

A Systematic Approach to the Purchase Dependence

Changkyu Park[†]

College of Business, University of Ulsan

구매 종속적 수요에 대한 접근방법의 고찰

박 창 규[†]

울산대학교 경영대학

Under the situation which customer orders are cancelled unless all products in the order are delivered all at once, this paper concentrates on the purchase dependent demands and explores the systematic approach to implant the purchase dependence into the multi-product inventory model. First, by acknowledging that it is a challenging task to formulate a suitable inventory model for the purchase dependence, we derive the optimal solution condition using an EOQ model and extend the optimal solution condition to periodic review models. Then, through the comparison simulation of four inventory policies regarding several degrees of purchase dependence, we demonstrate that the inventory models which consider the purchase dependence generate less total cost than the inventory models which ignore the purchase dependence. In general, the inventory models which consider the purchase dependence reduce the loss of sales by maintaining more inventories, which results in reducing the total cost. Consequently, the simulation result supports the effectiveness of this paper's approach. In addition, this paper uses the individual order period and joint order period obtained from the EOQ model for the multi-product inventory model. Through the in-depth analysis of comparing the two models, we observe that the model of using the joint order period produces less total cost when the degree of purchase dependence is high, but the model of using the individual order period produces less total cost when the degree of purchase dependence is low.

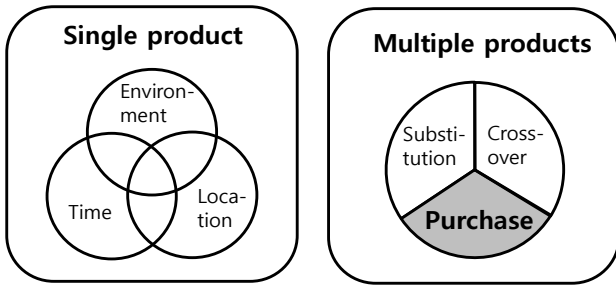
Keywords : Purchase Dependence, Periodic Review Model, Dependent Demand, EOQ

1. 서 론

여러 가지 제품을 구매하려는 고객의 수요가 서로 연관되게 나타나는 현상은 다품목 재고관리시스템에서 자주 발생한다. 그런데 이러한 종속적 수요를 재고관리시스템에서 모형화하기 힘들다는 이유로 수요의 종속성을 무시하고 독립적 수요로 가정하여 제품을 관리하게 되면, 어떤 제품은 불필요하게 많은 재고를 보유하게 될 뿐만 아니라, 주문수준에서 만족스럽지 못한 고객봉사수준

을 보이게 된다[6, 9]. 이런 결과는 고객수요에 대한 신속한 대응과 낮은 원가를 요구하는 오늘날과 같은 치열한 경쟁적 사업환경에서 경쟁열위로 작용할 수 있음을 쉽게 알 수 있다. 따라서 치열한 경쟁적 사업환경에서 경쟁우위를 확보하기 위해서는 종속적 수요에 대한 체계적인 접근이 요구된다.

본 논문은 재고관리시스템에서 발생하는 구매 종속적 수요에 초점을 맞추고 체계적인 재고관리 방안을 연구해 보고자 한다. 우선 본 논문의 관심 대상인 구매 종속적 수요가 다른 형태의 종속적 수요와 어떠한 관계에 있는지를 살펴보면 <Figure 1>과 같이 표현할 수 있다. <Figure 1>은 종속적 수요를 하나의 제품 내에서 발생하는 경우와 다품목 간에서 발생하는 경우로 나누고 있다.



<Figure 1> Classification of Dependent Demands

우선 하나의 제품 내에서 발생하는 종속적 수요를 살펴 보면, 첫째로 고객수요가 환경적 요소에 종속적인 경우가 있다. 여기서 환경적 요소로는 시장경쟁의 정도, 경제상황, 날씨 및 재고 상태 등을 고려할 수 있다[10]. 둘째로는 고객수요가 시간에 따라 종속적으로 발생하는 경우가 있다. 시간에 따른 종속적 수요는 대개 Autoregressive(AR) 모형이나 Moving average(MA) 모형, 또는 AR 모형과 MA 모형을 결합한 Autoregressive moving average(ARMA) 모형으로 표현된다[8, 17]. 셋째로는 고객수요가 장소에 종속적인 경우가 있다. 장소에 따른 종속적 수요는 다수의 소매점이나 재고창고에서 요구하는 수요에서 발생할 수 있다[3, 19]. 넷째로 가능한 종속적 수요는 앞에서 살펴본 종속적 수요들을 결합한 경우이다. 예를 들어, 재고상태와 시간에 동시에 종속적인 수요[17]나 시간과 장소에 동시에 종속적인 수요[4] 등이 있다.

다음으로 발생하는 종속적 수요는 고객수요가 제품 간에 종속성을 보이는 경우이다. 다품목 재고관리시스템에서 발생하는 제품 간의 종속적 수요는 어떤 제품들이 그들 내부의 연관관계 때문에 나타나는 고객수요이다.

첫째로 대체(Substitution) 종속적 수요는 대체 가능한 제품들 간에서 발생한다. 일반적으로 제품 대체는 특정한 제품 카테고리 내에서 어떤 제품에 대한 수요를 만족시키기 위하여 다른 제품을 사용하는 것을 의미한다. 특히 재고관리시스템에서 발생하는 대체수요는 처음에 선호한 제품이 품절되었을 때, 고객이 다른 대안 제품을 선택하는 행위에 의한 수요이다. 최근 대체 종속적 수요에 대한 효과적인 대응이 생산계획, 가격결정 및 재고관리의 성과에 중대하게 영향을 미친다고 인식되어, 생산관리 분야에서 대체 종속적 수요에 대한 관심이 상당히 일고 있다. 대체 제품과 관련된 연구에 대한 심도 있는 문헌고찰을 Shin et al.[15]이 제공하고 있다.

둘째로 교차 종속적 수요는 교차판매(Cross-selling) 효과에 의해서 제품 간에 발생한다. 교차판매 효과는 한 제품의 판매가 다른 제품의 판매와 연관성이 있는 것으로 정의된다[18]. 다시 말해서, 주요품목(Major item)의 판매가 관련 하위품목들(Minor items)에 대한 추가적인 판매

를 유발할 수 있다는 것이다. 하위품목들은 독립적으로 판매될 수도 있고, 또는 주요품목과 같이 결들여서 추가적으로 판매될 수도 있다. 이것은 주요품목이 품절될 경우, 하위품목에 대한 수요가 감소할 수도 있다는 것을 의미한다. Zhang et al.[21]은 교차판매 때문에 하위품목의 수요가 주요품목의 수요와 상관관계를 가지는 2-품목 재고시스템을 연구하였다. 추후 Zhang[20]은 여러 개의 하위품목들을 다룰 수 있도록 Zhang et al.[21]의 모형을 확장시켰다.

마지막으로 본 논문의 관심 대상인 구매 종속성은 어떤 제품들이 알려지지 않은 그들 내부의 연관관계 때문에 고객에 의해 함께 구매되는 것으로 소매점이나 슈퍼마켓에서 빈번하게 발생하는 현상이다[11]. 구매 종속적 수요는 다음과 같이 묘사될 수 있다. 고객이 각 제품을 독립적으로 구매하는 경우도 있지만, 여러 제품들을 묶어서 동시에 구매하고자 하는 경우도 있다. 고객이 여러 제품들을 동시에 구매하고자 하는 경우, 공급자는 모든 제품에 대해 고객요구를 충족시켜야 한다. 그렇지 못할 경우, 고객은 모든 제품들에 대한 주문충족을 제공해 줄 수 있는 다른 공급자를 찾게 될 수 있다. 이러한 구매행태에서 다른 모든 제품이 재고로 존재하지만, 제품들 중 일부가 재고로 존재하지 않는다면 상황은 모든 제품이 재고부족인 경우와 동일하다.

구매 종속적 수요는 주요품목과 하위품목을 구분하지 않는다는 점에서 교차 종속적 수요와 차이가 있다. 또한 구매 종속적 수요는 교차 종속적 수요와 다르게 어떤 구매가 다른 구매에 의존하는 방향 종속성에 제한을 받지 않는다.

대부분의 표준 재고모형은 품목 간의 연관성을 고려하지 않고, 각 제품에 대한 수요가 다른 수요와 독립을 가정한 품목기반(Item-based) 접근방식을 따르고 있다. 그러나 구매 종속적 수요에서는 각 고객주문이 여러 제품의 동시 가용성을 요구하기 때문에 품목기반 접근방식이 적절하지 않다. 구매 종속적 수요에 대한 재고모형은 Song[16]이 언급한 주문기반(Order-based) 접근방식이 요구된다. 주문기반 접근방식을 따른 문헌을 살펴보면 주문기반 성과적도인 주문충족율(Order fill rate)을 연구한 문헌과 재고모형 개발에 기여한 문헌으로 대별할 수 있다. 주문기반 성과적도에 기여한 문헌에 대한 고찰은 Park[13]이 자세히 제시하고 있다. 여기서는 본 논문과 직접적으로 관련이 있는 재고모형 개발에 기여한 문헌을 자세히 살펴보기로 한다.

<Table 1>은 주문기반 접근방식으로 재고모형을 연구한 문헌을 정리하여 보여준다. 산업현장에서는 이 분야에 대한 중요성이 대두되고 있는데 비하여 아직 학문적 연구가 활성화 되어 있지 않은 상황이다. 주문기반 접근이

품목기반 접근에 비해 다소 어려운 접근이기도 하지만, 재고모형을 탐구하는 연구자들에서 주문기반 접근방식이 아직 생소한 느낌을 주는 것 같다.

<Table 1>을 살펴보면, Liu and Yuan[9]과 Larsen[7]은 재고를 보충하기 위해 공동보충정책을 이용한 반면, 다른 연구들은 제품 개별적으로 재고를 보충하여 크게 두 그룹으로 구별된다. 또한 수요 프로세스 측면에서도 Liu and Yuan[9]과 Larsen[7]은 Compound correlated Poisson process를 따른 반면, 다른 연구들은 결합 수요분포를 이용하였다. 여기서 Compound correlated Poisson process은 고객이 Poisson process를 따라 도착하고, 제품에 대한 수요는 특정 확률분포를 따르도록 한 것이다. Liu and Yuan[9]과 Larsen[7]은 특정 제품에 품질이 발생할 경우, 고객주문이 취소되지 않고 추후 납품되는 것으로 처리하였다.

Cohen et al.[2], Agrawal and Cohen[1], Park[12]은 정기발주모형을 이용하여 개별적으로 제품을 보충하였다. 특정 제품에 품질이 발생하였을 경우, Cohen et al.[2]은 품질 제품을 빠른 시간 내에 보충하는 긴급조달로 고객주문을 만족시켰고, Agrawal and Cohen[1]은 고객주문이 취소되지 않고 추후 납품되는 것으로 처리하였으며, Park[12]은 고객주문의 일부는 취소되고 취소되지 않은 일부 고객주문은 드롭-배송으로 충족되도록 처리하였다.

또한 제품을 개별적으로 보충하는 연구 중에 Park and Seo[14]는 정기발주모형과 정량발주모형을 제시하였고, Park[11]은 확정적 EOQ 모형을 제시하였다. 특정 제품에 품질이 발생하였을 경우, Park and Seo[14]는 고객주문이 취소되어 판매손실로 처리되는 반면, Park[11]은 고객주문의 일부가 취소되고 취소되지 않은 일부 고객주문은 추후 납품되는 것으로 처리하였다.

본 논문은 다품목의 재고를 충분히 보유하지 못해 구매 종속적 수요를 즉시 만족시키지 못하면 고객주문이 취소되는 경우에 대한 재고모형을 고찰해 보고자 한다. 구매 종속성이 존재하는 상황에서 재고모형의 목적함수를 정확하게 유도하기가 쉽지 않고, 또한 최적의 주문량과 주문시기를 찾는 해법도 도전적인 과정이다. 따라서 본 논문은 EOQ(Economic order quantity) 모형을 통하여 재고모형의 최적해에 대한 특성을 분석하여 최적해의 조건을 도출하고, 그 결과를 확률적 정기발주 재고모형으로 확장하려고 한다. 이 과정에서 본 논문은 Park and Seo[14]와 Park[11]의 연구를 활용하고자 한다. 그러나 품질된 제품을 포함하는 고객주문을 판매손실로 처리하도록 재고모형을 개발한 Park and Seo[14]는 주문취소로 인한 추가적인 판매손실을 계산하는 과정이 정교하지 못한 결점이 있다. 한편 구매 종속성이 존재하는 상황에서 부분부재 EOQ 모형을 제시한 Park[11]의 연구는 최적해를 찾기 위한 계산량이 너무 많다는 결점이 있다. 즉 n 개의 품목에 대하여 점검해야 할 가능해 포인트가($n! \cdot 2^{n-1}$) 개나 된다. 따라서 본 논문은 Park and Seo[14]와 Park[11]가 취한 연구방법을 복합적으로 활용하면서 그들의 단점을 보완하는 방법을 시도한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 우선, 다음 장에서는 본 논문에서 다루는 문제를 구체적으로 정의하고, 구매 종속적 수요에 대한 EOQ 모형을 통하여 최적해의 조건을 도출하여 확률적 정기발주 재고모형에 확장한 과정을 설명한다. 제 3장은 본 논문이 의도하는 접근방법이 얼마나 효과적인지를 검토하고, 구매 종속성을 고려한 재고모형에 대하여 심도 있는 분석을 수행하기 위해 실시한 모의실험을 보여준다. 끝으로 제 4장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

<Table 1> Summary of the Related Literature

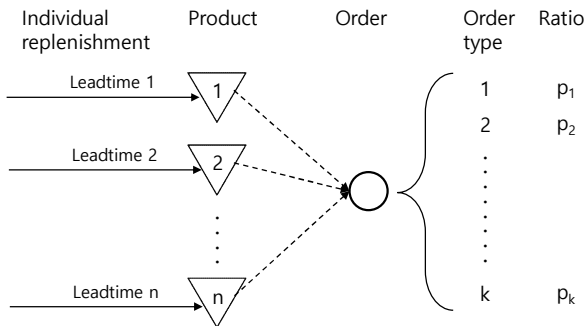
Research	Replenishment	Inventory policy	Leadtime	Stockout	Demand process
Liu and Yuan[9]	Joint	Can-order policy	0 (zero, negligible)	Backorder	Compound correlated Poisson process
Larsen[7]	Joint	Q(s,S)	Constant	Backorder	Compound correlated Poisson process
Cohen et al.[2]	Individual	Periodic review over-up-to policy	0 (zero, negligible)	Emergency delivery	Joint demand distribution
Agrawal and Cohen[1]	Individual	Periodic review over-up-to policy	Constant	Backorder	Joint demand distribution
Park[12]	Individual	Periodic review over-up-to policy	Constant	Partial backorder Drop-shipping	Joint demand distribution
Park and Seo[14]	Individual	Periodic review/EOQ	Constant	Lost-sales	Joint demand distribution
Park[11]	Individual	Deterministic EOQ	0 (zero, negligible)	Partial backorder	Joint demand distribution

2. 모형 수립

2.1 문제 정의

본 논문은 구매 종속성이 존재하는 상황에서 <Figure 2>와 같이 n 개의 제품을 관리하는 재고시스템을 고려한다. 이 재고관리시스템은 각 제품에 대해 개별적으로 구매주문을 발행하여 재고를 보충하고, 각 제품에 대한 조달기간은 서로 독립적이다. 고객주문은 선착순으로 충족된다. 고객주문은 임의의 주문유형 k 를 따르고, k 의 최대 값은 $(2^n - 1)$ 이다(예를 들어, 제품이 2개일 경우, 주문유형 1은 제품 1을, 주문유형 2는 제품 2를, 주문유형 3은 제품 1과 2를 모두 포함). 고객주문이 주문형태 k 일 확률은 p_k 로 고정되어 있다. 고객은 한 주문에서 여러 제품을 요구할 수 있고, 각 제품에 대한 요구량은 임의의 개수가 될 수 있다. 고객주문에 포함된 모든 제품은 동시에 즉시 배달되어야 한다. 그렇지 않으면, 고객은 주문을 취소한다.

한 제품이라도 재고로 즉시 만족시키지 못하면 고객주문이 취소되는 구매 종속성이 존재하는 상황에 대한 재고모형을 고찰하기 위해서, 우선 EOQ 모형의 최적해에 대한 특성을 분석하여 최적해의 조건을 도출한다. 그리고 도출한 최적해의 조건을 확률적 정기발주 재고모형으로 확장한다.



<Figure 2> Multi-product Inventory System

2.2 구매 종속적 수요에 대한 EOQ 모형

본 절은 Park[11]의 연구결과를 본 논문에 맞게 확장한 내용을 기술한다. 따라서 기본적인 기호와 개념은 Park[11]을 따르고, 이해를 돕기 위해 2-품목 EOQ 모형을 이용한다.

기호(품목에 대한 첨자는 생략)

- T 주문기간
- F 충족율, 재고로 채워지는 수요의 비율
- D 연간수요
- C_o 주문비용
- C_h 재고유지비용
- C_l 판매손실비용
- a 수요변화율

주문취소가 발생하는 구매 종속적 수요에 대한 EOQ 모형에서 주문기간 동안에 재고수준과 수요와의 관계는 <Figure 3>과 같이 나타난다. <Figure 3>으로부터 주문비용, 재고유지비용, 그리고 판매손실비용을 포함하는 평균 연간비용(AC, annual cost)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AC = \frac{G_{01}}{T} + G_{11}TF_1^2 - G_{13}F_1 + G_{21}TF_2^2 - G_{23}F_2 + G_{03} \quad (1)$$

여기서

$$G_{01} = C_{o1} + C_{o2}$$

$$G_{11} = \frac{1}{2}(C_{h1}D_1 + C_{h2}D_2 - \alpha_2^{(2)}C_{h2}D_2)$$

$$G_{13} = C_{l1}D_1 + C_{l2}D_2(1 - \alpha_2^{(2)})$$

$$G_{21} = \frac{1}{2}\alpha_2^{(2)}C_{h2}D_2$$

$$G_{23} = \alpha_2^{(2)}C_{l2}D_2$$

$$G_{03} = C_{l1}D_1 + C_{l2}D_2$$

각 기호의 숫자 아래 첨자는 품목 1과 2를 의미한다(단, G에 있는 아래 첨자는 특별한 의미가 없음).

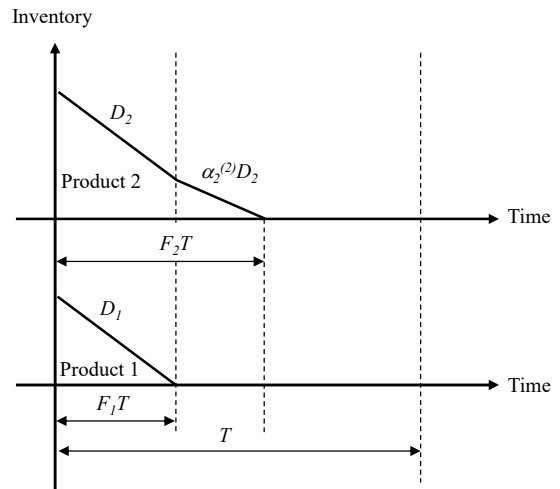
식 (1)을 각각의 F_i 로 미분하고 0으로 놓으면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial AC}{\partial F_1} = 2G_{11}TF_1 - G_{13} = 0 \rightarrow F_1 = \frac{G_{13}}{2G_{11}T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial AC}{\partial F_2} = 2G_{21}TF_2 - G_{23} = 0 \rightarrow F_2 = \frac{G_{23}}{2G_{21}T}$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$AC = \frac{1}{T} \left(G_{01} - \frac{G_{13}^2}{4G_{11}} - \frac{G_{23}^2}{4G_{21}} \right) + G_{03} \quad (3)$$



<Figure 3> Inventory Levels of Two Products

식 (3)에서 $G_{01} < \frac{G_{13}^2}{4G_{11}} + \frac{G_{23}^2}{4G_{21}}$ 이면, AC를 최소화하기 위해서는 T 는 가능한 한 작아야 한다. 그러나 식 (2)도 만족시켜야 하므로, $F_1 = 1$ 과 $F_2 = 1$ 이어야 한다. 이때 식 (1)의 AC를 최소화시키는 T^* 는 다음과 같다.

$$T^* = \sqrt{\frac{G_{01}}{G_{11} + G_{21}}} = \sqrt{2 \frac{C_{o1} + C_{o2}}{C_{h1}D_1 + C_{h2}D_2}} \quad (4)$$

그리고 $AC = 2\sqrt{G_{01}(G_{11} + G_{21})} = \sqrt{2(C_{o1} + C_{o2})(C_{h1}D_1 + C_{h2}D_2)}$ 이다.

한편, 식 (3)에서 $G_{01} \geq \frac{G_{13}^2}{4G_{11}} + \frac{G_{23}^2}{4G_{21}}$ 이면, AC를 최소화하기 위해서는 T 는 가능한 한 커져야 한다. 즉 $T = \infty$ 이면, 주문이 결코 일어나지 않고 모든 주문은 취소된다. 이때 $AC = G_{03} = C_{h1}D_1 + C_{h2}D_2$ 이다. 따라서 최적해는 모든 주문을 모두 충족시키거나 모두 취소되는 것 중에 비용이 적게 드는 것이다.

이상의 결과를 다품목 재고모형으로 확장하면 주문취소가 발생하는 구매 종속적 수요에 대한 EOQ 모형의 최적해 조건은 다음과 같다.

$$F_i = 1, G_{01} < \sum \frac{G_{i3}^2}{4G_{i1}} \text{ for } \forall i \quad (5)$$

2.3 확률적 정기발주 재고모형

본 절에서는 Park and Seo[14]가 이용한 Hadley and Whitin [5]의 근사적 접근방법을 통하여 2.2절에서 도출한 최적해의 조건을 확률적 정기발주 재고모형에 확장한 내용을 기술한다.

기호(품목에 대한 첨자는 생략)

R 최대재고수준 (Order-up-to level)

μ 조달기간 중 평균수요

$h(x; T)$ (조달기간+주문기간) 중의 수요분포

Hadley and Whitin[5]가 제시한 목적함수인 평균 연간 비용도 주문비용과 재고유지비용 및 판매손실비용으로 이루어지고, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$AC = \frac{C_o}{T} + C_h \left(R - \mu - \frac{DT}{2} \right) + \left(C_h + \frac{C_l}{T} \right) \int_R^\infty (x - R)h(x; T)dx \quad (6)$$

주어진 T 에 대해서 식 (6)을 최소화하는 R 의 값은 다음 식을 만족시켜야 한다.

$$\int_R^\infty (x - R)h(x; T)dx = \frac{TC_h}{TC_h + C_l} \quad (7)$$

여기에 구매 종속적 수요에 대한 최적해 조건인 식 (5)를 적용하면, 주어진 T 에 대해서 다음과 같은 조건이 얻어진다.

$$\int_R^\infty (x - R)h(x; T)dx \cong 0 \quad (8)$$

3. 모의실험

주문취소가 발생하는 구매 종속적 수요에 대한 적절한 재고모형을 수립하는 것이 도전적인 작업임을 인지하고, 본 논문에서는 EOQ 모형을 통해 최적해의 조건을 도출하여 그 결과를 확률적 정기발주 재고모형으로 확장하였다. 이 과정에서 본 논문이 의도하는 접근방법이 얼마나 효과적인지를 검토하고, 구매 종속성을 고려한 재고모형에 대하여 심도 있는 분석을 수행하기 위해 <Table 2>에서 보여주는 바와 같은 4가지 재고정책으로 컴퓨터 모의실험을 실시하였다.

<Table 2> Inventory Policies

Demand	Order period	
	Individual	Joint
Independent	I Eq (9) & (7)	III Eq (10) & (7)
	II Eq (9) & (8)	IV Eq (10) & (8)

여기서 주문기간은 EOQ 모형을 이용하여 계산하고, 다품목 재고모형에 대한 개별 주문기간과 공동 주문기간은 각각 식 (9), 식 (10)과 같이 구해진다.

$$T_i = \sqrt{\frac{2C_{oi}}{C_{hi}D_i}} \text{ for } \forall i \quad (9)$$

$$T = \sqrt{\frac{2\sum C_{oi}}{\sum C_{hi}D_i}} \quad (10)$$

또한 구매 종속도에 따른 영향을 분석하기 위해 구매 종속도를 변화시켜가며 모의실험을 실시하였다. 본 논문은 구매 종속도를 다음과 같이 정의한다.

$$\text{구매 종속도} = \sum_K \frac{|K|}{J} p_K \text{ for } |K| > 1 \quad (11)$$

여기서 J 는 구매 종속성이 존재하는 그룹에 속한 품목의 수, K 는 주문유형, 그리고 $|K|$ 는 주문유형 K 에 포함된

품목의 수를 의미한다. 구매 종속도의 값은 0과 1 사이의 범위에 있다. 1의 값에 가까운 구매 종속도는 품목그룹이 주문수요의 관점에서 긴밀히 연관되어 있음을 나타낸다. 반면 0의 값에 가까운 구매 종속도는 품목그룹이 매우 낮은 연관관계를 가진다는 것을 나타낸다. 즉, 구매 종속도는 품목에 대한 수요가 고객주문에 의해 어느 정도 서로 결합되었는가를 나타낸다.

본 논문은 다음과 같이 모의실험을 설계하였다. 모의실험은 구매 종속성이 존재하는 3개의 제품을 다루는 재고시스템을 고려한다. 고객주문은 동질의 포아송 과정을 따르며 시스템에 도착한다. 즉, 고객주문 사이의 도착간격 시간은 평균이 2일인 지수분포를 따른다. 고객주문은 <Table 3>에 나타난 7가지의 주문유형 중에 하나를 따른다. 전체 주문에서 주문유형의 비율은 구매 종속도에 따라 결정된다. <Table 3>은 구매 종속도가 0.3, 0.5 와 0.8인 경우에 주문유형의 비율을 보여준다. 본 논문에서는 특정한 편향(bias)을 피하기 위해서 모든 주문유형에 대해 최대한 비율의 균형을 유지하도록 하였다.

<Table 3> Order Type and Ratio

Order type	Product			Ratio	Purchase dependency		
	1	2	3		0.3	0.5	0.8
1	1			p_1	0.20	0.15	0.00
2		1		p_2	0.20	0.15	0.00
3			1	p_3	0.20	0.10	0.00
4	1	1		p_4	0.10	0.10	0.20
5		1	1	p_5	0.10	0.10	0.20
6	1		1	p_6	0.10	0.10	0.20
7	1	1	1	p_7	0.10	0.30	0.40

고객주문에서 요구되는 제품들의 수량은 균등분포를 사용하여 무작위로 할당되었다. 즉, 제품 1은 UNIF(1,5), 제품 2는 UNIF(6,10), 그리고 제품 3은 UNIF(1,10)를 따른다. 각 구매 종속도에 대해 5개의 데이터 세트를 생성하였다. <Table 4>는 구매 종속도에 따른 각 품목의 평균 연간수요를 보여준다. 각 제품의 조달기간은 10일로 설정하였다. 재고시스템에 대한 모의실험은 2000일 동안 실시하였고(1년을 300일로 산정), 150일 정도가 지나면서 재고시스템이 안정을 보이므로 첫 150일 동안은 준비기간(warm-up period)으로 취급하여 필요한 통계치는 준비기간 이후부터 수집하였다.

<Table 4> Average Annual Demands

Purchase dependency	D_1	D_2	D_3
0.3	225	600	412.5
0.5	292.5	780	495
0.8	360	960	660

3.1 접근방법의 효과성에 대한 검토

본 절에서는 본 논문이 시도한 접근방법이 얼마나 효과적인지를 검토하기 위한 방안으로 개별 주문기간을 갖는 재고정책 I과 II를 비교하고, 또한 공동 주문기간을 갖는 재고정책 III과 IV를 비교하는 모의실험에 대해 설명한다. 가설은 다음과 같다.

$$\begin{cases} H_0 : AC_I = AC_{II} \\ H_1 : AC_I > AC_{II} \end{cases} \begin{cases} H_0 : AC_{III} = AC_{IV} \\ H_1 : AC_{III} > AC_{IV} \end{cases}$$

여기서 $AC_I, AC_{II}, AC_{III}, AC_{IV}$ 는 재고정책 I, II, III, IV에서 발생하는 평균 연간비용이다. 재고정책 I과 III은 구매 종속성을 무시하고 제품들을 관리하는 방법인 반면, 재고정책 II와 IV는 구매 종속성을 고려하여 제품들을 관리하는 방법이다.

먼저 각 구매 종속도에 대해서 <Table 2>를 참조하여 재고정책의 주문기간과 최대재고수준을 계산하였다. 이때 쓰인 매개변수의 값들은 다음과 같다 : $C_{o1} = C_{o2} = C_{o3} = 100$; $C_{h1} = 20, C_{h2} = 30, C_{h3} = 40$; $C_{I1} = 20, C_{I2} = 30, C_{I3} = 40$ 계산한 T와 R의 값을 사용하는 재고관리시스템에 대해서 각 구매 종속도 당 5개의 데이터 세트로 모의실험을 실시하였다. 재고관리시스템은 구매 종속성이 존재하는 환경에서 운영된다. <Table 5>는 모의실험의 결과를 보여준다. <Table 5>에서 보여주는 재고운영비용은 각 구매 종속도 당 5개의 데이터 세트에 대한 평균값이다.

<Table 5>에 제시된 결과를 근거로 하여 개별 주문기간을 갖는 재고정책 I과 II에 대한 비교를 살펴보면, 각 구매 종속도에 대하여 구매 종속성을 고려한 재고정책 II가 구매 종속성을 무시한 재고정책 I보다 총비용을 적게 발생시킨다는 것을 알 수 있다(p-값은 모두 0.05 미만). 유사하게 공동 주문기간을 갖는 재고정책 III과 IV에 대한 비교를 살펴보면, 각 구매 종속도에 대하여 구매 종속성을 고려한 재고정책 IV가 구매 종속성을 무시한 재고정책 III 보다 총비용을 적게 발생시킨다는 것을 알 수 있다(p-값은 모두 0.05미만). 일반적으로 구매 종속성을 고려한 재고정책 II와 IV는 재고를 좀더 보유함으로써 판매손실을 감소시키고, 결과적으로 총비용을 감소시킨다.

추가로 개별 주문기간과 공동 주문기간을 갖는 재고정책을 비교해 보면, (즉 재고정책 I과 III을 비교하고, 또한 재고정책 II와 IV을 비교) 구매 종속도가 높을 경우에는 공동 주문기간을 갖는 재고정책이 개별 주문기간을 갖는 재고정책 보다 총비용을 적게 발생시키는 듯 하나, 구매 종속도가 낮을 경우에는 반대의 결과가 나타난다.

<Table 5> Comparison of Inventory Policies

Purchase dependency	Inventory policy	Product				Ordering cost	Holding cost	lost-sales cost	Total cost
			1	2	3				
0.3	I	T	63	27	38	2356	4473	2005	8834
		R	62	108	88				
	II	T	63	27	38	2356	5601	648	8605
		R	78	123	100				
	III	T	36	36	36	2476	4609	1926	9011
		R	46	124	86				
	IV	T	36	36	36	2476	5506	926	8909
		R	53	139	95				
0.5	I	T	55	24	35	2634	4842	2439	9915
		R	77	119	98				
	II	T	55	24	35	2634	6320	549	9504
		R	92	135	122				
	III	T	32	32	32	2787	4991	2003	9780
		R	55	140	95				
	IV	T	32	32	32	2787	5774	917	9477
		R	61	153	104				
0.8	I	T	50	22	30	2944	5295	3102	11341
		R	85	135	114				
	II	T	50	22	30	2944	7425	448	10818
		R	104	166	139				
	III	T	29	29	29	3075	5659	2133	10866
		R	64	163	111				
	IV	T	29	29	29	3075	6550	1012	10637
		R	71	172	128				

3.2 매개변수 값의 변화를 통한 분석

앞의 3.1절에서 확인한 결과에 대해 좀더 심도 있는 분석을 실시하기 위해서 재고유지비용, 판매손실비용, 그리고 주문비용을 변화시켜가며 재고정책들을 비교하는 모의실험을 반복하였다. <Table 6>은 반복한 모의실험의 결과인 총비용을 보여준다.

<Table 6>으로부터 재고유지비용에 대한 판매손실비용의

비율(C_i/C_h)이 증가하면, 앞의 3.1절의 결과와 같이, 구매 종속성을 고려한 재고정책이 구매 종속성을 무시한 재고정책보다 총비용을 보다 적게 발생시킨다는 것을 알 수 있다(p-값은 모두 0.05 미만). 그리고 주문비용(C_o)이 증가함에 따라라도 같은 결과를 보여준다(p-값은 모두 0.05 미만). 그러나 주문비용이 상대적으로 아주 클 경우에는 구매 종속성을 고려한 재고정책과 구매 종속성을 무시한 재고정책 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않는다(C_o 가 500인 경우 p-값이 큼).

<Table 6> Additional Comparison of Inventory Policies

Purchase dependency	Inventory policy	C_i/C_h			C_o	
		1	5	100	250	500(p-value)
0.3	I	8834	11541	8834	11515	(0.9360)
	II	8605	11038	8605	11443	
	III	9011	10929	9011	11844	(0.2622)
	IV	8909	10723	8909	11710	
0.5	I	9915	11993	9915	13010	(0.3962)
	II	9504	11701	9504	12687	
	III	9780	11608	9780	13250	(0.3897)
	IV	9477	11173	9477	13036	
0.8	I	11341	13432	11341	14759	(0.8243)
	II	10818	12611	10818	14303	
	III	10866	13681	10866	14911	(0.6017)
	IV	10637	13340	10637	14505	

결론적으로 재고정책들을 비교하는 모의실험의 결과로부터 본 논문이 시도한, EOQ 모형을 통해 도출한 최적해의 조건을 확률적 정기발주 재고모형으로 확장한 접근방법이 효과적임을 알 수 있다.

추가적으로 분석한 개별 주문기간과 공동 주문기간을 갖는 재고정책에 대한 비교는 상황에 따라서 총비용을 적게 발생시키는 재고정책이 달라지므로 어느 재고정책이 우월하다고 결론을 내릴 수 없다.

4. 결 론

본 논문은 재고관리시스템에서 발생하는 구매 종속적 수요에 초점을 맞추고 체계적인 재고관리 방안을 연구하였다. 우선 구매 종속성이 존재하는 상황에서 재고모형의 목적함수를 정확하게 유도하기가 쉽지 않고, 또한 최적의 주문량과 주문시기를 찾는 해법도 도전적인 과정임을 인지하고, EOQ 모형을 통하여 재고모형의 최적해에 대한 특성을 분석하여 최적해의 조건을 도출하고 그 결과를 확률적 정기발주 재고모형으로 확장하였다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통하여 본 논문이 의도하는 접근방법이 얼마나 효과적인지를 검토하고, 구매 종속성을 고려한 재고모형에 대하여 심도 있는 분석을 수행하였다.

모의실험의 결과를 분석함으로써, 본 논문은 구매 종속성을 고려한 재고정책이 구매 종속성을 무시한 재고정책보다 총비용을 보다 적게 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 구매 종속성을 고려한 재고정책은 재고를 좀 더 보유함으로써 판매손실을 감소시키고, 결과적으로 총비용을 감소시켰다. 결론적으로 모의실험의 결과로부터 본 논문이 시도한, EOQ 모형을 통해 도출한 최적해의 조건을 확률적 정기발주 재고모형으로 확장한 접근방법이 효과적임을 알 수 있었다.

향후 연구로 구매 종속성이 큰 제품들에 대해서 동시 구매시에 가격을 할인해 줌으로써 성과를 향상시킬 수 있는 상황에 대한 연구가 가능할 것이다. 이때 동시 구매 확률이 존재하고 적정 할인율을 결정하는 문제 등을 다룰 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This work was supported by the 2019 Research Fund of University of Ulsan.

References

- [1] Agrawal, N. and Cohen, M.A., Optimal material control

in an assembly system with component commonality, *Naval Research Logistics*, 2001, Vol. 48, No. 5, pp. 409-429.

- [2] Cohen, M.A., Kleindorfer, P.R., and Lee, H.L., Near-optimal service constrained stocking policies for spare parts, *Operations Research*, 1989, Vol. 37, No. 1, pp. 104-117.
- [3] Corbett, C.J. and Rajaram, K., A generalization of the inventory pooling effect to nonnormal dependent demand, *Manufacturing and Service Operations Management*, 2006, Vol. 8, No. 4, pp. 351-358.
- [4] Erkip, N., Hausman, W.H., and Nahmias, S., Optimal centralized ordering policies in multi-echelon inventory systems with correlated demands, *Management Science*, 1990, Vol. 36, No. 3, pp. 381-392.
- [5] Hadley, G. and Whitin, T.M., *Analysis of Inventory Systems*, Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1963.
- [6] Hausman, W.H., Lee, H.L., and Zhang, A.X., Joint demand fulfillment probability in a multi-item inventory system with independent order-up-to policies, *European Journal of Operational Research*, 1998, Vol. 109, No. 3, pp. 646-659.
- [7] Larsen, C., The Q(s,S) control policy for the joint replenishment problem extended to the case of correlation among item-demands, *International Journal of Production Economics*, 2009, Vol. 118, No. 1, pp. 292-297.
- [8] Lee, L.H. and Chew, E.P., A dynamic joint replenishment policy with auto-correlated demand, *European Journal of Operational Research*, 2005, Vol. 165, No. 3, pp. 729-747.
- [9] Liu, L. and Yuan, X.M., Coordinated replenishments in inventory systems with correlated demands, *European Journal of Operational Research*, 2000, Vol. 123, No. 3, pp. 490-503.
- [10] Nasr, W.W. and Maddah, B., Continuous (s, S) policy with MMPP correlated demand, *European Journal of Operational Research*, 2015, Vol. 246, No. 3, pp. 874-885.
- [11] Park, C., Partial backordering inventory model under purchase dependence, *Industrial Engineering and Management Systems*, 2015, Vol. 14, No. 3, pp. 275-288.
- [12] Park, C., A partial backordering inventory model with a drop-shipping option under purchase dependence, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2017, Vol. 34, No. 4, pp. 1-20.
- [13] Park, C., Iterative approach to calculating the order fill

- rate under purchase dependence, *Industrial Engineering and Management Systems*, 2017, Vol. 16, No. 3, pp. 363-374.
- [14] Park, C. and Seo, J., Consideration of purchase dependence in inventory management, *Computers and Industrial Engineering*, 2013, Vol. 66, No. 2, pp. 274-285.
- [15] Shin, H., Park, S., Lee, E., and Bentond, W.C., A classification of the literature on the planning of substitutable products, *European Journal of Operational Research*, 2015, Vol. 246, No. 3, pp. 686-699.
- [16] Song, J.S., On the order fill rate in a multi-item, base-stock inventory system, *Operations Research*, 1998, Vol. 46, No. 6, pp. 831-845.
- [17] Urban, T.L., A periodic-review model with serially-correlated, inventory-level-dependent demand, *International Journal of Production Economics*, 2005, Vol. 95, No. 3, pp. 287-295.
- [18] Wong, R.C., Fu, A.W., and Wang, K., Data mining for inventory item selection with cross-selling considerations, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2005, Vol. 11, No. 1, pp. 81-112.
- [19] Yan, X.S., Robb, D.J., and Silver, E.A., Inventory performance under pack size constraints and spatially-correlated demand, *International Journal of Production Economics*, 2009, Vol. 117, No. 2, pp. 330-337.
- [20] Zhang, R., An extension of partial backordering EOQ with correlated demand caused by cross-selling considering multiple minor items, *European Journal of Operational Research*, 2012, Vol. 220, No. 3, pp. 876-881.
- [21] Zhang, R., Kaku, I., and Xiao, Y., Deterministic EOQ with partial backordering and correlated demand caused by cross-selling, *European Journal of Operational Research*, 2011, Vol. 210, No. 3, pp. 537-551.

ORCIDChangkyu Park | <http://orcid.org/0000-0002-8250-9470>