공급업자의 선정에 있어서 원가 경쟁력, 품질 등과 같은 다른 선정 기준에 비해 공급업자의 신뢰도를 나타내는 공급 불확실성이 갖는 중요도가 낮아질 수 있다. 따라서 위와 같이 수요 불확실성이 공급 불확실성에 비해 상대적으로 높은 경우 불확실성의 효과적 관리를 위해서는 수요의 불확실성을 어떻게 적절한 수준으로 낮출 수 있는지가 중요한 문제로 대두될 수 있다. 이러한 수요의 불확실성을 줄이기 위한 하나의 방법으로 공급사슬 다이내믹스에 대한 정보기술의 영향을 분석하고 또한 공급사슬 다이내믹스에 대한 정보기술의 이러한 영향이 수요의 불확실성에 어떻게 영향을 미치는가를 생각해 볼 필요가 있다. 첨단 정보기술의 활용에 의한 적시 정보 공유는 흔히 “채적 효과”[4, 15, 16]라 불리는 공급자와 구매자 사이의 수요 정보 왜곡을 줄일 수 있다. 이러한 수요 변동성 감소는 정확한 예측을 가능하게 하며, 이는 목표 원자재 수준의 감소로 이어질 수 있다. 이처럼 목표 원자재 수준을 낮춤으로써 원자재 재고 수준을 줄일 수 있고 결과적으로 전체 공급 사슬의 재고 수준을 줄일 수 있게 된다. 이러한 논리는 정보 공유가 과도한 재고 문제를 상당 부분 해결할 수 있다는 기존의 연구

논문[14-16]에 의해 그 타당성이 확인된다.

앞의 논리에 따르면 공급 불확실성의 수준이 높으면 수요 불확실성을 줄이려는 노력이 효과적이지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 기업은 공급 불확실성을 줄이기 위한 노력도 병행하여야 한다. 첨단 정보 기술의 활용은 또한 구매자로 하여금 전략적 공급선의 다변화를 통해 공급자들에 대한 협상력을 높임으로써 공급의 불확실성을 줄일 수 있는 하나의 방법이 될 수 있다. 즉, 핵심 공급자들에 의해 지배되고 있는 구매자는 기존의 핵심 공급자들로부터 다수의 잠재적 공급자들로의 과감한 거래관계 전환을 고려하거나 또는 실제로 몇몇 업무에 대해 시범적으로 공급사슬 파트너를 바꾸어 보는 것을 생각해 볼 수 있다. 그러나, 구매자가 전략적 공급선 다변화를 통해 그러한 견제적 관계의 효과를 성공적으로 구체화시키기 위해서는 무엇보다도 기존의 핵심 공급자들이 구매자의 공급선 다변화 능력을 인정하고 그러한 능력에 대해 위기의식을 가지도록 만들어야 한다. 다시 말해, 만일 구매자와 공급자 양쪽이 거래관계를 유지하기 위해 이미 상당한 양의 거래특유자산을 투입했을 경우 그 자산은 특정 거래관계 밖에서는 아무런 가치가 없는 매몰비용이 될 가능성이 상당히 높기 때문에 그러한 거래특유자산의 부담으로 인해 구매자가 공급선을 바꿀 가능성이 없다고 핵심 공급자가 판단하게 되면, 구매자는 공급선 다변화를 한다고 하더라도 핵심 공급자로부터 협상력을 효과적으로 빼앗아 오기가 어렵다.

그렇다면 어떻게 구매자가 핵심 공급자들로 하여금 공급선 다변화로 인한 위기를 느끼게 만들 수 있을 것인가? 정보 기술이 이러한 공급선 다변화의 효과를 실질적으로 구체화시키는 메커니즘으로서의 역할을 할 수도 있다. 즉, 거래 비용 이론의 관점에서 볼 때, 정보기술 및 조직간 정보 시스템의 활용은 앞에서 언급했던 특정 공급 사슬 파트너와의 거래를 위해 투자된 위치적, 물리적, 인적 특유자산에 대한 의존도를 감소시키고 또한 가격과 제품 특성에 대한 정보 획득 비용을 줄일 수 있다. 이러한 특

유 자산에 대한 의존도 감소는 특정 공급자와의 거래를 위해 투입되는 매물비용과 공급선을 바꾸기 위한 전환 비용을 줄일 수 있기 때문에 구매자가 고려할 수 있는 잠재적 공급자 수의 증가로 이어질 수 있으며, 따라서 선택 가능한 공급자 대안이 많아지기 때문에 구매자의 협상력은 증가할 수 있다. 이러한 구매자의 협상력 증가는 공급의 불확실성을 줄이기 위한 공급자의 적극적인 노력을 끌어낼 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 공급사슬의 불확실성을 수요와 공급의 불확실성 두 가지로 모형화 하여 두 가지 불확실성의 상호작용의 특성을 모형화 하였다. 공급의 불확실성은 배달량의 불확실성으로 단순화하여 모형화 하였고 수요의 불확실성은 확률 분포를 따르는 수요를 가정하여 모형화 하였다. 이런 단순화된 모형 구성은 문제의 본질을 왜곡시켰다고 보기보다는 오히려 공급사슬의 불확실성의 상호 작용이 공급 사슬 비용에 미치는 영향을 명확하게 표현해 주고 있을 뿐 아니라 주요 시스템 구성 요소들 간의 상호 관계를 이해하는데 큰 도움을 줄 수 있다. 논문의 주요 결과를 요약하고 이러한 결과가 공급의 불확실성과 관련된 경영 의사 결정에 대해 갖는 시사점과 본 논문의 미래 확장 가능성을 설명함으로써 이 글을 맺고자 한다.

본 논문은 다기간 Newsboy 모형을 기본모형으로 하여 공급의 불확실성을 공급량의 불확실성으로 수요의 불확실성은 확률적 수요로 모형화하고 최적 주문정책을 도출하였으며 Newsboy 모형과 유사한 최적조건을 만족하는 최적 주문량은 수치 탐색법을 사용하여 쉽게 구할 수 있다는 것을 보였다. 수요와 공급의 불확실성의 상호작용이 재고 비용 증가율(감소율)에 미치는 영향을 분석하기 위해 300개의 시스템 계수 집합에 대해 수치분석을 수행하였다. 수치분석 결과를 보면 누구나 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 수요(공급)의 불확실성이 증가함에 따라 총 기대 비용이 증가함을 알 수 있었다. 본 논문의

가장 중요한 발견은 모든 12개의 p 와 c 의 조합에 대해 σ 로 표현된 수요의 불확실성이 증가함에 따라 공급의 불확실성 감소에 따른 재고 비용의 감소 효과가 줄어든다는 것이다. 이러한 수요/공급의 불확실성과 총 기대 재고 비용의 관계는 기말 재고의 불확실성과 총 기대 재고 비용의 관계를 분석함으로써 설명이 가능하다. 즉, 기말 재고의 불확실성이 감소하면 총 재고 비용이 감소한다는 사실과 수요의 불확실성이 감소함에 따라 공급의 불확실성의 감소에 의한 기말 재고의 분산이나 표준 편차의 감소율이 증가된다는 사실을 결합함으로써 수치 분석의 결과를 직관적으로 설명하는 것이 가능하다.

이러한 불확실성의 상호 작용에 대한 수치 분석의 결과는 공급량의 불확실성을 줄이려는 기업의 노력에 큰 시사점을 던져 준다. 즉, 기업이 직면한 수요의 불확실성이 큰 경우, 기업이 재고 관련 비용을 효과적으로 줄이기 위해서는 공급의 불확실성을 줄이기 위한 노력만으로는 부족하며 수요의 불확실성을 줄이려는 노력을 동시에 실행하여야 한다는 것이다. 즉, 유통시스템의 개선, 추가적 시장조사, 정확도가 높은 수요예측기법의 사용 등을 통해 수요의 불확실성을 낮은 수준에서 유지해야만 공급 불확실성 감소를 통한 의미 있는 비용감소를 달성할 수 있을 것이다. 마찬가지로 공급의 불확실성이 매우 높은 경우 수요의 불확실성을 줄이기 위한 투자는 기대하는 것만큼의 충분한 비용 절감 효과를 기대할 수 없으므로 기업은 공급의 불확실성을 합리적인 수준으로 낮추기 위해 노력하여야 한다. 발달된 정보 기술을 활용하여 공급선 다양화를 달성함으로써 공급자에 대한 협상력을 높이는 방안도 공급의 불확실성을 줄이기 위한 좋은 대안이 될 수 있다.

물론 위에서 언급된 공급 및 수요 불확실성의 개선 방안들이 모두 똑 같은 효과를 가져다 주는 것은 아닐 것이다. 따라서, 위의 논거는 다양한 공급 및 수요 불확실성 개선 방안들에 대한 분석 필요성, 그리고 각 개선 방안들에 대한 활용 비중의 변화에 따라 총비용 최소화 관점에서 보다 구체적이고 바람직한 제안들을 얻을 수 있는 가능성을 함께 제시

해 준다. 그러므로 시스템 다이내믹스와 같은 시뮬레이션 기법을 통해 다양한 공급 및 수요 불확실성의 개선 방안을 포함한 보다 완벽하고 구체적인 공급 불확실성-수요 불확실성 균형 모형을 구축할 필요가 있다. 이러한 시뮬레이션 모형의 분석을 통해 각 개선 방안들의 개별적인 작용 및 각 개선 방안들을 반영하는 매개 변수들 사이의 상호작용에 따라 총비용과 같은 핵심 변수들의 시간의 흐름에 따른 행태적 반응을 살펴보는 것은 실무적으로 상당한 의미가 있다고 판단된다. 이는 향후 연구에서 다루어질 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 박상욱, “공급 불확실성 하에서의 다기간 Newsboy 문제의 최적 주문정책에 대한 연구”, 『경영논집』, 제32권, 제3호(1998), pp.60-68.
- [2] 박상욱, “공급업자의 불확실성이 재고관리 비용에 미치는 효과에 관한 연구”, 『한국경영과학회지』, 제26권, 제3호(2001), pp.105-117.
- [3] Anderson, E. and H. Gatignon, “Modes of Foreign Entry : A Transaction Cost Analysis and Propositions,” *Journal of International Business Studies*, Vol.17(1986), pp. 1-26.
- [4] Christopher, M., *Logistics and Supply Chain Management*, Burr Ridge, IL : Financial Times, 1994.
- [5] Ehrhardt, R., “(s, S) Policies for a Dynamic Inventory Model with Stochastic Lead Times,” *Operations Research*, Vol.32(1984), pp.121-132.
- [6] Eisenhardt, K.M., “Control Organizational and Economic Approaches,” *Management Science*, Vol.31(February, 1985), pp.134-149.
- [7] Gullu, R., E. Ebru, and N. Erkip, “Analysis of an Inventory System under Supply Uncertainty,” *International Journal of Production Economics*, Vol.59(1999), pp.377-385.
- [8] Hambrick, D.C., “An Empirical Typology of Mature Industrial-Product Environments,” *Academy of Management Journal*, Vol.26 (1983), pp.213-230.
- [9] Jönsson, H. and E.A. Silver, “Analysis of a Two-echelon Inventory Control System with Complete Redistribution,” *Management Science*, Vol.33(1987), pp.215-227.
- [10] Jönsson, H. and E.A. Silver, “Stock Allocation among a Central Warehouse and Identical Regional Warehouse in a Particular Push Inventory Control System,” *International Journal of Production Research*, Vol. 25(1987), pp.191-205.
- [11] Kaplan, R.S., “A Dynamic Inventory Model with Stochastic Lead Times,” *Management Science*, Vol.16(1970), pp.491-507.
- [12] Kumar, A., L.B. Schwarz, and J.E. Ward, “Risk-Pooling along a Fixed Delivery Route Using a Dynamic Inventory-Allocation policy,” *Management Science*, Vol.41(1995), pp.344-362.
- [13] Lassar, W.M. and J.L. Kerr, “Strategy and Control in Supplier-Distributor Relationships : An Agency Perspective,” *Strategic Management Journal*, Vol.17(1996), pp.613-632.
- [14] Lee, H.L., K.C. So, and C.S. Tang, “The Value of Information Sharing in a Two-Level Supply Chain,” *Management Science*, Vol.46, No.5(2000), pp.626-643.
- [15] Lee, H.L., V. Padmanabhan and S. Whang, “The Bullwhip Effect in Supply Chains,” *Sloan Management Review*, Spring, (1997a), pp.93-102.
- [16] Lee, H.L., V. Padmanabhan, and S. Whang, “Information Distortion in a Supply Chain :

- The Bullwhip Effect," *Management Science*, Vol.43, No.4(1997b), pp.546-558.
- [17] Miller, D., "Relating Porter's Business Strategies to Environment and Structure: Analysis and Performance Implications," *Academy of Management Journal*, Vol.31 (1988), pp.280-308.
- [18] Miller, D., "The Structural and Environmental Correlates of Business Strategy," *Strategic Management Journal*, Vol.8(1987), pp.55-76.
- [19] Miller, D. and P.H. Friesen, "Porter's(1980) Generic Strategies : An Empirical Examination with American Data," *Organization Studies*, Vol.7(1986), pp.37-55.
- [20] Nahmias, S., "Simple Approximation for a Variety of Dynamic Leadtime Lost-Sales Inventory Models," *Operations Research*, Vol.27(1979), pp.904-924.
- [21] Park, Sangwook, L.B. Schwarz, and J.E. Ward, "A Single-Retailer Periodic-Review System with Stochastic Lead-times," Working Paper, 1996.
- [22] Porter, M.E., *Competitive Strategy*, New York, NY : The Free Press, 1980.
- [23] Veinott, A.F., "On the Optimality of (s,S) Inventory Policies : New Conditions and a New Proof," *SIAM J. Appl. Math.*, Vol.14 (1966), pp.1067-1083.
- [24] Veinott, A.F., "Optimal Policy for a Multi-Product, Dynamic Non-Stationary Inventory Problem," *Management Science*, Vol. 12(1965), pp.206-222.
- [25] Ward, P.T., J. Deborah, G. Bickford, and K. Leong, "Configurations of Manufacturing Strategy, Business Strategy, Environment and Structure," *Journal of Management*, Vol.22, No.4(1996), pp.597-626.

〈별첨 1〉 일 기간 총 기대비용

(1) $p=3, c=1$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	2.5	3.75	5.06	6.38	7.71
2	2.91	3.99	5.22	6.5	7.81
3	3.44	4.36	5.49	6.71	7.97
4	3.99	4.83	5.84	6.98	8.2
5	4.54	5.34	6.26	7.32	8.48

(2) $p=4, c=1$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	2.66	4.05	5.5	6.97	8.44
2	3.1	4.31	5.68	7.1	8.55
3	3.64	4.71	5.97	7.33	8.73
4	4.19	5.2	6.35	7.63	8.98
5	4.74	5.73	6.8	8	9.29

(3) $p=5, c=1$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	2.78	4.28	5.84	7.42	9
2	3.24	4.56	6.04	7.57	9.12
3	3.78	4.98	6.34	7.8	9.31
4	4.33	5.48	6.74	8.12	9.58
5	4.88	6.01	7.21	8.51	9.91

(4) $p=3, c=3$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	4.61	5.97	7.38	8.8	10.23
2	5.08	6.23	7.56	8.94	10.34
3	5.69	6.64	7.84	9.16	10.52
4	6.34	7.16	8.23	9.46	10.76
5	6.99	7.76	8.7	9.83	11.07

(5) $p=4, c=3$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	4.82	6.34	7.93	9.54	11.15
2	5.32	6.63	8.13	9.69	11.27
3	5.95	7.08	8.45	9.93	11.47
4	6.6	7.64	8.88	10.27	11.74
5	7.25	8.25	9.38	10.68	12.08

(6) $p=5, c=3$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	4.97	6.63	8.36	10.1	11.85
2	5.5	6.94	8.57	10.26	11.98
3	6.13	7.41	8.91	10.53	12.19
4	6.78	7.99	9.36	10.88	12.49
5	7.43	8.62	9.9	11.32	12.86

(7) $p=3, c=5$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	6.7	8.13	9.61	11.11	12.62
2	7.2	8.4	9.8	11.26	12.73
3	7.89	8.84	10.11	11.49	12.92
4	8.64	9.41	10.52	11.81	13.18
5	9.39	10.07	11.03	12.21	13.51

(8) $p=4, c=5$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	6.95	8.58	10.29	12.01	13.74
2	7.5	8.9	10.5	12.17	13.87
3	8.22	9.39	10.85	12.43	14.08
4	8.97	10	11.31	12.8	14.37
5	9.72	10.7	11.87	13.25	14.74

(9) $p=5, c=5$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	7.14	8.93	10.8	12.69	14.58
2	7.72	9.27	11.03	12.86	14.72
3	8.45	9.79	11.41	13.15	14.96
4	9.2	10.44	11.9	13.54	15.28
5	9.95	11.16	12.5	14.03	15.68

(10) $p=3, c=7$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	8.76	10.23	11.77	13.32	14.88
2	9.29	10.52	11.96	13.46	14.99
3	10.03	10.97	12.28	13.71	15.19
4	10.87	11.57	12.71	14.04	15.46
5	11.72	12.28	13.24	14.45	15.8

(11) $p=4, c=7$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	9.05	10.78	12.57	14.39	16.21
2	9.65	11.11	12.8	14.56	16.34
3	10.45	11.63	13.16	14.84	16.57
4	11.29	12.3	13.66	15.22	16.88
5	12.14	13.07	14.26	15.7	17.27

(12) $p=5, c=7$ 인 경우

	$\sigma=1$	2	3	4	5
$K=1$	9.28	11.19	13.18	15.19	17.21
2	9.92	11.55	13.43	15.38	17.36
3	10.73	12.12	13.83	15.69	17.61
4	11.58	12.83	14.37	16.11	17.95
5	12.43	13.63	15.02	16.63	18.38