

정기발주 재고모형에서 공급자 수율 정보 공유의 기대효과 분석

민 대 기*†

Analysis of the Value of Yield Information under Periodic
Review Inventory System

Daiki Min*

■ Abstract ■

The objective of this study is to evaluate the effects of sharing uncertain yield information with a downstream supply chain player. We are interested in understanding how the amount of yield uncertainty affects the supply-side benefits and/or costs, which has not been considered in the literature, in addition to the customer-side benefits. With that purpose, this work evaluates a supplier who provides yield information in comparison with another supplier who shares no information. We simulate an order-up-to type heuristic policy that is adapted from the literature and reasonably modified to represent yield information sharing with error. From the simulation study, we argue that the customer would experience cost reduction, but the cost for supplier's inventory is increasing when sharing yield information. Furthermore, the amount of benefits and costs are situational and affected by level of yield uncertainty and demand variance. Based on the simulation study, we finally make several recommendations for the supply-side approaches to yield information sharing.

Keyword : Yield Uncertainty, Information Sharing, Information Error, Inventory Model

논문접수일 : 2011년 02월 11일 논문게재확정일 : 2011년 06월 30일

논문수정일(1차 : 2011년 05월 17일)

* 이화여자대학교 경영학과

† 교신저자

1. 서 론

기존의 많은 연구를 통하여 하위흐름 공급사슬(downstream supply chain)의 수요정보(demand information)를 상위흐름 참여자(upstream supply chain player)와 공유함으로써 불확실성을 크게 줄일 수 있음은 잘 알려진 사실이다[17]. 실제로 많은 제조업체들이 공급사슬 비용의 감소와 고객 서비스 향상을 목적으로 정보시스템을 활용하여 공급자와 수요정보를 공유하고 있다[5, 10]. 수요 정보가 내포하고 있는 불확실성의 감소 내지 수요 정보의 공유라는 측면에서 공급자재고관리(Vendor Managed Inventory; VMI), 협력적 계획, 예측, 보충(Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment; CPFR), 신속대응(Quick Response; QR)과 같은 공급사슬 운영전략이 활용되고 있다. 하위흐름 수요정보와 관련한 불확실성과 정보공유에 대한 많은 연구와 달리 상위흐름, 즉 공급자와 연계된 불확실성(supply uncertainty)에 대응하기 위한 공급정보(supply information)의 공유에 대한 연구는 상대적으로 많이 이루어지지 않았다[2].

공급자 측면에서의 불확실성은 공급 중단(supply interruption), 리드타임 불확실성(lead-time uncertainty), 수율 불확실성(yield uncertainty) 등의 세 가지 유형으로 구분할 수 있는데 본 연구에서는 수율 불확실성에 초점을 맞추도록 한다. 공급 중단은 공급이 완전히 불가능한 상황임에 비하여 수율 불확실성은 공급자로부터 받는 재고의 양이 주문량과 같지 않고 불확실하게 결정되는 상황을 의미한다. 수율 불확실성은 생산 용량, 생산 수율, 재고부족 등 다양한 원인에 의하여 발생한다[18]. 예를 들어, Garvirneni[7]에 의하면 반도체 생산 공정에서 수율에 의한 손실(yield loss)이 30%~50%에 이르는 것으로 보고되었다.

수율 불확실성을 고려한 재고 모형에 대한 연구는 기존 문헌에서 많이 찾아볼 수 있다[1, 4, 8, 9, 12, 14, 16, 18, 19]. 상세한 고려사항은 논문마다 다르지만 대부분의 논문이 수율 불확실성과 관련된 요소

를 Newsvendor 모델 구조에 반영하여 최적의 주문 발주량을 결정에 위한 해법을 제시하고 있다. 수율 불확실성을 고려한 재고 정책과 관련한 광범위한 문헌 연구는 Yano and Lee[18]의 논문을 참조하도록 한다.

불확실한 수율(random yield)을 고려한 문제에 대한 연구를 통하여 다양한 주문 발주정책과 관련 휴리스틱이 많이 제시되었지만, 불확실한 수율 정보의 공유에 대한 연구는 거의 존재하지 않는다. Garvirneni[7]는 상위흐름의 수율정보가 가용한 환경을 고려하여 생산계획을 수립하기 위한 수리모형(mathematical programming)을 제시하고 효율적인 해법을 제시하였다. 하지만 수율정보 공유에 중점을 두기 보다는 수율정보가 가용한 상황을 고려한 생산계획 문제에 초점을 두었다. 수율정보 공유에 의한 기대효과는 Choi et al.[3]에 의하여 제시되었는데 다단계 생산 공정에서 발생하는 수율 손실 정보를 공유하는 경우 하위흐름 공급사슬 참여자인 제조업체, 즉 고객의 비용이 감소하는 것을 시뮬레이션 연구를 통하여 확인하였다.

기존의 연구는 대부분 수율 불확실성을 고려한 최적의 주문발주량 결정에 중점을 두고 있다. 수율정보 공유의 효과와 관련하여 유일한 연구결과를 제시한 Choi et al.[3]의 연구는 고객의 비용감소만을 분석하였다. 본 논문에서는 Choi et al.[3]의 연구를 확장하여 수율 불확실성이 존재하는 상황에서 수율정보 공유에 따른 고객의 기대효과이외에 공급자 측면에서의 정보 공유 효과와 공급자가 제공하는 수율 정보에 존재하는 정보오류의 영향을 분석하였다. 우선 수율정보 공유에 따른 고객의 비용감소 효과를 분석하기 위하여 수율의 변동성과 정보공유 여부가 다른 두 개의 공급자를 고려하였다. 수율 불확실성은 매우 작지만(즉, 수율의 변동성이 매우 작은 경우) 정보공유를 하지 않는 공급자와 수율정보를 공유하지만 수율 불확실성이 커서 매 기간 큰 범위로 수율이 변동하는 공급자가 있을 때 고객의 비용 감소 측면에서 두 공급자의 경쟁력을 비교하였다. 둘째, 수율정보에 내포하는 오류의 영

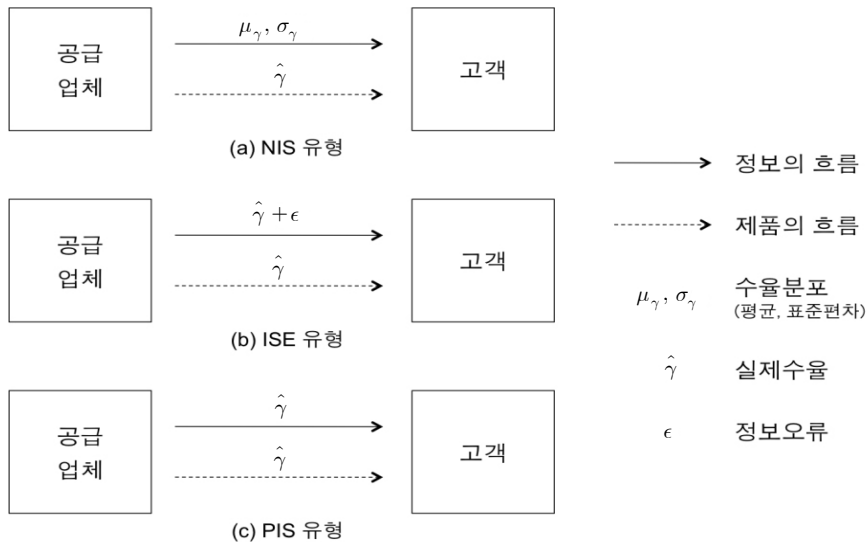
향을 분석하기 위하여 고객에게 제공하는 수율 정보에 일정 수준의 오류가 존재할 때 고객의 비용에 어떠한 영향을 주는가를 고려하였다. 또한 수율의 변동성에 따른 개별 비용 요소의 변화를 분석하여 수율정보 공유에 의한 효과의 동인이 어디에 있는지 분석하였다. 마지막으로 수율정보를 고객에게 제공하는 경우 공급자 측면에서 발생하는 비용의 변화를 분석하였다. 하위흐름 공급사슬의 수요 변화(즉, 고객이 경험하는 수요)와 수율의 불확실성 수준에 따라 공급자의 비용과 고객의 비용 변화를 분석함으로써 수율정보 공유의 효과를 분석하였다. 이와 같이 다양한 환경에서의 수율정보 공유 효과를 분석함으로써 공급자의 수율정보 공유와 관련한 제안을 도출하고자 한다.

다음 장에서 본 논문에서 고려하는 문제와 관련 수리 모형을 제시하였다. 단일 제품, 단일 공급자, 단일 고객으로 구성된 직렬 공급사슬에서 고객은 불확실한 수요와 수율을 고려하여 주문량을 결정한다. 이 문제를 본 연구에서는 수율 불확실성을 고려한 다기간 스토캐스틱 동적계획법(multi-period stochastic dynamic programming)을 이용하여 제시하였다. 하지만 일반적으로 수율 불확실성을 고려하

는 경우 다기간 문제의 최적해를 구하는 것은 매우 어렵고 문제 크기가 커지는 경우 불가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 주문량 결정을 위하여 Bollapragada and Morton[1]가 제안한 NLH-1 휴리스틱을 수정하여 제시하였다. 마지막으로 시뮬레이션 실험을 통하여 수율 정보의 공유 기대효과와 정보오류의 영향 등을 분석하도록 한다.

2. 수리 모형

본 연구에서 고려하는 수율 불확실성이 존재하는 환경에서의 정기발주 재고주문 문제는 다음과 같은 수리 모형으로 제시된다. 사전에 정의된 재주문 시점에 고객은 현재의 재고 수준, 예측 수요, 수율 등을 고려하여 주문량을 결정한다. 리드타임을 고려하지 않으므로 주문한 재고는 바로 가용하지만 수율의 불확실성에 의하여 고객은 주문량 중 일부만을 공급받는다. 여기서 수율은 주문량과 실제 공급 받은 재고의 양 사이의 비율로 확률 분포에 의하여 결정 된다[1, 3, 6, 8, 18]. 따라서 수율 불확실성이 존재할 때 수율은 0과 1사이의 값을 갖는 확률변수가 된다. 재주문 시점 사이 기간 동안 수요는 독립



[그림 1] 수율정보 공유에 따른 공급자 유형

동일분포(independent and identically distributed; *i.i.d.*)를 따라 발생한다고 가정한다. 또한 수요 분포와 수율 분포는 서로 독립이며, 전 기간에 걸쳐 정상과정(stationary process)을 따르는 것으로 가정하였다.

매 기간 말에 수요에 대응하고 재고가 남은 경우 재고유지 비용(inventory holding cost)이 발생하며, 충족되지 않은 수요가 존재하는 경우, 즉 미납주문(backorder)에 대하여 비용이 발생한다. 수율을 고려하는 경우 주문비용을 정의할 때 두 가지 방법을 고려할 수 있는데, 주문량을 기준으로 고려하는 경우와 실제 공급받은 재고량을 기준으로 주문비용을 계산하는 경우이다. 두 가지 계산방법에 차이가 존재하지만 최적 주문량에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있으며[9], 본 논문에서는 실제 공급받은 재고량을 기준으로 주문비용을 계산하였다. 최적 주문량은 재고유지 비용, 미납주문 비용 그리고 주문비용으로 구성된 총 기대비용을 최소로 하는 주문량으로 결정된다. 본 연구에서는 이 문제를 다기간 스토캐스틱 동적계획법으로 구성하였다.

수율 정보의 공유여부를 기준으로 본 논문에서는 두 가지 유형의 공급자를 고려하였다. 첫 번째 유형은 공급자가 수율정보를 공유하지 않는 경우이며, NIS(No Information Sharing)로 표시하도록 한다. 주문량을 결정할 때 정확한 수율 정보가 없으므로 앞서 문헌연구에서 언급한 불확실한 수율을 고려한 재고모형과 동일한 형태를 갖는다. 두 번째 유형의 공급자는 수율정보를 공유하는 경우이다. 고객은 주문량을 결정할 때 정확한 수율 정보를 제공받으므로 수율은 더 이상 확률변수로 고려되지 않는다. 본 논문에서는 수율 정보를 공유하는 경우 정보 오류를 함께 고려하였다. 정보 오류에 의하여 일정 범위 내에서 공급자가 제공한 수율정보와 실제 수율 사이에 차이가 발생한다. 따라서 수율은 확률변수가 아니지만 정보 오류는 일정 범위에서 변동하는 확률변수로 제시된다. 수율 정보에 일정부분 오류가 존재하는 경우 공급자의 유형을 ISE(Information Sharing with Error)로 표시하며, 오류가 없는 완벽

한 정보를 공유하는 경우 PIS(Perfect Information Sharing)로 표시하도록 한다. [그림 1]에 세 유형의 공급자를 도식화하였다.

각 공급업체 유형별로 정기발주 재고문제의 수리모형을 제시하기 전에 본 논문에서 사용한 기호(notation)를 정리하면 다음과 같다. 일부 기호에 있어 기간을 의미하는 t 는 제외하였다.

x : 매 기간 초에 가용한 재고의 양(on-hand inventory)

y : 주문 후 공급받은 재고를 반영한 재고 수준(inventory position)

$Q(x)$: 가용재고의 양이 x 인 경우 주문량

d : 기간 수요를 나타내는 확률 변수

γ : 수율을 나타내는 확률 변수

$\hat{\gamma}$: 실제 수율, 즉 주문량 대비 실제 공급받은 재고의 양

$L(x, Q)$: 가용재고가 x 이고, 주문량이 Q 일때 단기간 비용(single-period cost)

p : 단위 기간, 단위 재고 당 주문잔고 비용

h : 단위 기간, 단위 재고 당 재고유지 비용

c : 단위 재고 당 주문 비용

추가적으로 z 로 표현되는 확률변수의 파라미터를 위하여 다음과 같은 기호를 사용하였다.

\hat{z} : 확률변수 z 의 실현치(realization)

μ_z : 확률변수 z 의 평균(mean)

σ_z : 확률변수 z 의 표준편차(standard deviation)

ρ_z : 확률변수 z 의 변동계수(coefficient of variance)

$F_z(\cdot)$: 확률변수 z 의 cdf(cumulative density function)

$f_z(\cdot)$: 확률변수 z 의 pdf(probability density function)

2.1 NIS 유형에서의 정기발주 재고모형

NIS 유형의 공급자는 주문 발주량과 비교하여 실제 어느 정도의 비율로 공급을 받게 될지에 대한 수율정보를 제공하지 않는다. 따라서 고객의 관점에

서 확률변수 γ 로 표현되는 수율 불확실성이 존재한다. 주문량이 $Q(x)$ 인 경우 실제로 공급받는 재고의 양은 $\gamma Q(x)$ 이 된다. 이 문제는 일반적으로 공급 불확실성을 고려한 재고모형으로 정형화 할 수 있다[8, 11]. 본 연구에서는 Bollapragada and Morton[1]에서 제시한 수리모형을 참조하였다.

주문량 $Q(x)$ 에 대하여 실제로 공급받는 양이 $\gamma Q(x)$ 이므로 단위 기간별 주문비용의 기대값은 $c\mu_\gamma Q(x)$ 가 된다. 재고수준 y 가 수요보다 많은 경우 재고 유지 비용이 발생한다. 현재 가용재고가 x 이고 주문량이 $Q(x)$ 이며 수요가 d 인 경우 재고 유지비용의 기대값은 $E[h(x+\gamma Q(x)-d)^+]$ 이 된다. 이와 반대로 수요가 총 가용재고를 초과하는 경우 $E[p(d-x-\gamma Q(x))^+]$ 의 미납주문 기대비용이 발생한다.

주문비용, 재고유지비용, 미납주문 비용의 합으로 구성된 함수는 잘 알려진 Newsvendor 문제를 구성하는데, Newsvendor 모델의 구조적 성질(structural property)을 활용하기 위하여 일반적으로 재고모형은 주문량 $Q(x)$ 보다 주문 후의 재고수준인 y 에 기반하여 분석을 수행한다. 주문후의 재고수준 y 에 기반하여 공급자의 수율정보가 가용하지 않은 환경에서의 단기간 기대비용함수(single-period expected cost function) $L_{\supseteq S}(x, Q)$ 를 정의하면 다음의 식 (1)과 같다.

$$L_{\supseteq S}(x, Q) = c(y-x) + h \int_{-\infty}^y (y-z)dF_\eta(z) + p \int_y^{\infty} (z-y)dF_\eta(z) \quad (1)$$

식 (1)에서 y 는 $y = x + \mu_\gamma Q$ 로 정의된다. η 는 수요와 수율을 함께 고려한 확률변수로 $\eta = d - (\gamma - \mu_\gamma)Q$ 로 정의된다. 확률변수 η 의 평균은 평균수요와 동일하지만, 표준편차 σ_η 는 확률변수 γ 에 의하여 수요의 표준편차 σ_d 보다 증가함을 알 수 있다. 즉, 수율의 불확실성에 의하여 수정된 수요분포 η 의 분산이 증가함을 알 수 있다. 예를 들어 수요와 수율 확률변수가 모두 정규분포를 따르는 경우 η 의 분산은 $\sigma_d^2 + Q^2\sigma_\gamma^2$ 이 된다.

결국 식 (1)은 수정된 수요분포 $F_\eta(\cdot)$ 를 고려한 Newsvendor 모델이 되며, 잘 알려진 바와 같이 식 (1)은 y 에 대하여 convex인 성질을 갖는다. $L_{NIS}(x, Q)$ 를 최소화하는 최적해 y^* 는 다음 식에 의하여 결정된다.

$$F_\eta(y^*) = \frac{p}{p+h} \Leftrightarrow Q^* = \frac{F_\eta^{-1}(p/(p+h)) - x}{\mu_\gamma}$$

앞서 제시한 단기간 문제를 스토케스틱 동적계획법을 이용하여 다기간 문제로 확장하도록 한다. 먼저 $g(x)$ 를 무한기간 문제(infinite horizon problem)에서의 가치함수(value function)로 정의하고 할인율(discount factor) $\alpha (\leq 1)$ 를 고려하면 최적화 식(Optimality equation)은 다음과 같이 표현된다.

$$g(x) = \min_Q [c(y-x) + h \int_{-\infty}^y (y-z)dF_\eta(z) + p \int_y^{\infty} (z-y)dF_\eta(z) + \alpha \int_{-\infty}^{\infty} g(y-z)dF_\eta(z)] \quad (2)$$

2.2 ISE/PIS 유형에서의 정기발주 재고모형

NIS 유형의 공급업체를 고려한 수리모형에 기반하여 수율정보를 공유하는 경우의 모형을 제시한다. 즉, 고객의 주문량에 대하여 공급업체는 공급가능한 재고의 양을 수율의 형태로 제공한다. 수율 정보를 정확하게 아는 경우 앞서 고려한 확률변수 γ 대신에 수율의 실현치 $\hat{\gamma}$ 를 사용하게 되는데, 이는 확률변수 η 와 주문후의 재고위치 y 에 변화를 준다. 수율 정보가 가용한 경우를 나타내기 위하여 η 대신에 새로운 확률변수 ζ 를 사용하였다. 확률변수 ζ 와 종속변수 y 는 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = d - \epsilon Q$$

$$y = x + \hat{\gamma} Q$$

ζ 는 수율정보를 반영한 수요를 의미하는데 여기서 ϵ 은 정보 공유에서 발생하는 오류를 의미한다.

예를 들어, 공급자는 주문량 Q 에 대하여 $(\hat{\gamma}+\epsilon)Q$ 의 재고가 공급 가능할 것으로 응대하였으나, 실제로는 $\hat{\gamma}Q$ 의 재고를 제공하게 된다. 여기서 ϵ 은 평균이 0이고 표준편차가 σ_ϵ 인 확률분포를 따르는 것으로 가정한다. 실제로 $\hat{\gamma}Q$ 의 재고를 공급받으므로 주문 후의 재고수준 y 은 ϵ 에 의하여 영향을 받지 않는다. 일반적으로 정보 오류의 분산이 수율 불확실성의 분산보다 작다고 가정할 수 있으므로 ζ 의 분산이 η 의 분산에 비하여 감소한다. ζ 와 y 를 반영하여 수율 정보를 공유하는 상황(즉, ISE 유형의 공급자가)에서의 단기간 기대비용함수는 다음과 같이 제시된다.

$$L_{ISE}(x, Q) = c(y-x) + h \int_{-\infty}^y (y-z) dF_\zeta(z) + p \int_y^\infty (z-y) dF_\zeta(z)$$

$L_{ISE}(x, Q)$ 또한 $L_{INS}(x, Q)$ 와 동일하게 Newsvendor 모델이 되며 단기간 문제에서의 최적 주문량은 다음 식에 의하여 결정된다.

$$F_\zeta(y^*) = \frac{p}{p+h} \Leftrightarrow Q^* = \frac{F_\zeta^{-1}(p/(p+h)) - x}{\hat{\gamma}}$$

ISE 유형의 경우 무한기간 문제가 새로운 확률변수 ζ 이외에는 식 (2)와 동일하게 제시되며, 모든 구조적 성질 또한 동일하게 유지된다. 따라서 이에 대한 논의는 제외하도록 한다.

마지막으로 수율 정보에 오류가 존재하지 않도록 완벽한 수율정보를 공유하는 PIS 유형의 공급자에 대하여 고려한다. 즉, PIS 유형은 ISE 유형의 특별한 경우로 $\sigma_\epsilon = 0$ 인 상황을 의미하는데 이를 표현하기 위하여 새로운 확률변수 ξ 를 사용한다. 수율에 대한 완벽한 정보를 갖고 있으므로 ξ 는 결국 수요의 불확실성만을 나타내는 확률변수로 귀결된다. 확률변수 ξ , 단기간 기대비용함수 $L_{INS}(x, Q)$, 그리고 최적 주문량을 정의하면 다음과 같다.

$$\xi = d,$$

$$L_{INS}(x, Q) = c(y-x) + h \int_{-\infty}^y (y-z) dF_\xi(z) + p \int_y^\infty (z-y) dF_\xi(z),$$

$$F_\xi(y^*) = \frac{p}{p+h} \Leftrightarrow Q^* = \frac{F_d^{-1}(p/(p+h))}{\hat{\gamma}}$$

3. 휴리스틱 모형

식 (2)에서 제시한 수율 불확실성을 고려한 다기간 정기발주 재고모형은 Henig and Gerchak[11]에 의하여 처음 제시되었다. 식 (2)에서 가치함수 $g(x)$ 는 후진귀납법(backward induction)을 적용하면 단기간 문제와 유사하게 y (즉 Q)에 대하여 convex임을 증명할 수 있다. 결국 공급 불확실성을 고려한 다기간 문제의 최적해는 일반적인 정기발주 문제와 유사하게 order-up-to-level 정책이 됨을 알 수 있다. 하지만 기존의 여러 연구에 의하면 단순한 order-up-to-level 정책보다 매우 복잡한 형태를 갖는 것을 알 수 있다[8, 14, 18]. 또한 큰 규모의 문제에 대하여 식 (2)의 최적해를 구하는 것은 수요 불확실성에 더하여 수율 불확실성에 의한 확률변수의 증가와 동적계획법의 구조적 특성 등에 의하여 매우 어려운 것으로 알려져 있다[1, 11].

대부분의 다기간 Newsvendor 문제에 있어 근시안적 해(Myopic solution)가 최적해에 가까운 결과를 제시함은 잘 알려져 있는데[15], Bollapragada and Morton[1]은 이와 같은 결과에 기반하여 단기간 최적해를 기반으로 order-up-to-level 정책과 유사한 휴리스틱 기법을 제시하였다. 문제의 크기가 큰 경우 최적해를 구하는 것이 현실적으로 불가능하므로 작은 크기의 문제에 대해서만 해의 성능을 비교하였지만 최대 3%이내의 오차로 NLH-1은 최적해에 가까운 결과를 제시하였다. 본 논문에서 또한 수율 정보 공유의 효과를 검증하기 위하여 다기간 문제의 최적해를 활용하는 대신 Bollapragada and Morton[1]에서 제시한 NLH-1 휴리스틱을 수

정하여 활용하도록 한다. 이번 장에서는 앞서 제시한 세 가지 유형의 공급자, 즉 NIS, ISE, PIS 유형의 공급자를 고려한 주문발주 정책의 휴리스틱 모형을 제시한다.

3.1 NIS 유형에서의 휴리스틱

Bollapragada and Morton[1]에서 제시한 NLH-1 휴리스틱 모형의 경우 기초의 가용재고가 x 인 경우 주문량 $Q(x)$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$Q(x) = \begin{cases} \frac{\mu_d}{\mu_\gamma} + \frac{(S-x)}{\mu_\gamma} & \text{if } x < \mu_d + S \\ 0 & \text{if } x \geq \mu_d + S \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 S 는 안전재고(safety stock)을 의미하는데 평균수요 μ_d 에 S 를 더한 것은 일종의 order-up-to-level을 의미한다. 매 기간 초 현재 가용한 재고의 양이 order-up-to-level, 즉 $\mu_d + S$ 보다 작은 경우 $\mu_d + S - x$ 를 주문한다. 하지만 수율이 1보다 작으므로 order-up-to-level 까지 재고량을 증가시키기 위하여 평균 수율을 반영한다. 하지만 평균 수율을 활용하므로 목표로 한 order-up-to-level보다 적거나 많은 양을 재고를 갖게 될 가능성이 많이 존재한다.

안전재고 수준 S 는 식 (4)에 의하여 결정되는데 여기서 d 와 γ 가 확률변수임을 유의하도록 한다. 따라서 S 는 수요 확률변수와 수율 확률변수를 각각의 평균으로 나눈 후 합(convolution)한 확률변수에 의하여 결정된다.

$$P\{\eta \leq y\} = \frac{p}{p+h} \Leftrightarrow P\left\{ \frac{d}{\mu_d} - \frac{\gamma}{\mu_\gamma} \leq \frac{S}{\mu_d} \right\} = \frac{p}{p+h} \quad (4)$$

수율 확률분포와 수요 확률분포를 모두 정규분포를 가정하면 안전재고 S 는 다음과 같이 결정되는데, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포를 의미한다.

$$S = \mu_d \Phi^{-1}(p/(p+h)) \sqrt{\rho_d^2 + \rho_\gamma^2}$$

3.2 ISE/PIS 유형에서의 휴리스틱

NLH-1 휴리스틱을 수정하여 수율 정보가 공유되는 경우(ISE 또는 PIS)의 주문 발주 정책 휴리스틱을 제시한다. 수율 정보에 오류가 있는 경우(ISE)의 주문 발주량과 정규분포 가정에 기반을 둔 안전재고 S 는 다음 식으로 결정된다.

$$Q(x) = \begin{cases} \frac{\mu_d}{\hat{\gamma}} + \frac{(S-x)}{\hat{\gamma}} & \text{if } x < \mu_d + S \\ 0 & \text{if } x \geq \mu_d + S \end{cases}$$

$$P\{\zeta \leq y\} = \frac{p}{p+h} \Leftrightarrow P\left\{ d - \frac{\mu_d}{\hat{\gamma}} \epsilon \leq S + \mu_d \right\} = \frac{p}{p+h}$$

$$S = \Phi^{-1}(p/(p+h)) \sqrt{\sigma_d^2 + (\mu_d/\hat{\gamma})^2 \sigma_\epsilon^2}$$

위 결과에서 $\sigma_\epsilon \ll \sigma_\gamma$ 을 가정한다면 수율 정보에 오류가 있음에도 불구하고 정보를 공유하는 경우 안전재고 수준을 크게 낮출 수 있다.

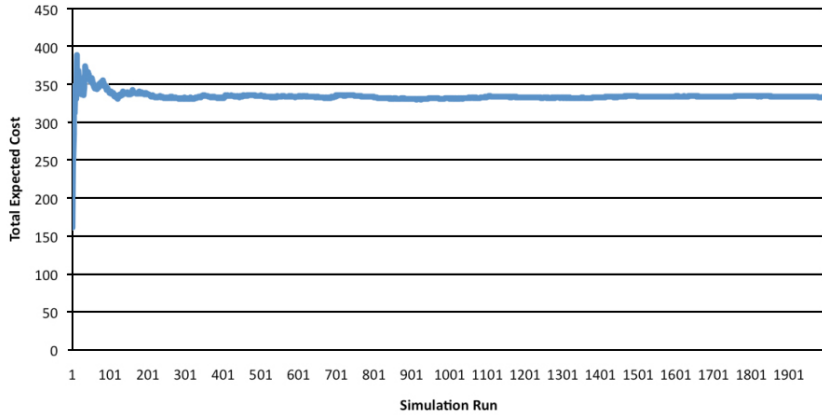
마지막으로 정확한 수율정보공유가 이루어지는 경우를 고려하면, 실제 발생한 수율의 값 $\hat{\gamma}$ 을 활용하여 주문량을 결정한다. 안전재고 S 를 결정함에 있어 수율 불확실성이 더 이상 고려되지 않음에 유의하기 바란다.

$$Q(x) = \begin{cases} \frac{\mu_d}{\hat{\gamma}} + \frac{(S-x)}{\hat{\gamma}} & \text{if } x < \mu_d + S \\ 0 & \text{if } x \geq \mu_d + S \end{cases}$$

$$S = \Phi^{-1}(p/(p+h)) \sigma_d$$

4. 시뮬레이션 실험 설계

수율 정보를 공유함으로써 기대되는 효과를 평가하기 위하여 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 실험의 타당성을 확보하기 위하여 실험은 2000 기간 동안 수행하였으며, 평균 기대비용이 거의 수렴하는 500기간 이후의 결과를 사용하였다([그림 2]). 충분히 긴 시뮬레이션 기간을 적용함으로써 10 회의 적은 반복 횟수에도 충분히 작은 편차 내에서 유의미한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 또한



[그림 2] 시뮬레이션 기간에 따른 총 기대비용의 변화

동일한 수요 분포와 수율 분포에 대하여 일정한 난수(random number stream)를 사용하는 CRN(common random number) 기법을 적용하여 시뮬레이션 결과의 변동을 최소화하였다. 1500기간에 걸쳐 재고수준, 주문 발주량, 수요를 사용하여 주문비용, 재고유지비용, 미납주문 비용을 계산하였다.

시뮬레이션 연구는 NIS, PIS, ISE로 정의된 세 가지 상황에 대하여 수율의 불확실성 수준과 고객 수요의 변동 등 두 가지의 요소를 변화시키며 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 실험에서 사용한 수율의 불

확실성 수준을 <표 1>에 제시하였다. 수율의 불확실성 수준은 동일한 평균에 대하여 수율의 상한과 하한값에 따라서 다섯 단계로 구분하였다. 모든 경우에 대하여 수율은 평균이 0.6이고 표준편차가 0.2인 정규분포를 이용하여 생성하였다. 따라서 실제 수율의 표준편차는 수율의 상한과 하한값에 따라서 결정이 된다. 수율 정보의 오류 수준 또한 상하한 값에 따라서 다섯 단계로 구성하였다. 수율정보의 오류는 평균이 0이고 표준편차가 0.05인 정규분포를 이용하여 생성하였다. 고객의 수요는 평균이 100인

<표 1> 수율의 불확실성

공급자 유형	수율의 불확실성 수준	수율의 변동범위		수율	
		하한	상한	평균	표준편차
NIS / PIS	1	0.60	0.60	0.60	0.00
	2	0.50	0.70	0.60	0.06
	3	0.40	0.80	0.60	0.11
	4	0.30	0.90	0.60	0.15
	5	0.20	1.00	0.60	0.17
	수율정보의 오류 수준	수율정보의 오류 범위		수율정보의 오류	
		하한	상한	평균	표준편차
ISE	1	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	-0.05	0.05	0.00	0.01
	3	-0.10	0.10	0.00	0.02
	4	-0.15	0.15	0.00	0.04
	5	-0.20	0.20	0.00	0.05

정규분포를 가정하였으며, 표준편차를 0에서 30까지 5단위로 변화시키며 수요의 변동에 따른 영향을 분석하였다. 주문량 결정을 위한 휴리스틱은 수요, 수율, 그리고 수율 정보의 오류를 나타내는 세 개의 확률변수가 관련되어 있는데 모형의 단순화와 계산의 편의성을 위하여 모두 정규분포를 가정하도록 한다. 평균수율과 평균수요는 Choi et al.[3]의 실험 자료를 참조하여 사용하였다.

단위 재고유지비용과 미납주문 비용의 비율, 즉 p/h 는 주문 발주량 결정에 필요한 안전재고 수준 S 를 결정하는데 매우 중요한 요소이다. Choi et al.[3]의 연구에 의하면 p/h 비율이 5보다 큰 경우에는 p/h 비율의 변화가 총 비용의 변화에 영향이 거의 없는 것으로 제시되었다. 따라서 p/h 비율은 5로 결정하여, 재고유지비용보다 미납주문비용에 더 큰 비중을 두었다. 총 기대비용을 계산하기 위하여 단위 주문비용과 단위 재고유지비용은 임의로 각각 2와 5로 결정하였다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 수율정보 공유에 의한 고객의 비용 변화

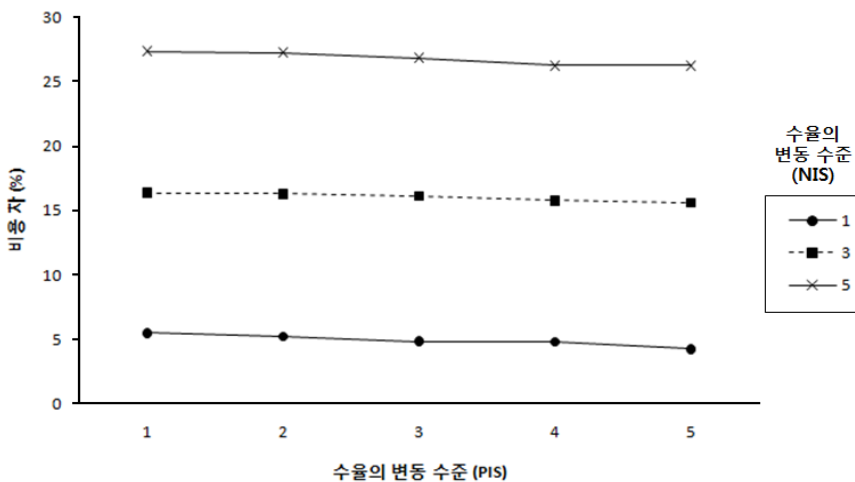
수율정보공유의 기대효과와 공유정보의 오류에 의

한 영향을 평가하기 위하여 NIS 유형을 기준으로 하여 PIS와 ISE 유형을 적용했을 때의 비용차(cost gap)를 평가척도로 활용하였다.

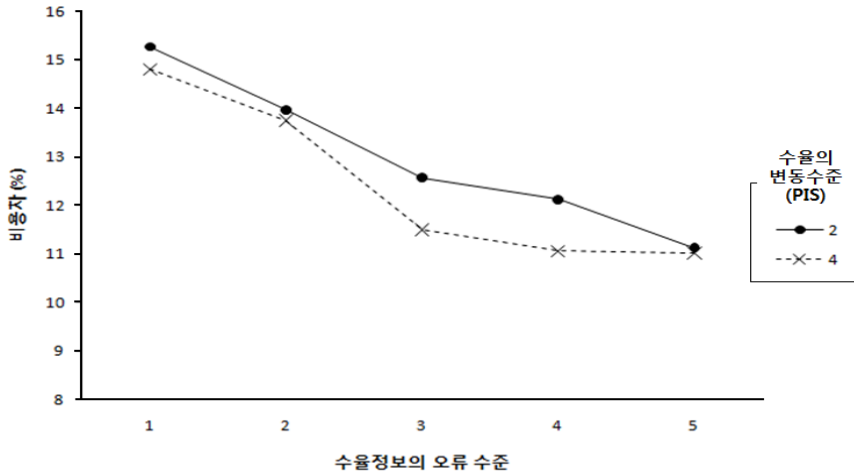
$$\text{Cost GAP}(\%) = \frac{\text{Cost of NIS Model} - \text{Cost of PIS or ISE Model}}{\text{Cost of NIS Model}}$$

정보공유의 효과를 분석하기 위하여 NIS 유형의 공급자와 PIS 유형의 공급자를 비교 평가하였다. 1, 3, 5세 단계의 NIS 유형의 수율 불확실성과 다섯 단계의 PIS 유형의 수율 불확실성 등 총 15개의 시나리오에 대하여 실험을 수행하였다. [그림 3]은 수율의 불확실성과 정보공유의 기대효과에 대한 실험 결과를 보여준다.

[그림 3]의 실험 결과에 의하면 모든 값이 양의 값을 갖는데 이는 수율정보를 공유함으로써 고객의 총 기대비용을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 수율정보를 공유하는 경우 수율의 변동 수준이 증가할수록 비용개선의 정도는 감소하였지만 큰 차이를 보이지는 않았다. 하지만 수율정보를 공유하지 않는 경우, 즉 NIS 유형의 변동 수준이 증가할수록 비용개선 효과가 증가하였다. 예를 들어, PIS의 변동 수준이 1일 때 NIS의 변동수준이 1에서 5로 증



[그림 3] 수율의 불확실성과 정보공유의 효과



[그림 4] 정보오류의 영향

가하는 경우 비용차이는 약 5%에서 25% 이상으로 증가한다. 수율의 변동 범위가 크지 않고 안정적인 경우 수율 정보를 공유하지 않더라도 수율 정보를 공유하는 경우와 비용의 차이는 크지 않았다. 결국 수율이 큰 범위에서 변동하더라도 수율 정보가 가용한 경우 고객의 비용을 감소시킬 수 있음을 의미한다.

[그림 4]는 수율정보를 공유하되 정보에 오류가 있는 경우 정보오류의 영향을 보여준다. 시뮬레이션 실험 결과를 보면 공급자가 제공하는 수율정보와 실제 수율과의 차이가 증가할수록, 즉 수율정보의 오류 수준이 증가할수록 정보공유를 통한 비용개선의 효과가 떨어지는 것을 알 수 있다. 수율의 변동 수준을 2와 4로 변경시켰을 때 비용의 개선정도는 거의 유사한 수준으로 변화하였다. 이는 정보 오류의 영향이 수율의 불확실성 수준과 관계없이 유사하게 발생하는 것을 의미한다.

5.2 비용구조 분석

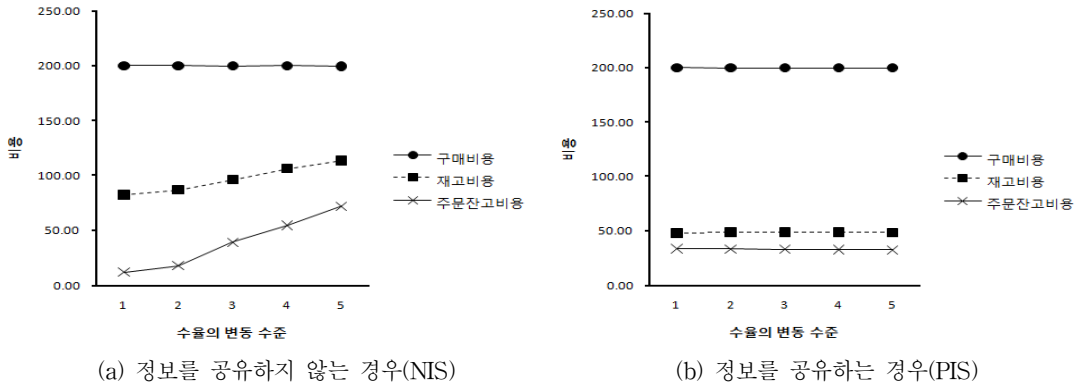
앞서 공급자가 수율 정보를 공유하는 경우 고객은 비용을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이번 장에서는 고객의 구매비용, 재고유지비용, 미납주문비용 등의 각 비용 요소를 분석하여 수율 정보의 공유효과가 어느 요소에서 이루어지는 가를 살펴보고

록 한다.

[그림 5]는 수율정보를 공유하는 경우와 공유하지 않는 경우에 대하여 수율의 변동 수준에 따른 비용 변화를 제시한다. 정보를 공유하는 경우에는 수율의 변동 수준과 관계없이 모든 비용 요소가 일정 수준을 유지하였다. 정보를 공유하지 않는 경우를 보면 구매비용은 모든 경우에 있어 일정 수준에서 변화하지 않았다. 반면에 재고비용과 미납주문비용은 수율의 변동성이 증가할수록 증가하는데, 이는 정보 공유에 의한 비용개선의 동인(driver)이 재고와 미납주문의 감소에 의한 것임을 나타낸다.

5.3 수율정보 공유에 의한 공급자의 비용 변화

시뮬레이션 실험결과 확인한 흥미로운 점은 공급자가 수율정보를 제공하는 경우 고객으로부터 받는 평균 주문량과 주문의 변동성이 수율정보를 제공하지 않는 경우와 비교하여 증가한다는 것이다. 예를 들어, 수율의 변동 수준이 3인 경우에 공급자가 수율정보를 제공하지 않는 NIS 유형의 경우 고객 주문량 $Q(x)$ 의 평균과 표준편차가 각각 167.32와 40.46인 것과 비교하여 수율정보를 제공하는 PIS 유형의 경우에는 평균과 표준편차가 173.17과 43.20으로 증가하였다. 공급자가 Newsvendor 비율이 5인 News-

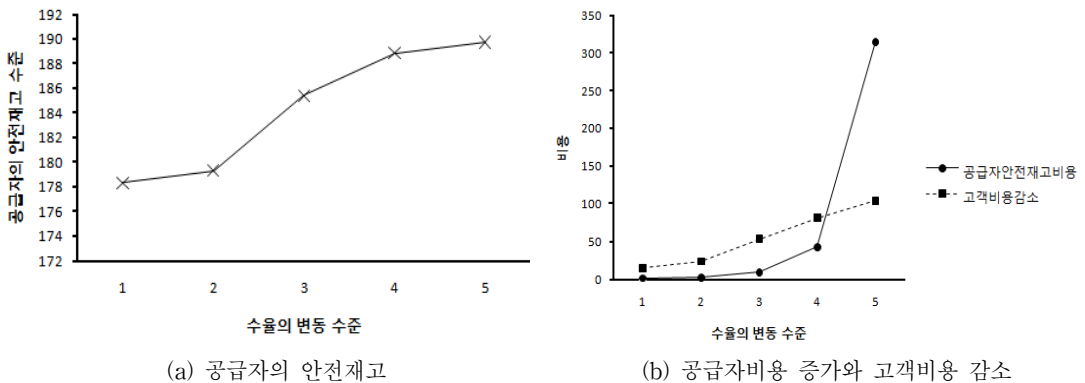


[그림 5] 비용구조의 분석

vendor 모형을 이용하여 안전재고 수준을 결정한다고 가정하면 이와 같은 고객 주문의 변화는 공급자의 안전재고 수준을 증가시킨다. 결국 공급자의 수율정보 공유는 고객의 비용을 감소시키지만 공급자 입자에서는 비용을 증가시키는 요인으로 작용한다.

[그림 6]은 정보를 공유하는 경우 기대되는 고객의 비용감소와 공급자의 안전재고 비용증가를 수율의 변동 수준에 따라 비교한 결과이다. 수율 정보를 제공하는 경우 공급자 측면에서 안전재고의 증가 이외에 부가적인 비용을 고려할 수 있지만 본 연구에서는 안전재고와 관련한 비용만을 고려하였다. 결과를 보면 수율의 변동수준이 증가할수록 공급자의 안전재고 수준은 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데([그림 6](a)), 수율의 변동수준이 1~4인 경우 공

급자의 비용증가가 고객의 비용감소에 비하여 크지 않았다([그림 6](b)). 고객비용의 감소를 공급자의 경쟁력으로 고려한다면 이 경우 수율정보를 제공하는 것이 공급자 측면에서는 적은비용으로 경쟁력을 향상시키는 방안이 될 수 있음을 의미한다. 하지만 수율의 변동수준이 큰 경우에는 공급자의 안전재고비용이 급격히 증가하므로 경쟁력 향상(즉, 고객의 비용감소)을 위하여 매우 큰 비용이 요구됨을 의미하며, 수율정보 공유는 적절한 방안이 아님을 알 수 있다. 하지만 [그림 6](b)에서 안전재고비용의 증가는 단위재고유지비용에 영향을 받은은 명확한 사실이며, 따라서 단위재고유지비용이 매우 작다면 언제나 고객의 비용감소 효과가 더 커지는 결과를 기대할 수 있다.



[그림 6] 수율정보 공유에 의한 공급자의 비용 분석

5.4 수요 변동의 영향

앞서 시뮬레이션 실험결과에서 고객은 수율정보를 공급자가 공유하는 경우 비용을 낮출수 있음을 제시하였다. 이번 장에서는 고객이 경험하는 수요의 변동에 의한 영향을 분석하기 위하여 수요분포의 표준편차를 변화시키며 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 일반적으로 채찍효과에 의하여 수요 변동성이 증가하는 경우 고객의 주문 변동성과 공급자의 안전재고 수준이 증가할 것을 예상하였다. 따라서 수요의 표준편차가 증가하면 PIS 또는 NIS 유형의 공급자와 관계없이 전반적으로 고객의 비용과 공급자의 비용이 증가하게 된다(<표 2>). 하지만 수요의 변동이 더 큰 환경에서 정보 공유의 효과를 클 것이라는 예상과 다르게 수요분포의 표준편차가 증가할수록 수율 정보공유에 의한 개선효과가 감소하는 결과를 확인하였다. <표 2>의 결과를 보면 수율정보공유를 하는 PIS 유형의 비용이 수율정보를 공유하지 않는 NIS 유형에 비하여 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다.

공급자의 안전재고 비용은 수요의 표준편차가 증가하는 경우 지속적으로 상승하였는데, 이는 고객의 주문 변동성이 수요 변동성에 의하여 증가하는 결과에 기인한다. 하지만 NIS와 PIS 두 공급자 유형에서 안전재고 수준의 증가는 크지 않으며 NIS 유형과 비교한 PIS 유형의 안전재고 또한 제한적으로 증가하였다. 전반적으로 수요의 표준편차가 낮

은 경우에는 수율 정보를 공유함으로써 기대하는 고객의 비용감소가 공급자의 안전재고 증가보다 크지만 수요의 표준편차가 증가할수록 비용의 차이(즉, (3)과 (6)의 차이)는 감소함을 알 수 있다. 수요의 변동성이 충분히 큰 경우에는 공급자의 안전재고 비용 증가 수준 (6)이 고객의 비용감소 (3)보다 커지게 된다.

5.5 실험결과의 해석

시뮬레이션 실험결과는 공급자를 선정하는 고객의 입장에서 또는 반대로 경쟁력 제고가 요구되는 공급자의 측면에서 몇 가지 중요한 결과를 제시한다. 첫째, 고객은 언제나 수율 정보를 공유하는 공급자를 선택하는 것이 바람직하다. 수율 정보를 공유하지 않는 NIS 유형 공급자의 수율이 어느 정도 불확실성을 내포하고 있다면, 비록 수율의 변동성이 크더라도 정보를 공유하는 PIS/ISE 유형의 공급자를 선택하는 것이 고객의 비용을 절감한다.

둘째, 공급자는 경쟁력 제고를 목적으로 두 가지 접근 방법을 고려할 수 있다. 우선 공급자 내부적인 측면에서 수율정보공유와 관계없이 수율의 변동을 감소시킴으로써 고객의 비용을 절감시킬 수 있다. 공급자와 고객의 관계 측면에서 살펴보면 내부 개선을 통한 안정적인 수율제공과 관계없이 단순히 수율 정보를 고객에게 제공함으로써 경쟁력을 향상시킬 수 있다. 공급자는 수율의 변동성을 감소시키

<표 2> 수요변동에 따른 효과 : 수율의 변동수준 = 3, 정보의 오류수준 = 3

수요의 표준 편차	고객 비용				공급자 안전재고			
	NIS (1)	PIS (2)	비용차(3) (1)-(2)	개선도	NIS (4)	PIS (5)	재고차 (4)-(5)	비용차(6)
0	308.86	200.00	108.86	35.25	195.82	203.2	7.38	36.9
5	310.42	226.25	84.17	27.11	196.75	203.55	6.80	34.00
10	319.2	253.26	65.94	20.66	196.94	203.48	6.54	32.7
15	336.56	282.3	54.26	16.12	200.91	207.12	6.21	31.05
20	353.31	308.53	44.78	12.67	206.52	212.44	5.92	29.60
25	393.59	358.24	35.35	8.98	214.53	220.47	5.94	29.70
30	440.92	416.28	24.64	5.59	226.68	232.69	6.01	30.05

는 것이 어려운 경우 정보의 오류를 최대한 줄이고 정확한 정보를 공유하기 위하여 노력해야 한다.

마지막으로 수율정보 제공과 관련한 공급자의 의사결정은 공급자의 비용증가와 고객의 비용감소를 비교하여 이루어져야 한다. 수율정보의 공유는 공급자의 재고비용을 증가시키지만 수율의 변동 수준이 낮고 고객 주문의 변동이 적다면 공급자의 비용 상승은 제한적이다. 따라서 이 경우 고객비용 감소가 공급자의 경쟁력을 향상시킨다면 수율정보를 제공하는 것이 바람직할 것이다. 하지만 수율의 변동성과 하위 공급사들의 수요 변동성이 큰 경우라면 수율 정보 제공에 의한 공급자의 비용이 큰 폭으로 상승하게 된다. 결론적으로 공급자는 경쟁력 향상을 목적으로 수율 정보제공을 고려할 수 있으나 하위 공급사들의 수요변화를 파악하고 내부에서 수율의 변동성을 낮추기 위한 노력을 해야 한다.

6. 결 론

본 논문은 수율 불확실성을 고려한 다기간 정기발주 모형에서 수율정보의 공유 효과에 대한 분석을 수행하였다. 일반적으로 수요 불확실성을 고려한 다기간 정기발주 모형은 다기간 스톡케스트 동적계획법으로 표현이 가능하지만 최적해를 구하는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Bollapragada and Morton[1]에서 제시한 NHL-1 휴리스틱을 수율 정보를 공유하는 모델로 확장하여, 공유정보가 정확한 경우와 일부 오류가 존재하는 경우에 대한 휴리스틱 모형을 제시하였다. 제시된 휴리스틱 모형을 기반으로 시뮬레이션 실험을 수행하여 정보 공유의 효과와 정보 오류의 영향에 대하여 분석하였다. 실험 결과 수율 정보 공유는 수율 정보가 공유되지 않는 상황과 비교하여 비용 절감에 큰 효과가 있음을 제시하였다. 하지만 수율 정보 공유의 효과는 수율의 변동성과 정보 오류에 의하여 제한적이다.

실험결과에 따라 수율 불확실성이 존재하는 환경에서 공급자 선정시 수율 정보 공유는 매우 중요한

고려대상이 됨을 알 수 있다. 일반적으로 수율정보를 제공하는 공급자를 선택하는 것이 바람직하지만 정보의 오류가 큰 경우는 제공된 수율정보 보다 수율 분포에 기반한 주문발주가 더 효과적이다. 공급자 또한 수율의 변동성과 제공하는 수율 정보의 오류를 감소시키려는 노력이 필요하다. 수율의 변동성에도 불구하고 정보의 오류가 작은 경우에는 수율 정보를 고객에게 제공함으로써 공급자의 경쟁력을 제고할 수 있다. 하지만 수율의 변동성이 크고 하위호름 공급사들의 수요 변동성이 큰 경우 수율정보의 공유는 고객의 비용감소 보다 더 큰 규모의 공급자 비용을 발생시키는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 몇 가지 방향에서 향후 확장을 고려할 수 있다. 우선 본 논문에서는 수요와 수율의 분포로 정규분포를 가정하였다. 일반적으로 수요의 경우 포아송 분포를 가정하는 것이 일반적이지만 안전재고 S를 계산함에 있어 수율 분포와의 합(convolution)과 역함수를 계산하는 것은 매우 어려운 과정이 된다. 하지만 다양한 환경에서 제시된 휴리스틱이 적절하게 적용가능한지를 평가하기 위해서는 보다 다양한 분포에 대한 고려가 요구된다. 수요와 수율 분포의 형태에 더하여, 단위 재고유지비용과 미납주문비용의 비율, 평균 수율, 평균수요 등의 주문 발주량에 영향을 주는 요소에 대한 감도분석이 요구된다.

본 논문에서는 한 개의 공급자와 한 개의 고객으로 구성된 단순한 직렬 공급사슬을 고려하였다. 향후 두개 이상의 공급자로 구성된 환경에 대한 연구로 확장을 고려할 수 있다. 공급자가 두개 이상인 경우 수율의 불확실성에 의한 위험(risk)을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 공급자가 두개 이상인 경우 수율 정보의 공유의 효과는 단일 공급자 환경과는 다를 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Bollapragada, S. and T.E. Morton, "Myopic heuristics for the random yield problem," *Operations Research*, Vol.47, No.5(1999), pp.713-

- 722.
- [2] Chen, F., Information sharing and supply chain coordination, A.G. de Kok, Graves, eds. *Handbooks in Operations Research and Management Science, Supply Chain Management : Design, Coordination and Operation*, Elsevier, North-Holland, Amsterdam, Vol.11(2004).
- [3] Choi, H.P., J.D. Blocher, and S. Gavirneni, "Value of sharing production yield information in a serial supply chain," *Production and Operations Management*, Vol.17, No.6(2008), pp.614-625.
- [4] Dada, M., N. Petruzzi, and L. Schwarz, "A newsvendor's procurement problem when suppliers are unreliable," *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol.9, No.1 (2007), pp.9-32.
- [5] Efficient Consumer Response Report(ECR), Enhancing consumer value in the grocery industry, Kurt Solomon Associates Inc., Food Marketing Institute, 1993.
- [6] Ehrhardt, R. and L. Taube, "An inventory model with random replenishment quantities," *International Journal of Production Research*, Vol.25(1987), pp.1795-1804.
- [7] Gavirneni, S., *Supply chain management at a chip tester manufacturer*, T. Harrison, H. Lee, J. Neale, eds. *The Practice of Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishing, Norwell, MA, (2003), pp.277-293.
- [8] Gerchak, Y., R.G. Vickson, and M. Parlar, "Periodic production models with variable yield and uncertain demand," *IIE Transactions*, Vol.20(1988), pp.144-150.
- [9] He, Y. and J. Zhang, "Random yield risk sharing in a two-level supply chain," *International Journal of Production Economics*, Vol. 112(2008), pp.769-781.
- [10] Helper, S. and M. Saki, "Supplier relations in Japan and the United States : Are they converging?," *Sloan Management Review*, Vol. 32, No.4(1995), pp.15-28.
- [11] Henig, M. and Y. Gerchak, "The structure of periodic review policies in the presence of random yield," *Operations Research*, Vol.38, No.4(1990), pp.634-643.
- [12] Keren, B., "The single-period inventory problem : Extension to random yield from the perspective of the supply chain," *Omega*, Vol. 37(2009), pp.801-810.
- [13] Lee, H. and C.A. Yano, "Production control in multistage systems with variable yield losses," *Operations Research*, Vol.36, No.2(1988), pp.269-278.
- [14] Li, Q., H. Xu, and S. Zheng, "Periodic-review inventory systems with random yield and demand : Bounds and heuristics," *IIE Transactions*, Vol.40(2008), pp.434-444.
- [15] Morton, T. and D. Pentico, "The finite horizon nonstationary stochastic inventory problem near-myopic bounds, heuristics, testing," *Management Science*, Vol.41, No.2(1995), pp. 334-343.
- [16] Schmitt, A.J. and L.V. Snyder, "Infinite-horizon models for inventory control under yield uncertainty and disruption," *Computers and Operations Research*, In Press, 2010.
- [17] Simchi-Levi, D., P. Kaminsky and E. Simchi-Levi, *Designing and managing the supply chain : concepts, strategies and case studies*, McGraw-Hill, 3rd edition, 2008.
- [18] Yano, C.A. and H. Lee, "Lot sizing with random yield : A review," *Operations Research*, Vol.43, No.2(1995), pp.311-334.
- [19] Wang, Y. and Y. Gerchak, "Periodic review production models with variable capacity, random yield, and uncertain demand," *Management Science*, Vol.42, No.1(1996), pp.130-137.