

공급능력 리스크를 고려한 최적 구매계획 해법

장원준 · 박양병[†]

경희대학교 산업경영공학과

A Solution for Sourcing Decisions under Supply Capacity Risk

Won-Jun Jang · Yang-Byung Park

Department of Industrial and Management Systems Engineering, Kyung Hee University

This paper proposes a mathematical model-based solution for sourcing decisions with an objective of minimizing the manufacturer's total cost in the two-echelon supply chain with supply capacity risk. The risk impact is represented by uniform, beta, and triangular distributions. For the mathematical model, the probability vector of normal, risk, and recovery statuses are developed by using the status transition probability matrix and the equations for estimating the supply capacity under risk and recovery statuses are derived for each of the three probability distributions. Those formulas derived are validated using the sampling method. The results of the simulation study on the test problem show that the sourcing decisions using the proposed solution reduce the total cost by 1.6~3.7%, compared with the ones without a consideration of supply capacity risk. The total cost reduction increases approximately in a linear fashion as the probability of risk occurrence or reduction rate of supply capacity due to risk events is increased.

Keywords: Sourcing Problems, Supply Capacity Risk, Supply Chain Risk Management, Logistics

1. 서론

제조업체에서 부품 및 자재의 원활한 수급은 정상적인 생산 활동을 위해 필수적이다. 그런데 최근 글로벌 생산, 글로벌 소싱, 아웃소싱 등의 추세에 따라 공급사슬의 규모와 복잡성이 커지면서 공급 리스크의 발생 가능성이 급격히 증가하고 있는 실정이다. 또한, JIT 생산에 따른 JIT 구매는 공급 리스크에 대해 매우 취약하다. 이에 따라 공급 리스크 발생에 대한 사전 및 사후의 효과적인 대처는 공급사슬 관리(SCM)에서 매우 중요한 이슈가 되고 있다(Tang and Nurmaya, 2011). 공급 리스크는 강도의 관점에서 자연재해, 파업, 전쟁 등으로 인한 붕괴 수준의 치명적 사건과 공급자나 수송 부문에서 내외적 원인으로 예상치 못한 시기에 일시적으로 발생하는 무작위 사건으로 분류된다. 공급 리스크 관리에 관한 문헌조사는 Vanany *et al.*(2009), Thun and Hoenig(2011), Tang and Nurmaya(2011), Gurnani *et al.*

(2012), Ohmori and Yoshimoto(2013), Jüttner *et al.*(2013), Kasmset *et al.*(2014) 등을 참조할 수 있다. 공급 리스크 관리의 기존 연구는 크게 공급자 선정과 구매계획 문제로 나눌 수 있다. 공급자 선정문제에는 주로 AHP, ANP와 같은 다 기준 의사결정 기법, 구매계획 문제(sourcing problems)에는 주로 수리모형과 메타 휴리스틱 기법이 적용되고 있다. 본 연구에서는 다수 공급자의 공급능력 리스크 환경에서 다 기간 구매계획 문제의 최적화를 다룬다.

Cucchiella and Gastaldi(2006)는 공급능력에 리스크가 발생 시 대응할 수 있는 실질적 구매 옵션들을 제시하고, 의료장비를 생산하는 하이테크 회사를 대상으로 이들 완화 옵션들에 대한 효과를 입증하였다. Feng(2010)은 불확실한 공급능력 상황에서 동적 가격결정과 재고관리의 통합된 의사결정 시스템을 제시하여 이익의 개선효과를 입증하였다. Yu *et al.*(2009)은 수요가 가격에 따라 변동하는 2단계 공급사슬에서 단일 및 복수 공

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2005302).
[†] 연락저자 : 박양병 교수, 17104 경기도 용인시 기흥구 서천리1 경희대학교 산업경영공학과, Tel : 031-201-2553, Fax : 031-203-4004,
E-mail : ybpark@khu.ac.kr
2015년 5월 2일 접수; 2015년 7월 25일 수정본 접수; 2015년 9월 8일 게재 확정.

급자 전략에 대한 공급능력 붕괴 리스크를 기대이익의 관점에서 평가하였다. Burke *et al.*(2009)은 확률적 수요환경에서 불확실한 공급자의 신뢰성이 공급자 수, 총 주문량, 주문할당의 의사결정에 미치는 영향을 계량적으로 분석하였으며, 또한 단일 및 다수 공급자 전략의 상대적 우위 조건들을 도출하였다. Yeo and Yuan(2011)은 공급능력의 불확실성이 존재할 때는 정기발주정책 보다 정량발주정책이 더 적합함을 증명하고, 최적의 재주문점과 주문량을 결정하는 식을 유도하였다. Tummala and Schoenherr(2011)는 공급사슬에서 공급능력을 포함한 리스크들의 발생 가능성과 영향력을 평가하고, 리스크 관리를 위한 단계별 과정의 프레임워크를 개발하였다. Federgruen and Yang(2012)은 개별 공급자의 공급능력 붕괴에 대한 신뢰도가 주어진 상황에서 총비용을 최소화하는 다수 공급자 선정과 주문량 결정을 위한 수리모형을 개발하였다. Xanthopoulos *et al.*(2012)은 복수 공급자의 생산능력 붕괴 리스크가 존재하는 단일 기간 newsvendor 유형의 재고관리 문제에서 각 공급자의 최적 주문량을 결정하는 해법을 개발하였다. Klibi and Martel(2012)은 공급능력 리스크를 포함한 다양한 종류의 리스크가 존재하는 공급사슬의 설계와 평가를 위해 Monte Carlo 방법을 이용한 시나리오 기반의 리스크 모델링 접근방법을 제안하였다. Lockamy and McCormack(2012)은 공급자의 각종 리스크가 생산능력과 매출에 미치는 영향과 이들의 발생 확률을 분석하기 위해 Bayesian 네트워크 기반의 방법론을 개발하였다. Scmitt and Singh(2012)

는 단단계 공급사슬에서 공급능력 붕괴와 불확실한 수요 리스크의 영향을 줄이기 위한 재고관리 정책과 완화전략을 분석하였다. Meena and Sarmah(2013)는 다수 공급자의 공급능력 붕괴 리스크 확률이 존재하는 상황에서 주문할당 문제를 위한 혼합정수 비선형 수리모형을 구축하고, 유전 알고리즘 해법을 개발하였다. Hu and Motwani(2014)는 확률적 수요 및 불확실한 환율 환경에서 공급능력의 제약 리스크에 따른 손실을 최소화하는 구매량과 구매시점을 결정하기 위한 계량적 방법을 제시하였다. Park and Lee(2015)는 공급자의 수율이 불확실한 상황에서 단일소식의 최적성을 평가하는 연구를 수행하였다. 공급자의 공급능력 외의 공급 리스크 부문들에 대한 주요 연구는 <Table 1>에 정리되어 있다.

공급자의 공급능력 리스크를 다룬 대부분의 기존 연구에서는 리스크로 인한 공급능력을 정규능력의 고정된 비율로써 표현하고 있다. 이러한 설정은 공급능력의 부족 시 여러 고객들에게 무조건 주문량의 일정 비율씩을 균등하게 공급하는 경우에 해당된다. 하지만 공급능력 리스크의 발생 시 일반적으로 공급량은 리스크 강도나 고객 주문량 크기에 영향을 받는다. 이를테면, 리스크 강도가 커지면 공급능력 비율이 더 감소하거나 리스크가 발생하더라도 고객 주문량 크기가 작으면 전량 공급이 가능할 수 있다. 또한, 리스크는 보통 서서히 완화되기 때문에 공급능력은 일정기간에 걸쳐 점진적으로 회복된다. 본 연구는 다수의 부품 공급자와 한 제조업자가 존재하는 2단계

Table 1. Supply Risk Categories and References

Risk category	References
Demand	Cucchiella and Gastaldi(2006), Gaudenzi and Borghesi(2006), Oke and Gopalakrishnan(2009), Oehmen <i>et al.</i> (2009), Xia and Chen(2011), Feng(2010), Burke <i>et al.</i> (2009), Yu <i>et al.</i> (2009), Giannakis and Louis(2011), Yeo and Yuan(2011), Srinivasan <i>et al.</i> (2011), Thun and Hoenig(2011), Klibi and Martel(2012), Schmitt and Singh(2012), Xanthopoulos <i>et al.</i> (2012), Sofyalıođlu and Kartel(2012), Lavastre <i>et al.</i> (2012), Gurnani <i>et al.</i> (2012)
Quality	Cucchiella and Gastaldi(2006), Xia and Chen(2011), Srinivasan <i>et al.</i> (2011), Thun <i>et al.</i> (2011), Thun and Hoenig(2011), Sun <i>et al.</i> (2012), Lockamy and McCormack(2012), Lavastre <i>et al.</i> (2012)
Inventory	Oehmen <i>et al.</i> (2009), Burke <i>et al.</i> (2009), Giannakis and Louis(2011), Tummala and Schoenherr(2011), Thun <i>et al.</i> (2011), Gurnani <i>et al.</i> (2012), Klibi and Martel(2012), Kanyoma <i>et al.</i> (2013)
Time	Gaudenzi and Borghesi(2006), Oehmen <i>et al.</i> (2009), You <i>et al.</i> (2009), Xia and Chen(2011), Klibi and Martel(2012), Yeo and Yuan(2011), Sofyalıođlu and Kartel(2012), Sun <i>et al.</i> (2012), Lockamy and McCormack(2012)
Price and exchange rate	Cucchiella and Gastaldi(2006), Manuj and Mentzer(2008), Feng(2010), Burke <i>et al.</i> (2009), Klibi and Martel(2012)
Product design	Manuj and Mentzer(2008), Oehmen <i>et al.</i> (2009), Takata and Yamanaka(2013), Kasemset <i>et al.</i> (2014)
Competition	Cucchiella and Gastaldi(2006), Yu <i>et al.</i> (2009), Xanthopoulos <i>et al.</i> (2012), Cavusgil and Deligonul(2012), Gurnani <i>et al.</i> (2012)
Transportation	Oke and Gopalakrishnan(2009), Oehmen <i>et al.</i> (2009), Giannakis and Louis(2011), Thun and Hoenig(2011), Lockamy and McCormack(2012), Klibi and Martel(2012)
Policy and finance	Oke and Gopalakrishnan(2009), Foerstl <i>et al.</i> (2010), Xia and Chen(2011), Jung <i>et al.</i> (2011), Thun <i>et al.</i> (2011), Thun and Hoenig(2011), Lockamy and McCormack(2012), Klibi and Martel(2012), Cavusgil and Deligonul(2012), Sofyalıođlu and Kartel(2012), Lavastre <i>et al.</i> (2012), Dekker <i>et al.</i> (2013),

공급사슬에서 공급자의 리스크 발생 및 회복기간 동안 공급능력의 변동을 고려해 세 가지 확률분포별로 제조업자의 주문량에 대한 기대 공급량 계산식을 개발하고, 이를 이용해 계획기간 동안 총 비용을 최소화하는 수리모형 기반의 구매계획 해법을 제안한다. 그리고 세 가지 확률분포의 모수 값 규정에 의해 설정된 공급능력 변동의 세 가지 경우에 대해 기대공급량의 차이와 함께 제안된 해법의 효과를 비교한다.

제 1장의 서론에 이어, 제 2장에서는 공급능력 리스크 발생에 대한 상황을 설정하고, 공급자의 안정상태 확률벡터를 구한다. 제 3장에서는 공급능력 변동의 세 가지 규정된 확률분포에 대해 리스크를 고려한 기대공급량 계산식을 개발한다. 제 4장에서는 다수 공급자의 공급능력 리스크를 고려하여 계획기간 동안 총 비용을 최소화하는 구매계획의 수리모형을 구축한다. 제 5장에서는 계산실험을 통해 공급능력 리스크를 고려한 구매계획의 효과를 총 비용 관점에서 평가한다. 마지막으로, 결론 및 향후과제를 제 6장에 정리한다.

2. 공급능력 리스크와 상대 확률벡터

시장 도입기에 있는 제품을 생산하는 제조업자는 시장 성숙기에 들어설 때까지 상당 기간 동안은 핵심부품의 불안정한 조달문제에 직면할 수 있다. 특히, 신형 첨단 IT 제품을 생산하는 제조업자에게는 빈번히 발생하는 문제이다. 이러한 문제는 아직 생산 초기 단계의 소수 공급자들의 불안정한 생산 공정 및 원료 수급과 제한적인 공급능력에 주로 기인한다. 최근에 많은 제조업자들이 판매의 불확실성으로 인한 재고감축 수단으로 JIT(적시) 생산방법을 적용하고 있기 때문에 핵심부품의 공급차질은 제조업자에게 큰 손실을 야기한다.

다수의 공급자와 하나의 제조업자가 존재하는 2단계 공급사슬에서 공급자들의 공급능력에 영향을 미치는 낮은 수준의 여러 무작위 리스크 사건요소들이 존재하는 상황을 고려한다. 이를테면, 부분파업, 공정 이상, 상위 공급자의 납기지연, 원자재 공급부족, 불량자재, 생산시설의 일시적 기능저하, 수송의 불안정성 등을 들 수 있다. 한 예로, 반도체 부품 공급자에게는 회도류와 같은 회귀 원자재의 수급차질 리스크 사건요소가 존재한다. 공급자의 공급능력 리스크는 사건요소들의 복합적 작용에 의해 발생하게 된다. 제조업자는 공급자의 리스크 발생을 사전에 정확히 알 수 없으며, 단지 매기의 리스크 발생확률을 예상할 수 있다. 제조업자는 JIT 생산에 의거 리드타임을 고려하여 매기 공급자에게 부품을 주문하는데, 주문량은 공급자의 기별 정규 공급능력을 초과할 수 없다. 공급자에게 리스크가 발생한 경우 제조업자는 공급자의 저하된 공급능력으로 인해 주문량 보다 적은 수량을 공급받게 된다.

과거 일정기간 동안 공급자의 리스크 발생 기수(빈도)의 비율을 임의의 기의 리스크 발생확률 r 로 설정한다. 이 확률은 공급자의 이전 상태와 무관하게 항상 일정한 것으로 가정한다.

이러한 가정은 리스크 발생에 복합적으로 영향을 미치는 다양한 사건요소들의 리스크 풀링(risk pooling) 효과에 근거한 것으로서, 대부분의 기존연구(Sawik, 2014; Oehmen, 2009)에서 분석의 용이성 때문에 적용하고 있다. 리스크 사건이 발생하면 강도에 따라 공급능력은 정규능력의 70~90% 범위로 저하되며, 실제 비율은 규정된 일양분포, 베타분포, 삼각분포를 따르는 것으로 가정한다. 일양분포는 범위 이외의 다른 정보가 부족할 때 흔히 사용되며, 베타분포는 변동률, 불량률 등과 같은 확률적 비율을 나타내는데 흔히 사용되며, 삼각분포는 분포의 정확한 형태가 알려져 있지 않은 상황에서 베타분포 보다 더 용이하게 사용된다. 이들 세 가지 다른 확률분포를 이용해 리스크의 다양한 분석이 가능하다. 리스크는 여러 기간 동안에 걸쳐 지속될 수 있다. 리스크 요인이 해결되면 직후 1기 동안의 회복기간을 거친 다음 원래의 정규능력으로 복구된다. 회복기간 동안의 공급능력은 정규능력의 90~100% 범위를 유지한다. 회복기간에는 리스크가 발생하지 않는다. 또한, 회복기간이 끝난 직후 1기 동안은 회복기간 동안의 리스크 완화 노력의 영향으로 리스크 발생 확률이 평소의 반으로 줄어든다.

이와 같은 공급자의 리스크 발생과 회복은 이산시간 이산상태 마르코프 체인으로 표현될 수 있다. 임의의 기의 공급자 상태를 리스크 없는 정상상태, 리스크 상태, 리스크 회복상태 중 하나로 정의하면, 상태전이확률 행렬 \vec{P} 은 아래의 행렬 (1)과 같이 표현될 수 있다. 행과 열은 각각 순서대로 정상, 리스크, 회복 상태를 나타낸다. 상태전이확률은 현재 상태에서 다음 단계(기)에 특정 상태로 전이될 확률을 의미한다. 공급자의 상태전이를 에르고딕 마르코프 체인 형태로 표현하면 <Figure 1>과 같다.

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 1-r & r & 0 \\ 0 & r & 1-r \\ 1-r/2 & r/2 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

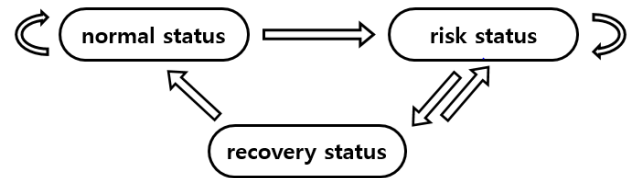


Figure 1. Supplier Status Transition Diagram

상태전이확률 행렬을 이용하여 특정 기에 공급자의 안정상태 확률벡터(steady-state random vector) $\boldsymbol{\pi} = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$ 을 다음과 같이 구할 수 있다. π_1 은 정상상태 확률, π_2 는 리스크 상태 확률, π_3 은 회복상태 확률을 나타낸다.

$$\boldsymbol{\pi} = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3\} \vec{P} \quad (2)$$

식 (2)와 $\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1$ 에 의해 다음과 같이 세 가지 상태의 확률 식이 구해진다.

$$\pi_1 = \frac{(1-r)(2-r)}{2+r-r^2}, \pi_2 = \frac{2r}{2+r-r^2}, \pi_3 = \frac{2r(1-r)}{2+r-r^2} \quad (3)$$

3. 공급자의 리스크를 고려한 기대 공급량 산정 식

제조업자가 t 기에 공급자 s 에게 주문한 수량을 Q_{st} 라고 하자. 그러면 Q_{st} 의 기대 공급량 $E(Q_{st})$ 는 식 (4)를 이용해 구할 수 있다. 식 (4)는 t 기 공급자의 세 가지 상태에 대한 각각의 기대 공급량을 합한 것이다.

$$E(Q_{st}) = [\pi_{s1}Q_{st} + \pi_{s2}E^{R}(Q_{st}) + \pi_{s3}E^{H}(Q_{st})] \quad (4)$$

여기서 π_{s1} , π_{s2} , π_{s3} 은 각각 공급자 s 의 정상상태, 리스크 상태, 회복상태 확률, $E^{R}(Q_{st})$ 와 $E^{H}(Q_{st})$ 는 각각 리스크 상태와 회복상태의 기대공급량을 나타낸다.

$E^{R}(Q_{st})$ 와 $E^{H}(Q_{st})$ 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E^{R}(Q_{st}) = \begin{cases} Q_{st} & Q_{st} < 0.7M_s \\ \int_{0.7}^{M_s} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.9} Q_{st} f(x) dx & 0.7M_s \leq Q_{st} < 0.9M_s \\ \int_{0.7}^{0.9} x M_s f(x) dx & 0.9M_s \leq Q_{st} \end{cases} \quad (5)$$

$$E^{H}(Q_{st}) = \begin{cases} Q_{st} & Q_{st} < 0.9M \\ \int_{0.9}^{\frac{Q_{st}}{M}} x M f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M}}^1 Q_{st} f(x) dx & 0.9M \leq Q_{st} \end{cases} \quad (6)$$

1. 일양분포

$$\begin{aligned} E^{R}(Q_{st}) &= Q_{st} & Q_{st} < 0.7M_s \\ &= -\frac{Q_{st}^2}{0.4M_s} - 1.225M_s + 4.5Q_{st} & 0.7M_s \leq Q_{st} < 0.9M_s \\ &= 0.8M_s & 0.9M_s \leq Q_{st} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E^{H}(Q_{st}) &= Q_{st} & Q_{st} < 0.9M_s \\ &= -\frac{5Q_{st}^2}{M_s} - 4.05M_s + 10Q_{st} & 0.9M_s \leq Q_{st} \end{aligned} \quad (8)$$

2. 베타분포

$$\begin{aligned} E^{R}(Q_{st}) &= Q_{st} & Q_{st} < 0.7M_s \\ &= 3M_s \left(\frac{Q_{st} - 0.7M_s}{0.2M_s} \right)^5 \left\{ 1.4 - \frac{5}{6} \left(\frac{Q_{st} - 0.7}{0.2M_s} \right) - \frac{2}{7} \left(\frac{Q_{st} - 0.7M_s}{0.2M_s} \right)^2 \right\} + Q_{st} \\ &\quad - 30Q_{st} \left(\frac{Q_{st} - 0.7M_s}{0.2M_s} \right)^5 \left\{ 0.2 - \frac{1}{6} \left(\frac{Q_{st} - 0.7M_s}{0.2M_s} \right) \right\} & 0.7M_s \leq Q_{st} < 0.9M_s \\ &= \frac{59}{70}M_s & 0.9M_s \leq Q_{st} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 M_s 는 공급자 s 의 기간 정규능력, x 는 정규능력에 대한 실제 공급능력 비율($0 < x \leq 1$), $f(x)$ 는 실제 공급능력 비율의 확률밀도함수를 나타낸다.

리스크 발생기의 공급능력 비율은 0.7~0.9범위에서 서로 다른 형상의 세 가지 확률분포, 즉 일양분포, 베타분포, 삼각분포로 정의한다. 일양분포를 기준으로 베타분포와 삼각분포는 치우침을 서로 극단적으로 하기 위해 의도적으로 각각 공급능력 비율의 상한 0.9와 하한 0.7 부근에 집중되어 서로 대칭형상이 되도록 모수들을 규정한다. 이에 따라 일양분포의 $f(x)$ 에서 $a = 0.7$ 과 $b = 0.9$, 베타분포의 $f(x)$ 에서 $\alpha = 2$ 와 $\beta = 5$, 삼각분포의 $f(x)$ 에서 $a = 0.7$, $m = 0.74$, $b = 0.9$ 로 규정한다. 베타분포의 경우는 확률변수가 0.7~0.9범위의 값을 갖도록 베타분포 확률변수 θ 의 밀도함수 $g(\theta)$ ($0 < \theta < 1$)를 이용해 $f(x)$ 를 표현한다. 즉, $x = 0.7 + 0.2\theta$ 관계식을 이용해서 $f(x) = 5g(5x - 3.5)$ 로 정의한다. 삼각분포의 최빈값은 0.7~0.9범위에서 베타분포의 최빈값인 0.86과 대칭되는 점으로 정한다. <Figure 2>는 0.7~0.9범위에서 세 가지 확률분포에 대한 공급능력 비율의 확률밀도함수 그래프를 보여준다.

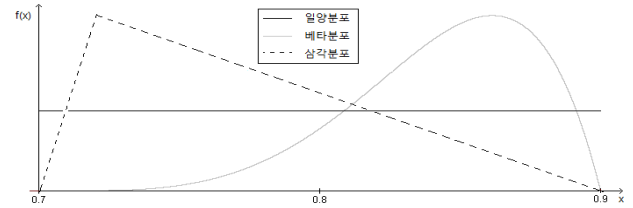


Figure 2. Three Specified Probability Density Functions of Supply Capacity Rate under Risk Status

리스크 회복기의 세 가지 확률분포는 공급능력 비율이 0.9~1.0범위에서 앞서와 동일한 방법으로 정의된다. 이에 따라

$$\begin{aligned}
E^H(Q_{st}) &= Q_{st} & Q_{st} < 0.9M_s \\
&= 3M_s \left(\frac{Q_{st} - 0.9M_s}{0.1M_s} \right)^5 \left\{ 1.8 - \frac{4}{3} \left(\frac{Q_{st} - 0.9M_s}{0.1M_s} \right) - \frac{1}{7} \left(\frac{Q_{st} - 0.9M_s}{0.1M_s} \right)^2 \right\} + Q_{st} & (10) \\
&- 30Q_{st} \left(\frac{Q_{st} - 0.9M_s}{0.1M_s} \right)^5 \left\{ 0.2 - \frac{1}{6} \left(\frac{Q_{st} - 0.9M_s}{0.1M_s} \right) \right\} & 0.9M_s \leq Q_{st}
\end{aligned}$$

3. 삼각분포

$$\begin{aligned}
E^R(Q_{st}) &= Q_{st} & Q_{st} < 0.7M_s \\
&= \frac{M_s}{0.008} \left(\frac{2Q_{st}^3}{3M_s^3} - \frac{0.7Q_{st}^2}{M_s^2} + \frac{0.7^3}{3} \right) + Q_{st} \left(1 - \frac{\left(\frac{Q_{st} - 0.7}{M_s} \right)^2}{0.008} \right) & 0.7M_s \leq Q_{st} < 0.74M_s \\
&= \frac{0.436M_s}{3} + \frac{-\frac{2Q_{st}^3}{M_s^2} + \frac{2.7Q_{st}^2}{M_s} - 0.668M_s}{0.096} + \frac{Q_{st} \left(0.9 - \frac{Q_{st}}{M_s} \right)^2}{0.032} & 0.74M_s \leq Q_{st} \leq 0.9M_s \\
&= 0.78M_s & 0.9M_s \leq Q_{st} & (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E^H(Q_{st}) &= Q_{st} & Q_{st} < 0.9M_s \\
&= \frac{M_s}{0.002} \left(\frac{2Q_{st}^3}{3M_s^3} - \frac{0.9Q_{st}^2}{M_s^2} + 0.243 \right) + Q_{st} \left(1 - \frac{\left(\frac{Q_{st} - 0.9}{M_s} \right)^2}{0.002} \right) & 0.9M_s \leq Q_{st} < 0.92M_s \\
&= 0.183M_s + \frac{-\frac{2Q_{st}^3}{M_s^2} + \frac{3Q_{st}^2}{M_s} - 0.982M_s}{0.024} + \frac{Q_{st} \left(1 - \frac{Q_{st}}{M_s} \right)^2}{0.008} & 0.92M_s \leq Q_{st} & (12)
\end{aligned}$$

일양분포의 $f(x)$ 에서 $a=0.9$ 와 $b=1$, 베타분포의 $f(x)$ 에서 $\alpha=2$ 와 $\beta=5$, 삼각분포의 $f(x)$ 에서 $a=0.9$, $m=0.92$, $b=1$ 로 규정한다. 베타분포의 경우는 $x=0.9+0.1\theta$ 관계식을 이용하여서 $f(x)=10g(10x-9)$ 로 정의한다.

세 가지 확률분포에 대한 리스크 발생기와 회복기의 $f(x)$ 를 각각 식 (5)와 식 (6)에 대입함으로써 세 가지 확률분포에 대해 리스크 발생기와 회복기의 기대 공급량 $E^R(Q_{st})$ 와 $E^H(Q_{st})$ 의 산정 식을 식 (7)~식 (12)와 같이 정리할 수 있다(유도 과정은 <부록> 참조).

기대 공급량 산정식의 타당성을 검증하기 위해 샘플링 방법을 이용한 계산실험을 실시하였다. 정규능력이 10,000개인 공급자에 대해 주문량을 고정해 놓고, 산정 식을 이용해 구한 기대

공급량과 공급능력 비율 샘플 5,000개에 대한 평균 공급량이 일치한지 t -검정을 실시하였다. 즉, $H_0: E^R(Q_{st}) = \bar{X}^R$, $H_1: E^H(Q_{st}) = \bar{X}^H$. 여기서 \bar{X}^R 과 \bar{X}^H 는 각각 리스크와 회복 상태 샘플들의 평균 공급량을 나타낸다. 계산실험 결과가 <Table 2>에 정리되어 있다. 6가지 모든 경우에서 위의 귀무가설은 유의수준 $\alpha=0.05$ 로써 채택되었다.

<Figure 3>과 <Figure 4>는 공급자의 정규능력이 10,000개일 때 각각 리스크 상태와 회복상태에서 공급능력 비율의 세 가지 규정된 확률분포에 대해 주문량의 기대 공급량을 그래프로 보여준다. 리스크 상태와 회복 상태에서 동일하게 베타분포, 일양분포, 삼각분포 순으로 기대 공급량이 많다. 이것은 <Figure 2>에서와 같이 리스크 발생으로 인한 공급능력 비율이 삼각분

Table 2. Validation of the Formulas for the Expected Supply Quantity Using t-Test

Status	Probability distribution	Order quantity	Expected supply quantity	\bar{X}^R or \bar{X}^H (standard deviation)	t-statistics
Risk	uniform	8,000	7750	7,749.89(325.69)	0.0249
	beta	8,500	8,334.73	8,334.99(232.14)	0.0792
	triangular	7,500	7,448.44	7,448.55(101.18)	0.0781
Recovery	uniform	9,500	9375	9,374.86(162.44)	0.0621
	beta	9,750	9,667.37	9,667.21(115.22)	0.0971
	triangular	9,250	9,224.22	9,224.15(50.72)	0.0994

포의 경우는 주로 낮은 비율, 베타분포의 경우는 주로 높은 비율 쪽에 집중되기 때문이다. <Figure 3>과 <Figure 4>에서 세 가지 분포 모두 리스크 상태는 7,000개부터, 회복상태는 9,000개부터 주문량과 기대 공급량의 차이가 각각 발생함을 알 수 있다.

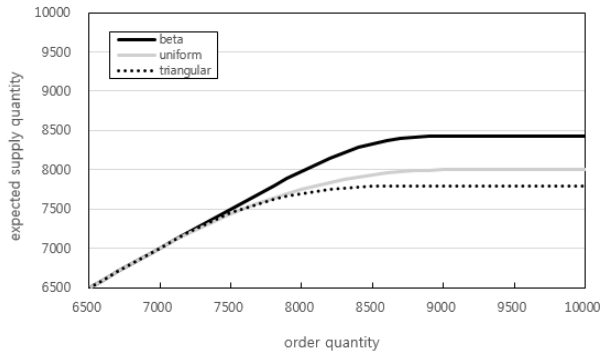


Figure 3. Comparison of the Expected Supply Quantity under Risk Status for the Three Specified Probability Distributions

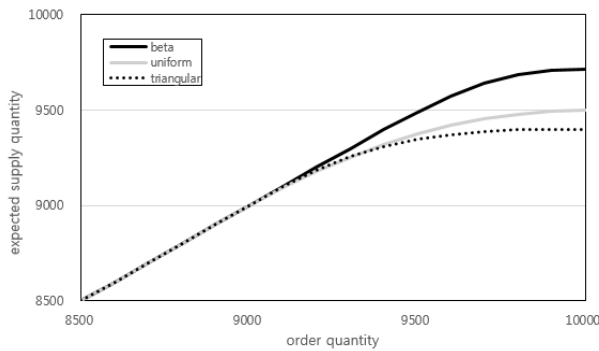


Figure 4. Comparison of the Expected Supply Quantity under Recovery Status for the Three Specified Probability Distributions

리스크 발생확률 r 을 0.2로 설정하고, 안정상태에서 세 가지 규정된 확률분포 각각에 대해 주문량의 기대 공급량을 계산하여 그래프로 작성했다. 안정상태의 기대 공급량은 정상상태, 리스크 상태, 회복상태의 발생 가능성을 모두 고려해 계산된 것이다. <Figure 5>는 안정상태의 기대 공급량을 보여준다. 세 가지 분포에 대해 기대 공급량의 차이는 크지 않지만, <Figure 6>에 나타난 바와 같이 리스크 발생으로 인한 공급능력 비율 형상이 근사 대칭으로 규정되어 있는 베타분포와 삼각분포의 기대 공급량 차이가 가장 큼을 알 수 있다.

참고로, 베타분포와 삼각분포 각각에 대해 공급능력 변동이 하한 및 상한에 치우친 두 가지 극단적 경우를 유사하게 구성하여 기대 공급량에 대한 비교 실험을 실시하였다. 실험결과, 예상한대로 위의 분석결과와 비교하여 유의미한 차이가 발견되지 않았다. 또한, 동일한 극단적 경우에 대해 두 가지 분포는 리스크 상태나 회복상태에서 모두 기대 공급량의 차이를 거의 보이지 않았다. 실험의 상세 결과 값은 분포의 모수 값 변화에

따라 달라졌다.

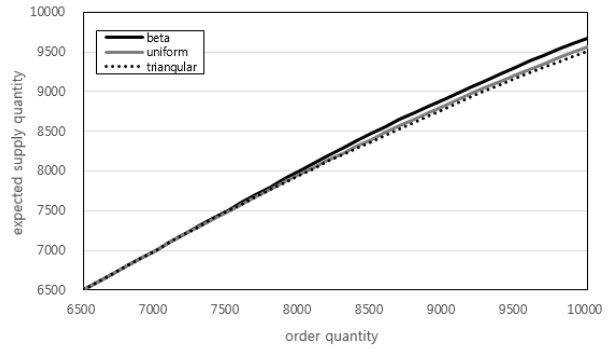


Figure 5. Comparison of the Expected Supply Quantity under Steady State for the Three Specified Probability Distributions

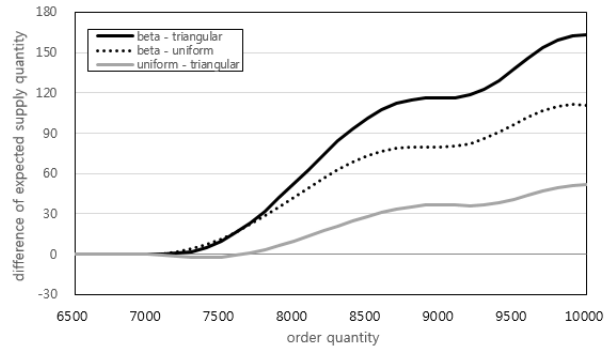


Figure 6. Difference of the Expected Supply Quantity under Steady State between the Specified Probability Distributions

4. 공급능력 리스크를 고려한 구매계획 수리모형

한 제조업자가 제한된 공급능력의 다수 공급업자로부터 동일한 품질의 핵심 부품을 구매하는 상황이다. 모든 공급자에게는 무작위 리스크 사건 발생의 가능성이 존재하며, 리스크 발생은 공급능력의 차질을 초래한다. 제조업자는 JIT 생산에 의거 주문하며, 주문량은 공급자의 기간 정규능력을 초과할 수 없다. 제조업자는 실제 수령한 물량에 대해 비용을 지불한다. 공급자로부터의 수송비용은 제조업자의 부담으로 차량 대수에 비례한다. 제조업자는 공급자의 공급차질 등으로 부품 재고가 부족한 경우 현물시장에서 부족분을 고가에 특별 구매한다. 공급자의 리스크 발생을 고려하여 계획기간 동안 제조업자의 총 비용을 최소화하는 구매계획의 수리모형을 다음과 같이 구축할 수 있다.

부호

- I_t^+ t 기말 제조업자의 재고 수준
- I_t^- t 기 제조업자의 재고부족량

D_t	t 기 제조업자의 수요
B	제조업자의 초기 재고 수준
S	공급자 수
T	계획기간
a	제조업자의 단위 재고유지 비용
b	제조업자의 특별 구매단가
c_s	공급자 s 로부터 정상 구매단가
L_s	공급자 s 의 주문리드타임
M_s	공급자 s 의 기간 정규능력
V_s	공급자 s 의 수송차량 용량
k_s	공급자 s 의 수송차량 당 비용
Q_{st}	t 기 공급자 s 에게 주문량
$E(Q_{st})$	Q_{st} 의 기대 공급량

$$\text{Min.} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S c_s E(Q_{s,t-L_s}) + aI_t^+ + bI_t^- + \sum_{s=1}^S k_s \left[\frac{E(Q_{s,t-L_s})}{V_s} \right] \quad (13)$$

s.t.

$$I_t^+ = I_{t-1}^+ + \sum_{s=1}^S E(Q_{s,t-L_s}) - D_t + I_t^- \quad \forall t \quad (14)$$

$$I_t^+ I_t^- = 0 \quad \forall t \quad (15)$$

$$Q_{st} \leq M_s \quad \forall s, t \quad (16)$$

$$E(Q_{st}) = \pi_{s1} Q_{st} + \pi_{s2} E^R(Q_{st}) + \pi_{s3} E^H(Q_{st}) \quad \forall s, t \quad (17)$$

$$E(Q_{s0}) = 0 \quad \forall s \quad (18)$$

$$I_0^+ = B \quad (19)$$

$$I_t^+ \geq 0, I_t^- \geq 0, Q_{st} \geq 0, \text{ and all are integers} \quad \forall s, t \quad (20)$$

목적 식 (13)은 계획기간 동안 정상구매비용, 재고유지비용, 특별구매비용, 수송비용의 합으로 계산되는 총 비용의 최소화를 꾀한다. 정상구매비용과 수송비용의 계산에서는 주문리드타임을 고려한다. 제약 식 (14)와 식 (15)는 매 기 재고 수준과 재고부족량을 계산한다. 제약 식 (16)은 한 공급자에 대한 주문량을 정규능력 이하로 제한한다. 제약 식 (17)은 기대 공급량을 구하는 식이다. 식에서 $\pi_{s1}, \pi_{s2}, \pi_{s3}$ 은 공급자 s 의 리스크 발생확률 r_s 의 입력 값을 가지고 식 (3)을 이용해 구한다. 실제 풀이에서 $E^R(Q_{st})$ 와 $E^H(Q_{st})$ 는 선택된 확률분포에 따라 식 (7)~식 (12) 중 해당되는 식들로 대체된다. 대체 시 주문량의 구간별 식들을 모두 포함하는데, 이들은 if문 또는 아주 큰 값 M 을 사용해 표현된다. 이로 인해서 수리모형은 긴 계산시간을 소요하게 된다. 제약 식 (18)은 계획기간 이전의 주문이 없는 것으로 설정한다. 식 (19)는 제조업자의 초기 재고수준을 설정한다.

5. 계산실험

공급자의 리스크가 존재하는 상황에서 리스크를 고려한 기대 공급량을 이용해 수립된 구매계획이 리스크를 무시하고 주문

량을 그대로 공급량으로 간주하고 수립된 구매계획과 비교하여 얼마나 효과적인지를 평가하기 위해 제 4장의 수리모형을 이용해서 계산실험을 실시하였다. 리스크를 고려하지 않은 경우는 제 4장의 수리모형에서 $E(Q_{s,t-L_s}), E(Q_{st}), E(Q_{s0})$ 를 각각 $Q_{s,t-L_s}, Q_{st}, Q_{s0}$ 로 변경하였고, 식 (17)을 제거하였다.

계산실험을 위해 다음과 같이 실험문제를 구성하였다. 시장 도입기에 있는 첨단 IT 제품을 생산하는 한 제조업자가 복수의 공급자로부터 핵심부품을 공급받고 있다. 제조업자의 계획기간은 12주이다. 제조업자의 주간 수요는 [16,000, 20,000]개의 임의의 값으로 결정된다. 두 공급자의 주문리드타임은 1주이다. 두 공급자는 아직 생산 초기 단계이어서 생산이 불안정하고 공급능력이 제한적이다. 공급자 1과 2에서 무작위 리스크 사건의 발생확률은 각각 0.3과 0.2이다. 리스크 발생 동안 주간 공급능력 비율은 정규능력의 0.7~0.9, 리스크 회복기간에는 정규능력의 0.9~1.0에서 규정된 확률분포에 의거 결정된다. 제조업자의 초기 재고 수준은 0, 단위 재고유지비는 주당 0.5, 특별 구매비용은 220이다. 공급자 1과 2의 정규능력은 동일하게 10,000, 판매단가는 각각 100과 120, 수송차량 용량은 각각 6,000과 8,000, 차량 당 수송비는 각각 36,000과 32,000이다.

수리모형은 LINGO 11.0을 이용해 풀었으며, 모든 계산실험은 IBM 호환 PC(Intel core i3-3220 processor, 3.3GHz CPU, 4GB RAM)에서 수행되었다. 수리모형의 계산시간은 확률분포에 따라 대략 3~4시간이 소요되었다. 풀이 결과, 공급자의 리스크를 고려한 구매계획에서는 규정된 삼각분포, 일양분포, 베타분포의 경우 실제 수요와 비교하여 계획기간 동안 각각 약 2.1%, 1.2%, 5.4%의 초과 주문이 발생하였다. 이것은 실제 수요보다 더 많은 수량을 주문하여 공급능력 저하로 인한 고비용의 특별구매를 줄이기 위함이었지만, 초과 주문으로 인해 구매, 재고유지, 수송의 비용이 불필요하게 증가하였다. 세 가지 확률분포의 초과 주문량의 순위는 세 가지 분포의 평균 공급능력 비율의 순위와 반대임을 알 수 있다(<Figure 2> 참조).

공급자 리스크를 고려한 경우의 수리모형에서는 공급자의 리스크 발생으로 인해 실제 공급능력이 정규능력 보다 작다. 반면에, 리스크를 무시한 경우의 수리모형에서는 실제 공급능력이 정규능력과 항상 같다. 따라서 공급능력에 차이가 존재하는 두 경우의 수리모형을 각각 풀어 얻어진 총비용으로써 두 경우의 구매계획 해를 평가하는 것은 옳지 않다. 공급자의 리스크 사건과 이에 따른 공급능력의 변동이 동일하게 발생하는 동적 공급사슬 환경에서 두 경우의 구매계획 해를 평가하는 것이 타당하다. 이에 따라 시뮬레이션 분석이 필요하다.

각 공급자에서 주어진 확률에 의해 리스크가 발생하고 이로 인해 공급능력이 규정된 확률분포에 따라 변동하는 상황을 반영한 2단계 공급사슬의 시뮬레이션 모형을 구축하였다. 그리고 세 가지 규정된 확률분포의 실험문제 각각에 대해 리스크를 고려한 경우와 무시한 경우 각각의 수리모형 해를 가지고 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 과정에서 각종 비용은 수리모형의 목적 식 (13)과 동일한 방식으로 구하였다. 시뮬레

이선 모형의 프로그램은 Excel을 이용해 작성하였다. 시뮬레이션은 12주 동안 리스크 사건 발생의 결정변수와 공급능력 비율의 확률변수 값을 매회 새롭게 생성하면서 200회 반복 실행하였다.

실험 결과, 리스크를 고려한 경우의 구매계획 해는 리스크를 무시한 경우의 구매계획 해와 비교하여 규정된 일양분포에 대해 평균 2.28%, 규정된 베타분포에 대해 평균 1.59%, 규정된 삼각분포에 대해 평균 3.67%의 총 비용 감소효과를 보였다. 예로서, 세 가지 규정된 확률분포에 대해 각각 첫 번째 반복 시뮬레이션에서 구해진 두 경우의 비용 출력 값이 <Table 3>에 정리되어 있다. 세 가지 확률분포 모두에서 리스크를 고려한 경우의 구매계획이 총 비용 감소효과를 보였다. 삼각분포에 대해 가장 높은 총 비용 감소를 보인 것은 규정된 삼각분포의 경우에 공급능력 비율이 주로 0.7 부근의 낮은 구간에서 분포되어 있기 때문이다. 또한, 베타분포에 대해 가장 낮은 총 비용 감소를 보인 것은 규정된 베타분포의 경우에 공급능력 비율이 주로 0.9 부근의 높은 구간에서 분포되어 있기 때문이다. 동일한 이유로, 규정된 삼각분포가 사용될 때 총 주문량이 가장 많았고, 규정된 베타분포가 사용될 때 총 주문량이 가장 작았다. 리스크를 무시한 구매계획 해의 경우, 두 공급자의 리스크 발생으로 인해 실제 공급량이 크게 줄어들어 모든 확률분포에서 많은 수량의 특별구매가 발생하였으며, 특히, 규정된 삼각분포에서 더 많은 특별구매가 발생했다. 하지만 모든 확률분포에서 재고수준은 아주 낮게 나타났다.

리스크를 고려한 구매계획의 효과는 공급능력의 변동을 나타내는 확률분포의 종류가 아니라, 확률분포의 모수에 의해 규정되는 분포의 형상에 영향을 받았다. 즉, 공급자의 리스크 발생 시 공급능력이 크게 영향을 받을수록 리스크를 고려한 구매계획에 의한 총 비용 감소효과가 커졌다. 제조업자의 수요가 공급자의 공급능력 감소에 심각한 영향을 받을 만큼 크지 않은 경우, 즉 제조업자의 수요가 정규 공급능력 크기와 비교하여 상대적으로 작은 경우 리스크를 고려한 구매계획은 초과 주문으로 인해 오히려 총 비용의 증가를 초래하여 그 효과가 제한적이었다. 세 가지 규정된 확률분포 중 베타분포가 이 경우에 해당되었다.

추가적으로, 시뮬레이션을 이용하여 공급자 리스크의 발생 확률과 공급능력 변동비율의 하한 값 변화가 리스크를 고려한 구매계획의 효과에 미치는 영향을 평가하기 위한 분석을 실시하였다. 이를 위해 공급능력 변동비율이 일양분포를 따르는 단일 공급자의 실험문제를 새로이 구축하였다. 리스크 발생확률의 크기는 0.1부터 0.4까지 0.1씩, 그리고 공급능력 변동비율의 하한 값은 0.4부터 0.7까지 0.1씩 변화하였다. 공급능력 변동비율의 상한 값은 0.9로 고정하였다. 제조업자의 주간 수요는 [7,000, 8,000]개의 임의 값으로 정하였다.

두 요인의 16가지 조합 각각에 대해 두 경우의 구매 계획 해를 가지고 이전과 동일하게 시뮬레이션을 수행한 결과, 리스크의 발생확률이 커지고 공급능력 변동비율의 하한 값이 작아짐에 따라 리스크를 고려한 구매계획의 총 비용 감소율이 대략 선형으로 증가하였다. 두 요인에 대해 4x4 이원매치 분산분석을 실시한 결과, 리스크 발생확률 크기에 대해 대응 $p = 0.010184$, 공급능력 변동비율의 하한 값에 대해 대응 $p = 0.000169$ 로 구해졌다. 이에 따라 두 요인 값의 변화는 리스크를 고려한 구매계획의 효과에 유의미한 영향을 미치며, 두 요인 중에서 공급능력 변동비율의 하한 값이 더 크게 영향을 미치는 것으로 판단하였다.

6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 다수 공급자와 한 제조업자의 2단계 공급사슬에서 공급자의 리스크 발생으로 인한 공급능력 변동을 고려하여 제조업자의 총비용을 최소화하는 구매계획의 수리모형 해법을 제안하였다. 다양한 분석을 위해 공급능력의 변동은 일양분포, 베타분포, 삼각분포의 세 가지 확률분포로써 규정하였다. 수리모형 구축을 위해 공급자의 상태별 확률벡터를 구하고, 규정된 확률분포별로 리스크 상태와 회복상태 각각에 대해 기대공급량 산정 식을 도출하였다. 도출된 식들의 타당성은 샘플링 방법을 이용하여 증명하였다. 제안된 수리모형 해법을 이용하여 리스크를 고려한 경우와 무시한 경우의 구매계획 해를 총비용 관점에서 평가하였다. 계산실험 결과는 다음과 같이 정리된다.

Table 3. Simulation Outcomes for the Sourcing Plans with and Without Supply Risk Consideration in the Test Problem

Probability distribution	Risk consideration	Cost					Total cost reduction rate(%)
		Regular purchasing	Special purchasing	Inventory carrying	Transportation	Total	
uniform	yes	23,575,840	510,840	5830	1,408,000	25,500,510	2.36
	no	22,894,235	1,814,780	20	1,408,000	26,117,035	-
beta	yes	23,025,110	1,611,940	1694	1,376,000	26,014,744	1.69
	no	22,532,450	2,554,420	59	1,376,000	26,462,929	-
triangular	yes	23,922,540	334,400	9259	1,472,000	25,476,479	3.90
	no	22,503,785	2,597,100	84	1,408,000	26,508,969	-

- 1) 리스크를 고려한 구매계획이 항상 효과적이었다. 리스크를 무시한 구매계획과 비교하여 규정된 일양분포에 대해 평균 2.28%, 규정된 베타분포에 대해 평균 1.59%, 규정된 삼각분포에 대해 평균 3.67%의 총 비용 감소를 보였다.
- 2) 리스크를 고려한 구매계획의 효과는 공급능력 변동비율의 확률분포 종류가 아니라, 모수에 의해 정의되는 확률분포 형상에 영향을 받았다. 즉, 공급자에서 사건 발생 시 공급능력이 크게 영향을 받을수록 리스크를 고려한 구매계획에 의한 총 비용 감소효과가 컸다.
- 3) 리스크를 고려한 구매계획은 실제 수요 보다 더 많은 양을 주문하여 공급능력의 변동을 대비함으로써 특별구매 수량을 감축하였으나, 구매비용, 재고유지비용, 수송비용이 증가하였다. 초과 주문량은 리스크에 의한 공급능력의 감소비율과 양의 상관관계를 보였다.
- 4) 리스크를 무시한 구매계획은 공급자의 리스크 발생으로 인해 실제 공급량이 줄어들어 모든 규정된 확률분포에서 많은 양의 특별구매가 발생하였다.
- 5) 공급능력 변동에 영향을 받을 만큼 수요가 크지 않는 경우, 리스크를 고려한 구매계획은 불필요한 초과주문으로 인해 오히려 총비용이 증가하여 그 효과가 제한적이었다.
- 6) 리스크를 고려한 구매계획의 총 비용 감소효과는 리스크 발생확률이 커지고 공급능력 감소비율이 커짐에 따라 대략 선형으로 증가하였다. 두 요인 중에서 공급능력 감소비율의 크기가 더 큰 영향을 미쳤다.

본 연구에서는 공급자의 무작위 사건으로 인한 공급능력 변동만을 다루었지만, 향후 과제로서 지진이나 화재와 같은 치명적 사건과 품질, 환율, 수송 등 다른 형태의 무작위 사건으로 인한 리스크가 함께 존재하는 구매계획 문제를 다룰 수 있는 방법론에 대한 연구가 필요하다. 또한, 분석모형에 공급자의 현재 상태에 따라 다음 기의 리스크 발생확률과 리스크 종류별로 리스크 회복기간이 다른 보다 현실적인 상황들을 반영하는 기술에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

- Burke, G. J., Carrillo, J. E., and Vakharia, A. J. (2009), Sourcing Decisions with Stochastic Supplier Reliability and Stochastic Demand, *Production and Operations Management*, **18**(4), 475-484.
- Cavusgil, S. T. and Deligonul, S. (2012), Exogenous Risk Analysis in Global Supplier Networks : Conceptualization and Field Research Findings, *Information Knowledge Systems Management*, **11**, 131-149.
- Cucchiella, F. and Gastaldi, M. (2006), Risk Management in Supply Chain : a Real Option Approach, *Journal of Manufacturing Technology Management*, **17**(6), 700-720.
- Dekker, H. C., Sakaguchi, J., and Kawai, T. (2013), Beyond the Contract : Managing Risk in Supply Chain Relations, *Management Accounting Research*, **24**, 122-139.
- Federgruen, A. and Yang, N. (2012), *Supply Chain Management Under Simultaneous Supply and Demand Risks*, Gurnani, H., Mehrotra, A., and Ray, S., eds., *Supply Chain Disruptions : Theory, and Practice of Managing Risk*, Editors, Springer, New York, USA.
- Feng, Q. (2010), Integrating Dynamic Pricing and Replenishment Decisions Under Supply Capacity Uncertainty, *Management Science*, **56** (12), 2154-2172.
- Foerstl, K., Reuter, C., Hartmann, E., and Blome, C. (2010), Managing Supplier Sustainability Risks in a Dynamically Changing Environment-Sustainable Supplier Management in the Chemical Industry, *Journal of Purchasing and Supply Management*, **16**, 118-130.
- Gaudenzi, B. and Borghesi, A. (2006), Managing Risks in the Supply Chain Using the AHP Method, *The International Journal of Logistics Management*, **17**(1), 114-136.
- Giannakis, M. and Louis, M. (2011), A Multi-agent Based Framework for Supply Chain Risk Management, *Journal of Purchasing and Supply Management*, **17**, 23-31.
- Gurnani, H., Mehrotra, A., and Ray, S. (2012), *Supply Chain Disruptions : Theory and Practice of Managing Risk*, Springer, New York, USA.
- Hu, X. and Motwani, J. G. (2014), Minimizing Downside Risks for Global Sourcing Under Price-sensitive Stochastic Demand, Exchange Rate Uncertainties, and Supplier Capacity Constraints, *International Journal of Production Economics*, **147**, Part B, 398-409.
- Jung, K., Lim, Y., and Oh, J. (2011), A Model for Measuring Supplier Risk : Do Operational Capability Indicators Enhance the Prediction Accuracy of Supplier Risk?, *British Journal of Management*, **22**, 609-627.
- Jüttner, U., Peck, H. and Christopher, M. (2013), Supply Chain Risk Management : Outlining an Agenda for Future Research, *International Journal of Logistics Research and Applications*, **6**(4), 197-210.
- Kanyoma, K. E., Khomba, J. K., Sankhulani, E. J., and Hanif, R. (2013), Sourcing Strategy and Supply Chain Risk Management in the Healthcare Sector : A Case Study of Malawi's Public Healthcare Delivery Supply Chain, *Journal of Management and Strategy*, **4**(3), 16-26.
- Kasemset, C., Wannagoat, J., Wattanutchariya, W., and Tippayawong, K. Y. (2014), A Risk Management Framework for New Product Development : A Case Study, *Industrial Engineering and Management Systems*, **13**(2), 203-209.
- Klibi, W. and Martel, A. (2012), Scenario-based Supply Chain Network Risk Modeling, *European Journal of Operational Research*, **223**, 644-658.
- Lavastre, O., Gunasekaran, A., and Spalanzani, A. (2012), Supply Chain Risk Management in French Companies, *Decision Support Systems*, **52**, 828-838.
- Lockamy III, A. and McCormack, K. (2012), Modeling Supplier Risks Using Bayesian Networks, *Industrial Management and Data Systems*, **112**(2), 313-333.
- Manuj, I. and Mentzer, J. T. (2008), Global Supply Chain Risk Management, *Journal of Business Logistics*, **29**(1), 133-155.
- Meena, P. L. and Sarmah, S. P. (2013), Multiple Sourcing Under Supplier Failure Risk and Quantity Discount : A Genetic Algorithm Approach, *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, **50**, 84-97.
- Oehmen, J., Ziegenbein, A., Alard, R., and Schonsleben, P. (2009), System-oriented Supply Chain Risk Management, *Production Planning and Control*, **20**(4), 343-361.
- Ohmori, S. and Yoshimoto, K. (2013), A Framework of Managing Supply Chain Disruption Risk Using Network Reliability, *Industrial Engineering and Management Systems*, **12**(2), 103-111.

- Oke, A. and Gopalakrishnan, M. (2009), Managing Disruptions in Supply Chains : A Case Study of a Retail Supply Chain, *The International Journal of Production Economics*, **118**, 168-174.
- Park, K. and Lee, K. (2015), Optimality of the Sole Sourcing under Random Yield, *The Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **41**(3), 324-329.
- Sawik, T. (2014), Joint Supplier Selection and Scheduling of Customer Orders under Disruption Risks : Single and dual Sourcing, *Omega*, **43**, 83-95.
- Schmitt, A. J. and Singh, M. (2012), A Quantitative Analysis of Disruption Risk in a Multi-echelon Supply Chain, *International Journal of Production Economics*, **139**, 22-32.
- Sofyalıoğlu, Ç. and Kartal, B. (2012), The Selection of Global Supply Chain Risk Management Strategies by Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process : A Case from Turkey, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **58**, 1448-1457.
- Srinivasan, M., Mukherjee, D., and Gaur, A. S. (2011), Buyer-supplier Partnership Quality and Supply Chain Performance : Moderating Role of Risks, and Environmental Uncertainty, *European Management Journal*, **29**, 260-271.
- Sun, J., Matsui, M., and Yin, Y. (2012), Supplier Risk Management : An Economic Model of P-chart Considered Due-date and Quality Risks, *International Journal of Production Economics*, **139**, 58-64.
- Takata, S. and Yamanaka, M. (2013), BOM Based Supply Chain Risk Management, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **62**, 479-482.
- Tang, O. and Nurmaya, M. S. (2011), Identifying Risk Issues and Research Advancements in Supply Chain Risk Management, *International Journal of Production Economics*, **133**(1), 25-34.
- Thun, J. H., Druke, M., and Hoenig, D. (2011), Managing Uncertainty- An Empirical Analysis of Supply Chain Risk Management in Small and Medium-sized Enterprises, *International Journal of Production Research*, **49**(18), 5511-5525.
- Thun, J. H. and Hoenig, D. (2011), An Empirical Analysis of Supply Chain Risk Management in the German Automotive Industry, *International Journal of Production Economics*, **131**, 242-249.
- Tummala, R. and Schoenherr, T. (2011), Assessing and Managing Risks Using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP), *International Journal of Supply Chain Management*, **16**(6), 474-483.
- Vanany, I., Zailani, S., and Pujawan, N. (2009), Supply Chain Risk Management : Literature Review and Future Research, *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, **2**(1), 16-33.
- Xanthopoulos, A., Vlachos, D., and Iakovou E. (2012), Optimal News-vendor Policies for Dual-sourcing Supply Chains : A Disruption Risk Management Framework, *Computers and Operations Research*, **39**(2), 350-357.
- Xia, D. and Chen, B. (2011), A Comprehensive Decision-making Model for Risk Management of Supply Chain, *Expert Systems with Applications*, **38**, 4957-4966.
- Yeo, W. M. and Yuan, X. (2011), Optimal Inventory Policy with Supply Uncertainty and Demand Cancellation, *European Journal of Operational Research*, **211**, 26-34.
- You, F., Wassick, J. M., and Grossmann, I. E. (2009), Risk Management for a Global Supply Chain Planning Under Uncertainty : Models and Algorithms, *American Institute of Chemical Engineers*, **55**(4), 931-946.
- Yu, H., Zeng, A. Z., and Zhao L. (2009), Single or Dual Sourcing : Decision-making in the Presence of Supply Chain Disruption Risk, *Omega*, **37**, 788-800.

<부록> 규정된 베타분포와 삼각분포에 대한 리스크 상태 및 회복상태의 기대 공급량 추정식 유도과정

A. 베타분포

(i) 리스크 상태

For $0.7M_s \leq Q_{st} < 0.9M_s$,

$$\begin{aligned} E^R(Q_{st}) &= \int_{0.7}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.9} Q_{st} f(x) dx \\ &= \int_0^{\frac{Q_{st}-0.7M_s}{0.2M_s}} M_s (0.7+0.2\theta) g(\theta) d\theta + Q_{st} \left\{ \int_{\frac{Q_{st}-0.7M_s}{0.2M_s}}^1 g(\theta) d\theta \right\} \\ &= M_s \int_0^{\frac{Q_{st}-0.7M_s}{0.2M_s}} (0.7+0.2\theta) \frac{\theta^4(1-\theta)}{B(5,2)} d\theta + Q_{st} \left\{ \int_{\frac{Q_{st}-0.7M_s}{0.2M_s}}^1 \frac{\theta^4(1-\theta)}{B(5,2)} d\theta \right\} \end{aligned}$$

여기서 $B(5, 2)$ 는 complete beta function으로 다음과 같이 계산된다.

$$B(5, 2) = \int_0^1 t^4(1-t) dt = \frac{1}{30}$$

$B(5, 2)$ 의 값을 식 (1)에 대입하면,

$$E^R(Q_{st}) = 30M_s \int_0^{\frac{Q_{st}-0.7M_s}{0.2M_s}} (0.7+0.2\theta)(\theta^4-\theta^5) d\theta + 30Q_{st} \left\{ \int_{\frac{Q_{st}-0.7M_s}{0.2M_s}}^1 (\theta^4-\theta^5) d\theta \right\}$$

For $0.9M_s \leq Q_{st}$,

$$\begin{aligned} E^R(Q_{st}) &= \int_{0.7}^{0.9} x M_s f(x) dx = \int_0^1 M_s (0.7+0.2\theta) g(\theta) d\theta \\ &= M_s \int_0^1 (0.7+0.2\theta) \frac{\theta^4(1-\theta)}{B(5,2)} d\theta \end{aligned}$$

(ii) 회복상태

For $0.9M_s \leq Q_{st}$

$$\begin{aligned} E^H(Q_{st}) &= \int_{0.9}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^1 Q_{st} f(x) dx \\ &= \int_0^{\frac{Q_{st}-0.9M_s}{0.1M_s}} M_s (0.9+0.1\theta) g(\theta) d\theta + Q_{st} \left\{ \int_{\frac{Q_{st}-0.9M_s}{0.1M_s}}^1 g(\theta) d\theta \right\} \\ &= M \int_0^{\frac{Q_{st}-0.9M}{0.1M}} (0.9+0.1\theta) \frac{\theta^4(1-\theta)}{B(5,2)} d\theta + Q_{st} \left(\int_{\frac{Q_{st}-0.9M}{0.1M}}^1 \frac{\theta^4(1-\theta)}{B(5,2)} d\theta \right) \end{aligned}$$

B. 삼각분포

(i) 리스크 상태

삼각분포의 하한은 0.7, 상한은 0.9, 최빈값은 0.74이므로, $f(x)$ 는 구간에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.7 \\ \frac{2(x-0.7)}{0.008} & 0.7 \leq x \leq 0.74 \\ \frac{2(0.9-x)}{0.032} & 0.74 \leq x \leq 0.9 \\ 0 & 0.9 < x \end{cases}$$

For $0.7M_s \leq Q_{st} < 0.74M_s$,

$$\begin{aligned} E^R(Q_{st}) &= \int_{0.7}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.74} Q_{st} f(x) dx + \int_{0.74}^{0.9} Q_{st} f(x) dx \\ &= M_s \left\{ \int_{0.7}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} \frac{2x(x-0.7)}{(0.2)(0.04)} dx \right\} + Q_{st} \left\{ 1 - \int_{0.7}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} f(x) dx \right\} \end{aligned}$$

For $0.74M_s \leq Q_{st} < 0.9M_s$,

$$\begin{aligned} E^R(Q_{st}) &= \int_{0.7}^{0.74} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.74} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.9} Q_{st} f(x) dx \\ &= M_s \left\{ \int_{0.7}^{0.74} \frac{2x(x-0.7)}{0.008} dx \right\} + M_s \left\{ \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.74} \frac{2x(0.9-x)}{0.032} dx \right\} + Q_{st} \left\{ \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.9} \frac{2(0.9-x)}{0.032} dx \right\} \end{aligned}$$

For $0.9M_s \leq Q_{st}$,

$$E^R(Q_{st}) = \int_{0.7}^{0.9} x M_s f(x) dx = M_s \left(\frac{0.7+0.74+0.9}{3} \right) = 0.78M_s$$

(ii) 회복상태

삼각분포의 하한은 0.9, 상한은 1.0, 최빈값은 0.92이므로, $f(x)$ 는 구간에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.9 \\ \frac{2(x-0.9)}{0.002} & 0.9 \leq x \leq 0.92 \\ \frac{2(1-x)}{0.008} & 0.92 \leq x \leq 1.0 \\ 0 & 1.0 < x \end{cases}$$

For $0.9M_s \leq Q_{st} < 0.92M_s$,

$$\begin{aligned} E^H(Q_{st}) &= \int_{0.9}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.92} Q_{st} f(x) dx + \int_{0.92}^1 Q_{st} f(x) dx \\ &= M_s \left\{ \int_{0.9}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} \frac{2x(x-0.9)}{0.002} dx \right\} + Q_{st} \left\{ 1 - \int_{0.9}^{\frac{Q_{st}}{M_s}} f(x) dx \right\} \end{aligned}$$

For $0.92M_s \leq Q_{st} \leq M_s$,

$$\begin{aligned} E^H(Q_{st}) &= \int_{0.9}^{0.92} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.92} x M_s f(x) dx + \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^1 Q_{st} f(x) dx \\ &= M_s \left\{ \int_{0.9}^{0.92} \frac{2x(x-0.9)}{0.002} dx \right\} + M_s \left\{ \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^{0.92} \frac{2x(1-x)}{0.008} dx \right\} + Q_{st} \left\{ \int_{\frac{Q_{st}}{M_s}}^1 \frac{2(1-x)}{0.008} dx \right\} \end{aligned}$$