

재생산 제품의 회수율을 고려한 최적 인센티브 및 총 주문량 결정

이용현*, 이철웅**

Decision of optimal incentives and total order quantity with consideration of return rate of remanufacturing product

Yong-Hyun Lee *, Chul-Ung Lee **

요 약

본 연구에서는 재생산 기업의 회수 인센티브와 소매점에서의 회수 인센티브를 고려하여 최적 총 주문량과 이 두 개의 최적 인센티브에 대한 결정을 연구한다. '회수율은 기업이 제공하는 인센티브와 밀접한 관련이 있다.'는 가정 하에 이 회수율을 두 경로로 가는 각각의 함수로 표현하였다. 재고 모델로는 확정적인 EOQ(경제적 주문 수량)모델을 사용하여 기업의 최소 비용함수를 수식으로 표현하였다. 또한 이 모델을 가지고 볼록성(convexity)을 증명하여 기업이 수여하는 최적 인센티브와 소매점이 수여하는 최적 인센티브 그리고 총 주문수량(보충량)을 최적화 하였다. 그리고 각각의 매개변수들을 민감도 분석하여 각각의 결정변수의 변화 추이를 살펴보면서 매개변수와의 관계를 알아보았다. 기업과 소매점은 비용을 감소시키기 위해 인센티브를 낮추려 한다. 하지만 이것은 회수량을 감소시켜 새로운 제품 생산량을 증가시킴으로 비용을 증가하게 한다. 이 논문은 국내외 재생산 기업이 이러한 상충관계(Trade off)를 고려하여 최적 인센티브와 최적 주문량을 결정하는데 있어 도움이 될 것으로 기대한다.

▶ Keyword : 재생산, 회수율, 인센티브, 주문량, 민감도 분석, 상충관계

Abstract

In this paper, we develop the cost minimization model to select two incentives and total order quantity with consideration of remanufacture company's return incentive. Return rate is sensitive to the incentive that the

• 제1저자 : 이용현 교신저자 : 이철웅

• 투고일 : 2011. 04.29, 심사일 : 2011. 05. 11, 게재확정일 : 2011. 05. 16

* 고려대학교 정보경영전문대학원 석사과정(Dept. of Information Management Engineering, Korea University)

** 고려대학교 정보경영공학 전문대학원 부교수(Dept. of Information Management Engineering, Korea University)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(NRF-2009-0076365)

manufacture company offers. Using a EOQ(Economic Order Quantity) model of a cost minimization, we show concavities of the model about two incentives and total order quantity respectively. According to the proposed algorithm using the concavities, we find out the optimized incentive prices and total order quantity. Through numerical study, we examine sensitive analysis of the incentive price and order quantity for each parameter when the return rate is sensitive to incentive. Company lessens incentive to reduce total price. However, this makes the total price increase due to a diminution of return quantity. We expect that domestic or overseas remanufacture businesses are able to decide optimal incentive and total order quantity by this research.

▶ Keyword : Remanufacture, Return rate, Incentive, Order quantity, Sensitive analysis, Trade off

1. 서론

최근 정부자료에 의하면 녹색 정책에 따라 환경 부분 예산이 2000년 2조 7636억 원에서 2005년 3조 5578억 원으로 증가함에 따라 제도적인 장치를 마련하고 있으며 “환경 친화적 구조로의 전환촉진에 관한 법률”, “자원 절약과 재활용 촉진에 관한 법률”, “친환경 상품 구매 촉진에 관한 법률” 등을 제정하여 제품의 회수 및 재활용을 촉진하고 있는 실정이다. 또한 세계 환경산업의 시장 규모는 2000년 5,180억불에서 2005년 7,097억불, 2010년 8,356억불로 연 5~10% 성장을 하고 있으며 국내의 환경 시장의 규모는 2001년 9조원, 2005년 19조원, 2010년 32조원으로 연 평균 12%내외로 성장 중이다.[2] 이러한 환경 시장 규모가 커짐에 따라 제록스나 휴렛 팩커드사 그리고 삼성 등은 재생산에 참여 하고 있으며 다른 카트리지 재생산 기업들도 확장되는 추세이다. 또한 2013년부터 선진국, 개도국에게 온실가스 감축의무를 부과하는 발리 유엔기후변화 협약체결과 세계 탄소 배출권으로 환경에 대한 규제가 더 강화될 예정이며 에너지비용의 급등과 재생산된 제품을 생산하는 것이 원재료를 가지고 생산하는 제품보다 비용 면에서 경제적인 이유로 재생산이 필요하다.[6] 재생산은 제품의 수명 주기를 더 연장시킨다는 개념으로 시작된 지속가능한 (sustainable) 산업으로 사용된 제품 또는 부품을 체계적으로 회수하여 분해, 세척, 수리/교체, 조립의 5단계 과정을 거쳐 다시 원래 상태의 제품으로 복원하여 동일한 가치 즉 원래의 성능을 가지게 하는 것을 의미한다.[1][2] 재생산되는 제품은 회수가 잘 되고 분해가 쉽게 이루어 져야 하며 원재료나 부품으로도 재생산이 가능해야 한다.

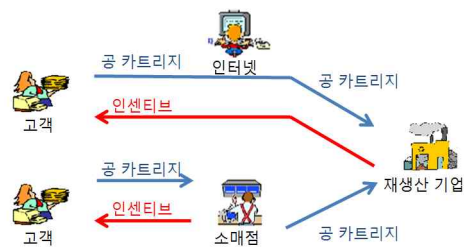


그림1. 재생산 업체 회수 시스템
Fig 1. Recovery System of manufacturer

재생산의 대표적인 예로는 그림 1과 같이 제품 주기가 지난 제품을 인터넷에서 수거 신청을 하여 반품하는 예로 공 카트리지나 토너를 회수하고 있는 가운데 기업이 수거를 해가면 이에 따른 빈 토너나 카트리지에 대해 검사 후 비용을 지불하고 있다. 이것을 경제학에서는 인센티브(보상가격)이라 정의하는데 이 인센티브는 고객에게 회수의 동기를 더 주기 위하여 사용된다. 하지만 재생산 회사들이 제시하는 인센티브는 기업의 실정에 맞게만 설정되어 있고 아직까지는 고객에 맞게 설계가 되어 있지 않으므로 인하여 고객들이 폐 카트리지 회수 프로그램 참여가 저조한 이유 중의 하나이다. 그러므로 역물류를 고려하여 인센티브 가격을 결정하는 것이 재생산 하는 기업의 주된 관심사이다. 재생산 기업에서는 고객에게 인센티브 가격을 올림으로 더 많은 회수 량을 얻을 수 있고 이 많은 회수 량이 재생산에 기여함으로 생산비용을 낮출 수 있는 반면에 인센티브 가격이 증가하면 증가할수록 기업의 비용은 증가하게 된다. 반면 고객의 입장에서는 유리한 조건으로 인센티브 값을 원한다. 따라서 이에 대한 상충관계(trade off)를 고려하여 기업과 고객과의 인센티브와 총 주문량을 결정 할 필요가 있다. 특히 토너나 카트리지를 재생산을 하기 위해서는 이를 재생산 할 공 카트리지나 토너가 필요하게 된다. 하지만 국내 재생 카트리지 국내 동향을 살펴보면 부적절한 인센티브를 책정함으로 폐 카트리지 회수함에 있어 한계점을 나

타내고 있다. 따라서 이를 회수 할 역 물류와 인센티브 관련 연구의 필요성이 대두된다. 본 연구의 목적은 재생산 카트리지 산업에 초점을 맞추어 고객이 반납하는 카트리지 회수량에 따라 기업의 비용을 극소화시키기 위한 인센티브를 결정한다. 카트리지 회수율은 인센티브 가격에 증가함수로 보여 진다는 가정 하에 기업의 비용을 최소화 시키는 것을 연구한다. 기존의 연구에서는 소매점(대리점)이 고객에게 주는 하나의 인센티브를 고려하여 인센티브 값을 결정하는 것이 주된 연구였다면 본 연구에서는 국내 재생 카트리지 기업의 역 물류 모형을 제시하고 재생산 업체가 고객에게 주는 최적의 인센티브와 소매점(대리점)이 고객에게 주는 최적의 인센티브를 동시에 고려하여 최적 주문량과 최적 인센티브에 관한 연구를 하고자 한다.

II. 관련 연구

재생산 재고관리에 관련된 대표적인 연구인 확정적인 모델은 수요와 회수를 알고 있다고 가정한 EOQ(Economic Order Quantity)모델이다. 이 모델에 관한 역물류는 Schradley에 의해 시작 되었고 이 연구에서는 하나의 생산 주문수량과 제품 가치를 되찾는 회복된(recovery)제품 주문 수량에 대해서 각각의 최적 수량에 대해 결정을 하였다.[19] Teunter[21]는 Schradley[19]가 제시한 모델에 폐기처분(Disposal) 옵션을 넣어 재생산 배치(batch)주기를 1로 정했을 경우 생산 배치(batch) 크기(size)와 재생산 배치(batch)크기(size)를 결정 하였고, 생산 배치(batch)주기를 1이라 했을 경우에는 생산 배치(batch) 크기와 재생산 배치(batch)크기를 결정하여 이 결정변수들을 가지고 최소비용을 구하였다. Koh는 수요율, 회수율, 경제적 회복(economy-recovery) 대한 다양한 시나리오를 가지고 재생산, 재활용, 재사용을 고려해서 재생산 로트(lot)를 1로 고정 시킨 후 그 이상의 생산로트(lot)를 설정한 정책과 그 반대의 정책으로 최적 주문량을 결정하였다.[11] Dobos와 Richter는 회수된 제품을 다시 사용하는 것과 그렇지 않은 제품들을 폐기하는 것을 포함하여 새롭게 생산된 제품, 회수된 제품 그리고 폐기처분된 제품에 대한 재고 유지비용을 수식으로 증명하여 최적 재고유지비용을 도출하였고 총 로트(lot)크기를 최소화 하였다.[5]

인센티브에 관한 재생산 연구로는 그리 많은 연구가 되어 있지 않음을 살펴 볼 수 있다. Grout의 연구에서는 JIT(Just-In-Time)시스템에서 공급자로부터 흐름시간의 분포에 따라 적시 조달을 받았을 경우에는 보상금(incentive)을 주고

그렇지 않을 경우에는 범칙금(panalty)을 내는 인센티브 시스템적용을 위한 수리적 모델을 적용하여 100%적시 조달을 위해서는 인센티브가 필요함을 증명하였다.[8] Majumder와 Groenevelt는 재생산에서 게임이론(Game Theory)을 적용하여 재생산 제품을 증가시키고 재생산 가격을 감소시키기 위해 인센티브가 OEM(Original Equipment Manufacturer)에 제공 되어져야 함을 증명하였다.[13] Savaskan의 연구를 살펴보면 그림 2 같이 4가지 모델 즉 모델C는 재생산 업체와 소매점 통합하여 사용된 제품을 직접 수집한 모델이고 모델M은 재생산 업체가 직접 수집한 모델, 모델R은 소매점이 직접 수집한 모델, 모델3P는 제3자 회수 업체가 직접 회수한 모델들에 대해서 회수율, 소매가격을 각각의 분산 채널에서 재생산 기업의 수익과 소매점 수익을 비교한 결과 회수율과 소매가격은 각 모델 $C > R > M > 3P$ 순으로 나타났고 분산 채널에서의 재생산 업체와 소매점의 수익은 $R > M > 3P$ 순으로 나타났으며 통합 채널에서의 수익은 $C > R > M > 3P$ 순으로 나타났으며 이 연구는 소매가가 각 모델에 어떠한 영향을 끼치는지 연구 하였으며 투자할 인센티브가 각 모델에 얼마만큼의 영향을 줄 수 있는지에 대해 연구하였고 위에서 언급한 것처럼 회수에 따른 최적 모델(R)을 결정 하였다.[18] Huang은 또한 모델(R)을 가지고 시간과 회수되는 양을 불확실성 요소로 고려하여 수집가로부터 받을시 발생하는 이전가(transfer price), 수집가의 제약된 조달시간, 재활용 기업이 기꺼이 투자할 재활용 비용을 결정하였는데 인센티브가 증가할수록 재활용에 대한 제약된 조달시간이 증가하였고 제품 회복이 길어질수록 재활용하는데 있어 투자비용은 감소되었다. 반면에 제품 회복이 길어질수록 기업이 재활용 업체에 지불하는 이전가(transfer price)는 증가가 되었다.[9] Kaya의 연구에서는 최적 생산량과 인센티브를 결정하였다. 이 연구에서는 모델 1에서는 100% 재생산에 의존

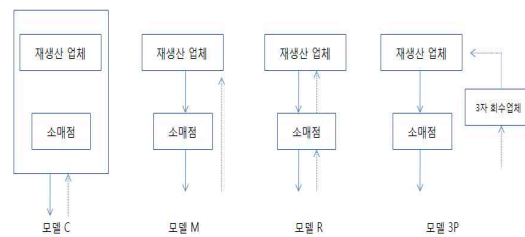


그림 2 재생산의 공급 체인 모델
Fig 2. Supply Chain Model of Remanufacture

한 모델, 모델 2에서는 재생산된 제품과 새로운 제품의 가치가 같다고 한 모델, 모델 3에서는 부분적으로 재생산 제품과 새로운 제품이 부분적인 대체가 가능한 모델들을 가지고 집중

화, 분산화 하여 각 모델들에 대해 재생산 제품수량, 새로운 제품 수량, 수익, 인센티브 등을 비교 하였다. 비교 결과 인센티브 값은 분산화 모델에서 낮게 책정됨을 살펴 볼 수 있다.[10]

본 연구는 위 언급된 연구와는 다르게 Savaskan[18]이 제시한 모델인 M과 R 모델을 합친 후 각각의 두 경로로 가는 인센티브를 고려하였고, 인센티브에 따른 회수율 함수를 고려하여 적용하였다.

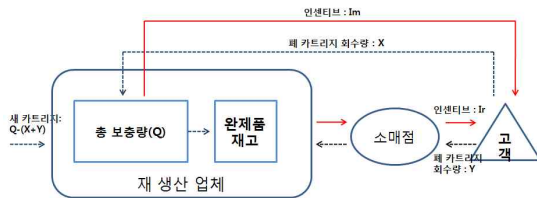


그림 3. 재생산 기업의 물류 네트워크
Fig 3. Logistic Network of Remanufacture Company

III. 기업의 최소비용 모델

3.1 문제 정의

본 연구에서는 그림3과 같이 인센티브 가격에 따라 회수율이 변화하는 서비스 기업의 최소 비용 모형에 대해 연구한다.

주기가 끝난 제품을 반납하려는 고객은 제품을 전자 상거래로 반납을 원하는 고객과 소매점과의 거리가 가까워 바로 인센티브를 받기를 원하는 고객으로 나누어 진다. 이러한 상황에서 기업은 비용을 최소화 하기 위해 재생산 기업이 고객에게 직접 주는 인센티브 가격과 소매점이 고객에게 주는 인센티브를 결정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 각각의 지점에 대한 인센티브 가격과 이에 따른 일일 생산율(m)과 두 지점의 최적 회수량

(X, Y) 을 합한 최적 총 주문량(Q)을 결정하는 모델을 개발하고 이를 분석 한다. 기업은 2가지 경로로 기업의 회수량 (X, Y) 을 충족하게 되며, 고객에게 각각의 경로에 대한 인센티브에 대한 정보를 공유한다. 고객은 공유된 정보를 통해서 구매의사를 결정하게 된다.

3.2 가정 (Assumptions)

본 연구에서는 그림 3과 같이 단일 재생산 기업과 단일 소매점에 의해 관리되는 재고 시스템을 고려한다. 앞서 언급하였듯이 회수할 때 2가지 경로를 가진 시스템을 고려한다. 고객으로부터 재생산 회사까지의 회수와 고객으로부터 소매점(대리점)까지의 회수를 고려하여 EOQ 모형을 따른다. 또한

그 회수율은 매개변수 a, b, c 값에 따라 달라진다. 그리고 다음을 추가로 가정한다.

- 1) 모든 수요는 만족된다.
- 2) 수요, 회수율, 리드타임은 확정적으로 값은 정해져 있다.
- 3) 생산비용(C_m)은 재생산 비용(C_r) 보다 큰 값을 가진다.
- 4) 재생산 기업으로부터 소매업자에게 제품을 공급하는 리드타임과 소매업자가 고객에게 카트리지를 배송하는 리드타임은 0이다. 또한 소매업자가 생산 기업에 폐 카트리지를 배송 할 때의 리드타임은 0이다.
- 5) 기업에서는 재고 품질일 경우, 재생산 제품이 품질이 발생하면 새로운 제품이 생산하여 보충되기 때문에 이에 대한 비용은 고려하지 않는다.
- 6) 모든 들어갈 재생산, 생산에 대해 투입 될 부품은 서로 가치가 같다고 가정하고 혼합되어 사용되어 진다.

3.3 호(Notation)

본 연구에서 다루고자 하는 문제에 대한 모형을 제시하기 위해 다음과 같은 기호들이 사용된다.

<통합>

T : 재고 보충 주기($=\frac{Q}{D}$) (재생산 기업과 소매점)

Q : 총 보충 수량 (결정 변수)

< 재생산 기업>

m : 일일 생산율

D : 일일 수요율

O_m : 폐 카트리지를 고정 주문비용

H_{rr} : 완성된 카트리지를 재고 유지비용

H_{ir} : 폐 카트리지를 재고 유지비용

H_{im} : 새로운 카트리지를 재고 유지비용

C_r : 재생산 카트리지를 생산 비용

C_m : 새로운 카트리지를 생산 비용

I_m : 재생산 기업이 고객에게 주는 인센티브 (결정변수)

x : 고객으로부터 재생산기업까지의 회수율

$$x = a + bI_m + c(I_r - I_m)$$

X : 보충 주기에서 고객으로부터 총 회수량

y : 소매점으로부터 재생산 기업까지의 회수율

$$y = a + bI_r + c(I_m - I_r)$$

Y : 보충 주기에서 소매점으로부터 총 회수량

<소매점>

- S_m : 소매점 주문 비용
- O_r : 판매 할 재생 카트리리지 주문비용
- H_r : 재생 카트리리지 유지비용
- H_{rc} : 폐 카트리리지 유지비용
- I_r : 소매점이 고객에게 주는 인센티브 (결정변수)

3.4 회수율 함수(Return rate Function)

본 연구에서 인센티브는 두 경로로 지불되기 때문에 고객이 직접 재생산 기업으로부터 인센티브를 받을 경우 소매점으로부터 인센티브를 받을 기회를 상실하게 된다. 그래서 다음과 같이 각각의 경로에 대한 함수로 표현하였다. 이 인센티브 함수는 회수 량에 대해서, 선형관계를 가지고 있다고 가정하였으며, 각 지점에 반품을 원하는 고객에 따라 각각 인센티브 함수가 생성되며, 이에 대한 표현식은 다음과 같다.

$$x = a + bI_m + c(I_r - I_m) \dots\dots\dots (1)$$

$$y = a + bI_r + c(I_m - I_r) \dots\dots\dots (2)$$

a, b, c : 각각의 인센티브 가격에 따른 함수내의 변화율. ($a, b, c > 0$)

- a : 잠재적인 회수에 관한 탄력성.
- b : 각 인센티브에 관한 탄력성.
- c : 각 인센티브 차에 의한 탄력성.

식(1)의 회수함수는 재생산 기업이 고객으로부터 사용된 제품을 회수하는 함수이며, 식(2)의 회수 함수는 재생산 기업이 소매점으로부터 회수하는 함수이다.

3.5 서비스 기업의 최소 비용함수

3.5.1 재생산 기업 최소비용식

- 폐 카트리리지 보충 고정 주문비용

폐 카트리리지 보충 고정 주문비용은 주문비용이 O_m 이므로 보충주기 T 로 나눈 값인 $\frac{O_m}{T}$ 이 되며 $T = \frac{Q}{D}$ 이므로

$$O_m \times \frac{D}{Q} \text{ 이 된다.}$$

- 완성된 카트리리지 재고 유지비

재생산되거나 그 나머지를 뺀 수량이 생산된 합은 Q 가 되며 완성된 카트리리지 재고 유지비는 유지비가 H_{rr} 이고 평균 재고는 $(\frac{Q}{2} \times \frac{Q}{m})$ 이다. 이것을 주기 $T = \frac{Q}{D}$ 로 나누면

$$H_{rr} \times \frac{QD}{2m} \text{ 이 된다.}$$

- 폐 카트리리지 재고 유지비

폐 카트리리지 회수 재고 유지비가 H_{rr} 이고 회수한 총량 평균 재고는 $\frac{X+Y}{2}$, X 와 Y 만큼의 회수한 총량에 대한 생산율은 $\frac{X+Y}{m}$, $X = Tx$ $Y = Ty$ 가 되므로 대입하여 주기

$$T = \frac{Q}{D} \text{로 나누면 } H_{rr} \times \frac{Q}{2md} [x^2 + y^2] \text{ 이 된다.}$$

- 새 카트리리지 재고 유지비

회수한 폐 카트리지를 뺀 나머지를 생산할 재고 유지비는 유지비가 H_{im} 이고 총 주문량(총 보충량)에서 회수량을 제외한 나머지는 $Q - (X + Y)$ 가 되므로 평균재고는 $\frac{Q - (X + Y)}{2}$ 이고, 생산율은 $\frac{Q - (X + Y)}{m}$ 이며 $X = Tx$,

$Y = Ty$ 가 되므로 대입하여 주기 $T = \frac{Q}{D}$ 로 나누면

$$\frac{H_{im} Q}{2m} [2D - 2(x + y) + \frac{x^2 + y^2}{D}] \text{ 이 된다.}$$

- 재생산 비용

재생산 비용은 회수량 X 와 Y 의합과 재생산 비용 C_r 을 곱하여 주기 $T = \frac{Q}{D}$ 로 나누면 $C_r(x + y)$ 이 된다.

- 생산 비용

생산 비용은 수요율 D 에서 회수량 X 와 Y 의 합을 뺀 나머지가 생산되므로 $D - (X + Y)$ 이 되며 주기 $T = \frac{Q}{D}$ 로 나누면 $C_m [D - (x + y)]$ 이 된다.

- 인센티브 비용

고객에게 주는 인센티브는 I_m 이고 회수량 X 를 곱하여 주기 $T = \frac{Q}{D}$ 로 나누면 $I_m \times x$ 이 된다.

위식들을 정리하면 다음(1)식이 성립된다.

$$\begin{aligned} MIN \Pi_m = & O_m \times \frac{D}{Q} + H_{rr} \times \frac{QD}{2m} \dots\dots\dots \\ & + H_{rr} \times \frac{Q(x^2 + y^2)}{2md} + C_r(x + y) + I_m \times x \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

3.5.2 소매점 최소비용식

⊙ 재생 카트리지 고정 주문비

고정 주문비는 S_m 을 보충주기 $T = \frac{Q}{D}$ 로 나눈 값이므로 $S_m \times \frac{D}{Q}$ 가 된다.

⊙ 재생 카트리지 평균 재고

재생 카트리지 평균 재고는 $\frac{Q}{2}$ 가 되므로 $H_r \times \frac{Q}{2}$ 가 된다.

⊙ 평균 폐 카트리지 회수량

고객으로부터 평균 폐 카트리지 회수량은 $\frac{Y}{2}$ 이고, 폐 카트리지 유지비용이 H_{rc} 이므로 $H_{rc} \times \frac{Q}{2D}y$ 가 된다.

⊙ 인센티브

고객에게 주는 인센티브는 I_r 이고 회수율은 y 이므로 $I_r \times y$ 가 된다.

위식을 정리하면 다음의 식이 된다.

$$MIN \Pi_r = S_m \times \frac{D}{Q} + H_r \times \frac{Q}{2} + H_{rc} \times \frac{Q}{2D}y + I_r \times y \dots\dots (2)$$

3.5.3 통합 최소비용식

재생산 기업 수익식(Π_m)과 소매점 수익식 (Π_r)을 더하면 다음 식(3)이 성립된다.

$$MIN \Pi = \frac{D}{Q}(O_m + S_m) \dots\dots\dots (3)$$

$$+ \frac{Q}{2m} [H_{rr} \times D + \frac{H_{ir}(x^2 + y^2)}{D}$$

$$+ H_{im}(2D - 2(x+y) + \frac{x^2 + y^2}{D})$$

$$+ C_r(x+y) + C_m[D - (x+y)]$$

$$+ x \times I_m + \frac{Q}{2} [H_r + H_{rc} \frac{y}{D}] + I_r \times y$$

Subject to

$$0 < x < D \dots\dots\dots (4)$$

$$0 < y < D \dots\dots\dots (5)$$

$$X + Y < Q < m + (X + Y) \dots\dots\dots (6)$$

조건(4)는 고객으로부터 재생산 기업까지의 회수율이 수요율을 초과하지 못한다는 제약식이며 조건(5)는 고객으로부터

터 소매점까지의 회수율이 수요율을 초과하지 못한다는 제약식이다. 조건(6)은 전체 주문량(Q)은 두 경로로 받는 각각의 회수량(X, Y)보다는 크고 새로운 일일제품 생산율(m)이 생산량이 되므로 이 생산량과 각각의 회수량(X, Y)를 더한 값 보다는 작다는 제약식이다.

$x = a + bI_m - c(I_r - I_m)$, $y = a + bI_r - c(I_m - I_r)$ 이므로 대입하여 풀어 쓰면

$$MIN \Pi = \frac{D}{Q}(O_m + S_m)$$

$$+ \frac{Q}{2m} \left[H_{rr}D + \frac{H_{ir}[a + bI_m - c(I_r - I_m)]^2 + a + bI_r - c(I_m - I_r)^2}{D} \right]$$

$$+ H_{im}[2D - 2a + b(I_m + I_r)]$$

$$+ \frac{[a + bI_m - c(I_r - I_m)]^2 + [a + bI_r - c(I_r - I_m)]^2}{D}$$

$$+ C_r(2a + bI_m + bI_r) + C_m[D - (2a + bI_m + bI_r)]$$

$$- [a + bI_m - c(I_r - I_m)]I_m$$

$$- \frac{Q}{2}H_r + H_{rc} \frac{a + bI_r - c(I_m - I_r)}{D} - [a + bI_r - c(I_m - I_r)]I_r$$

이 된다.

3.6 최소비용함수에 대한 볼록성 증명

총 비용을 최소화하는 I_m , I_r , Q 의 값은 다음의 최적 조건을 따른다.

정리 1. Q의 값이 주어졌을 때, 총 이익 함수는 I_m 과 I_r 에 대한 볼록함수이다.

증명) 목적식(3)에 대해서 I_m 과 I_r 로 각각 2차 미분한 값

인 $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m^2}$, $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_r^2}$ 는 모두 양의 값을 가진다.

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m^2} = \frac{QH_{ir}}{2mD}(2b^2 + 4bc + 4c^2)$$

$$+ \frac{QH_{im}}{2mD}(2b^2 + 4bc + 4c^2) + 2(b + c) > 0$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_r^2} = \frac{QH_{ir}}{2mD}(2b^2 + 4bc + 4c^2)$$

$$+ \frac{QH_{im}}{2mD}(2b^2 + 4bc + 4c^2) + 2(b + c) > 0$$

또한, 볼록성을 증명하기 위해서 목적식 (3)에 대해서 I_m 과 I_r 의 헤시안 행렬(Hessian Matrix)을 구하고, 목적식 I_m ,

I_r 각각에 대해 2차 편미분한 값이 $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m} \cdot \frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_r} - \left[\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m \partial I_r} \right]^2 > 0$ 이면 볼록함수가 되는 것을 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m} \cdot \frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_r} - \left[\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m \partial I_r} \right]^2 \text{을 계산하면} \\ & \left(\frac{Q \cdot H_{rr}}{mD} \right)^2 (b^4 + 4b^2c^2 + 4b^3c) + \left(\frac{Q \cdot H_{mm}}{mD} \right) (b^4 + 4b^2c^2 + 4b^3c) \\ & + 4(b^2 + 2bc) + 2 \left(\frac{Q \cdot H_{rr}}{mD} \right) \left(\frac{Q \cdot H_{mm}}{mD} \right) (4b^2c^2 + b^4 + 6b^3c) \\ & + 4 \frac{Q \cdot H_{mm}}{mD} (b^3 + 3b^2c + 2bc^2) + 4 \frac{Q \cdot H_{rr}}{mD} (b^3 + 3b^2c + 2bc^2) > 0 \end{aligned}$$

따라서 $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m^2} > 0$, $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_r^2} > 0$ 이고 $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m} \frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_r} - \left(\frac{\partial^2 \Pi}{\partial I_m \partial I_r} \right)^2 > 0$ 이므로 통합 이익함수 Π 는 헤시안 정리에 의해 볼록함수이며 I_m, I_r 에 관한 최적값을 구할 수 있다.

정리 2. I_m, I_r 의 값이 주어졌을 때, 총 이익 함수는 Q 에 대한 볼록함수이다.

증명) 목적식 (3)에 대하여 Q 로 2차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial Q^2} = \frac{D}{2Q^3} (O_m + S_m) > 0$$

이 식을 통해서 목적식(3)을 Q 로 2차 미분한 값이 0보다 크며, 총 이익 함수는 Q 에 대한 볼록함수임을 알 수 있다.

3.7 알고리즘 개발

정리 1과 정리 2의 최적 조건을 사용하여 의사결정변수인 I_m 과 I_r , 그리고 Q 를 찾기 위한 반복 알고리즘을 개발하였다. 결정 변수가 3개 이므로 3×3 매트릭스에 대해서 헤시안 증명이 불가능할 경우, 즉 3개의 결정변수들에 대한 joint convexity를 구하지 못한 경우 반복 알고리즘을 이용하여 부분 최적해를 찾는다. 이 알고리즘은 목적함수에 대해 각각의 의사결정변수에 대해 볼록성(convexity)이 증명된 경우, 하나의 의사결정변수를 여러 구간으로 나누어 각 구간의 하위 값을 시작점으로 설정하여 부분 최적 해를 구한 후, 이를 비교하여 최적 해를 선택하는 것이다. 본 연구에서는 M-RAND 알고리즘을 수정하여 총 보충 수량의 상한과 하한을 구하고, 구간을 나누어 최적에 가까운 해를 찾는 알고리즘을 개발하고, 이를 통해 의사결정변수인 인센티브(I_m, I_r) 그리고 총 주문량(Q)을 결정한다.

다음은 정리 1과 정리 2의 최적 조건을 사용하여 의사결정 변수인 I_m 과 I_r 그리고 Q 을 찾기 위한 반복 알고리즘을 개발하였다.

The Modified RAND algorithm (M-RAND)

Step 1. 반복수 r 을 0으로 설정. $I_m(r) = 0, I_r(r) = 0$

$Q(r) = 500$ 로 설정 후 Step 2로 넘어감.

Step 2. $r = r + 1$ 로 설정하고 Step 3로 넘어감.

Step 3. 주어진 $Q(r-1)$ 에 대해서, 정리 1을 사용하여 I_m, I_r 값을 구하고 $I_m(r) = I_m, I_r(r) = I_r$ 로 설정

Step 4. 주어진 $I_m(r), I_r(r)$ 에 대하여 정리 2를 이용하여 Q 를 계산하고 $Q(r) = Q$ 로 설정. Step 3로 넘어감.

Step 5. $Q(r) = Q(r-1)$ 이면 Step 6로, 아니면 Step 2로 넘어감.

Step 6. $I_m^* = I_m(r), I_r^* = I_r(r), Q^* = Q(r)$ 로 설정.

Step 7. 멈춤.

M-RAND 반복 알고리즘을 통해 I_m, I_r, Q 가 어떻게 결정되는지 알아보기 위하여 다음의 수치 예제를 적용하였다. 이 예제에 대한 매개변수 값은 다음의 <표 1>과 같다.

표 1. 매개변수 값
Table 1. Parameters of Input Data

변수	값
m	500
S_m	30
H_{rr}	0.07
H_{ir}	0.001
a	1
b	27
c	0.6
D	40
H_{im}	0.009
C_r	2
C_m	8
H_r	0.0015
H_{rc}	0.004
O_m	300

위의 모수값을 이용하여 알고리즘을 구현한 결과, 각각의 실험에 대하여 얻어진 I_m, I_r, Q 값과 총 이익은 다음의 <표 2>와 같다.

표 2 수치 예제 결과
Table 2. Results of Numerical Example

r	Q	I_m	I_r	비용
1	500	2.81824	2.80574	233.828
2	876.6065	2.82294	2.80104	284.153
3	876.6065	2.82294	2.80104	284.153
$Q^* = 876.6065, I_m^* = 2.82294, I_r^* = 2.80104$				
비용 = 284.153				

IV 수치 실험

위 알고리즘을 이용하여 결정 변수 Q, I_m, I_r 이 어떻게 변화하는지 확인하기 위해서 다음의 수치 실험을 실시하였다. 수치실험을 위해 사용된 매개변수들은 Liu et al.[12]의 연구에서 사용된 변수와 조건을 사용하였으며 일부는 본 연구의 가정에 맞게 수정하였다.

먼저 재생산 기업의 주문 비용(O_m)을 $O_m=300$ 을 기준으로 상향50% 하향 50%로 설정 한 후 $n=200$ 으로 설정하고 나머지 변수 값은 앞의 수치예제의 변수와 동일한 조건에서 수치실험을 진행하였다. 결정 변수 Q, I_m, I_r 의 변화를 살펴보기 위하여 아래와 같이 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 구현하였다.

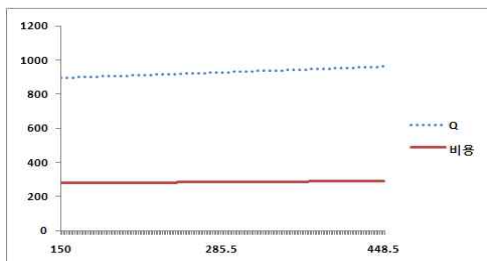


그림 4-1. 주문비용(O_m) VS 총 주문량(Q), 최소비용
Fig. 4-1. Order Cost(O_m) VS Total Order Quantity (Q), Minimum Cost

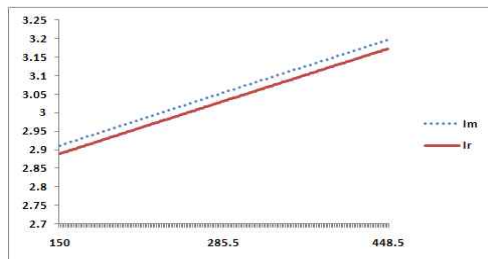


그림 4-2. 주문비용(O_m) VS 인센티브(I_m, I_r)
Fig. 4-2. Order Cost(O_m) VS Incentives(I_m, I_r)

위 분석에서 살펴보면 재생산 기업의 주문비용(O_m)이 높아짐에 따라 총 주문량(Q), 최소비용, 각각의 인센티브 값(I_m, I_r)이 증가함을 살펴 볼 수 있다. 따라서 소매점 주문비용이 증가함에 따라 총 주문량(Q), 최소비용, 각각의 인센티브 값(I_m, I_r)이 모두 증가하는 것을 볼 수 있다. 주문비용(O_m)의 증가에 따라 각 인센티브 비용은 증가하게 되고 이에 따라서

회수량은 증가하게 된다. 이것은 주문비용이 증가 할수록 생산제품의 가치보다 재생산 제품의 가치가 더 커지므로 더 많은 회수로 인하여 생산을 위한 주문을 감소시키려 한다. 그러므로 주문비용(O_m)은 인센티브에 증가하는 함수로 나타나는 것이다. 따라서 주문비용(O_m)을 줄이는 것이 기업차원에서는 낮은 인센티브를 책정하게 할 수 있다.

두 번째 분석은 재생산 기업의 재생산 비용(C_r)과 생산(C_m)이 함에 따라 결정변수 총 주문량(Q), 인센티브 (I_m, I_r)이 어떻게 변화되는지 비교 분석을 해 보았다. 재생산 또는 생산비용은 원자재 가격이나 환율의 변동에 따라 증가하고 감소 할 수 있기 때문에 고려해 보았다. 먼저 재생산 비용(C_r)을 1부터 10.99까지 증가시켜 분석을 해 보았다.

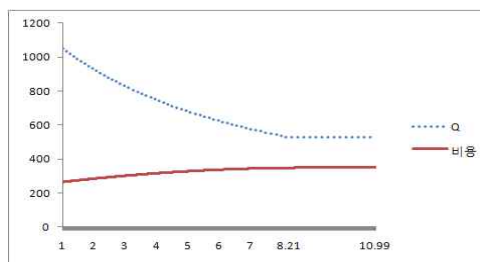


그림 5-1. 재생산 비용(C_r) VS 총 주문량(Q), 최소비용
Fig. 5-1. Remanufacture Cost(C_r) VS Total Order Quantity(Q), Minimum Cost

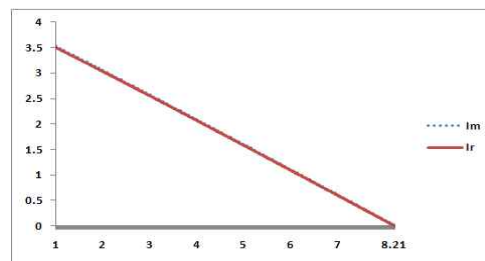


그림 5-2. 재생산 비용(C_r) VS 인센티브(I_m, I_r)
Fig. 5-2. Remanufacture Cost(C_r) VS Incentives(I_m, I_r)

재생산 비용(C_r)이 증가함에 따라 총 주문량(Q)는 감소하다가 그 이후에는 아무 변화가 없다. 또한 재생산 비용(C_r)이 증가함에 따라 재생산 비용은 꾸준한 감소를 보인다. 그러므로 각 인센티브(I_m, I_r)가 0이 되는 시점인 재생산 비용 8.21 지점 이후에서 총 주문량(Q)이 아무 변화가 없다. 따라서 생산량을 고정 시켰으므로 총 주문량(Q)은 인센티브에 영향을 받을 수 있으며 인센티브가 감소하면 회수량도 감소함을 알 수 있다. 총 주문량(Q)이 떨어짐에도 불구하고 비용이 올

라하는 이유는 재생산 비용(C_r)이 증가되었기 때문으로 풀이된다. 또한 인센티브(I_m, I_r)의 변화를 살펴보면 재생산 비용(C_r)이 증가할수록 인센티브(I_m, I_r)는 꾸준한 감소세를 보인다. 그 이유는 재생산 비용이 높아짐에 따라 회수를 낮추기 위해 인센티브 값을 내리려는 경향을 갖는 것으로 풀이된다. 따라서 재생산 비용이 높아지면 새로운 제품을 생산하는 것이 낫다는 결론이 도출된다. 세 번째 분석에서는 생산비용(C_m)을 1부터 100.9까지 증가시켜 Q, I_m, I_r 이 어떻게 변화되는지 비교 분석을 해 보았다.

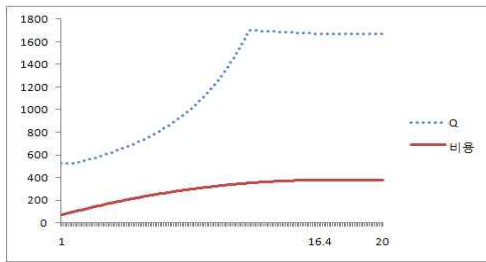


그림 6-1. 생산비용(C_m) VS 총 주문량(Q), 최소비용
Fig. 6-1. Manufacture Cost(C_m) VS Total Order Quantity(Q), Minimum Cost

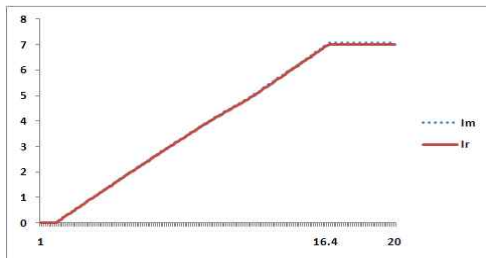


그림 6-2. 생산비용(C_m) VS 인센티브(I_m, I_r)
Fig. 6-2. Manufacture Cost(C_m) VS Incentives(I_m, I_r)

이 경우에는 앞에서 언급한 재생산 비용(C_r)의 경우와 반대의 경우로 나타나는데 총 주문량(Q)의 경우 생산비용(C_m)이 증가됨에 따라 총 주문량(Q)은 뚜렷한 증가세를 보이다가 점점 정점에 머무르게 된다. 최소비용도 생산비용(C_m)이 증가함에 따라 증가 하다가 점점에 머무른다. 인센티브(I_m, I_r)는 생산비용(C_m)을 증가시키에 따라 꾸준한 증가를 보이다가 변화가 미비하다. 이것은 생산비용의 증가 할수록 인센티브도 증가 하며 생산가가 높아질수록 공 카트리지를 회수 높이기 위해 더욱더 생산비용을 지불함을 의미한다. 하지만 생산비용이 한계에 이르게 되면 인센티브와 회수량이 고정되므로 그 이상의 생산 비용이 증가될 경우에는 기업의 이익을

창출 할 수 없다. 각각의 재생산 비용(C_r)과 생산비용(C_m)을 증가시켰을 경우를 비교하면 비용 면에서 재생산 비용이 생산 비용보다 덜 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이것은 생산가가 증가될 경우 재생산으로 전환을 한다면 비용을 절감 할 수 있다는 의미가 된다. 또한 재생산을 더욱 할수록 기업에 그만큼의 이익을 창출시킬 수 있다는 의미가 되며 Teunter[20]의 연구를 검증 할 수 있다.

네 번째 분석은 재생산 기업의 재생산 제품 재고유지비용(H_{ir})과 생산 제품 재고유지비용(H_{im})이 증가함에 따라 총 주문량(Q)과 인센티브(I_m, I_r)이 어떻게 변화되는지 비교 분석을 해 보았다. 먼저 재생산 제품 재고유지비용(H_{ir})=0.001을 기준으로 상한 50% 하한 50%로 설정하여 0.0005부터 0.0015까지 증가시켜 보았지만 이 범위가 너무 작아 변화를 보기가 어려워 다시 0부터 1.99까지 증가 시켜 보았다.

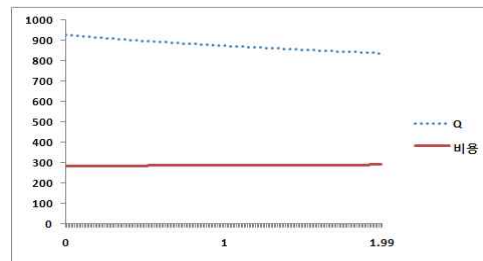


그림 7-1. 재고유지비용(H_{ir}) vs 총 주문량(Q), 최소비용
Fig. 7-1. Inventory Holding Cost(H_{ir}) VS Total Order Quantity(Q), Minimum Cost

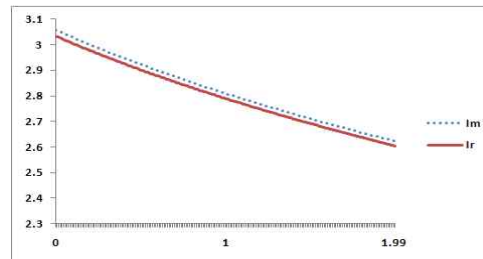


그림 7-2. 재고유지비용(H_{ir}) vs 인센티브(I_m, I_r)
Fig. 7-2. Inventory Holding Cost(H_{ir}) VS Incentives(I_m, I_r)

공 카트리지를 재고유지비용(H_{ir})을 증가 시킨 결과 총 주문량(Q)은 약간 감소되었고 최소비용 또한 약간의 증가가 있지만 차이가 별로 발견되지 않았다. 인센티브(I_m, I_r) 경우에는 각각의 인센티브에서 꾸준한 감소를 보여 주었다. 공 카트리지에 대한 재고유지비용(H_{ir})이 증가하면 공 카트리지 제품에

대한 회수량이 감소되고 이에 따라 재고 유지비용(H_{ir})은 감소하게 된다. 따라서 기업은 이익을 위해 최대한 공 카트리리지 재고를 줄이려 하고 이에 따라 인센티브를 낮추어 회수를 적게 하는 것으로 풀이된다.

다섯 번째 분석에서는 수요율(D)에 따라 Q , I_m , I_r 이 어떻게 변화되는지 비교 분석을 해 보았다. 수요율(D)은 처음 분석에서는 40을 기준으로 -50%~+50%까지 분석해 보았지만 그래프의 변동이 급격하게 있으므로 해서 더 큰 범위의 추이를 알기 위해 수요율(D)을 1부터 250까지 설정 하였다.

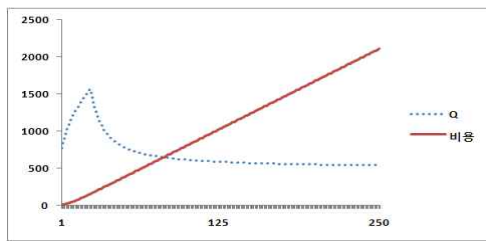


그림 8-1. 수요율(D) VS 총 주문량(Q), 최소비용
Fig. 8-1. Demand Rate(D) VS Total Order Quantity(Q), Minimum Cost

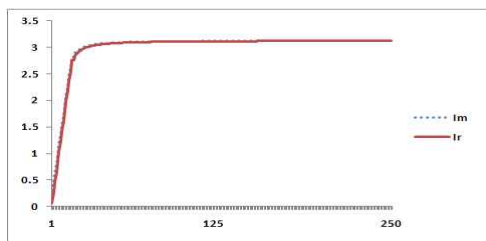


그림 8-2. 수요율(D) VS 총 주문량(Q), 최소비용
Fig. 8-2. Demand Rate(D) VS Incentive(I_m , I_r)

총 보충 수량(Q)은 수요율이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 인센티브 값의 경우에도 수요율이 25일 때까지는 급격히 증가되는데 그 이유는 초기에는 공 카트리리지에 대한 재고가 없기 때문에 더욱더 많은 회수를 하기 위해 인센티브를 급격히 올렸다가 어느 정도 재고가 발생되면 인센티브가 서서히 감소하면서 회수를 줄이려하기 때문이다. 기업은 비용의 최소화를 위해서 더욱 많은 재생산 제품을 원하게 됨에 따라 인센티브를 올림으로 회수량을 증가시키기를 원한다. 인센티브가 증가됨에 따라 회수량은 증가되지만 어느 정도의 공 카트리리지에 대한 재고가 발생되면 인센티브가 초기 증가분보다 약간의 증가로 인해서 회수량을 초기보다 감소시키려는 것으로 풀이된다. 총 주문량(Q)과 인센티브(I_m , I_r)는 상관관계가 있

으며 점점 정적인 상태를 유지하는데 그 이유는 어느 정도의 회수에 대한 재고가 발생됨에 따라 재고비용이 증가되므로 회수를 감소시키려는 경향으로 가기 때문이다.

V. 결론

본 연구에서는 인센티브가 증가되면 비용이 증가되지만 이에 따른 회수량 증가로 인해 비용이 감소되고 인센티브가 감소함에 따라 회수량 감소가 발생되지만 이것은 또한 생산비용의 증가로 인해 비용이 증가되는 상충관계(trade off)를 고려하여 재생산 업체의 비용을 최소화 시켰고 각 모델의 인센티브 값을 비교 결정 후 인센티브가 재생산 업체에서 직접 고객으로 가는 인센티브(I_m), 소매점에서 고객으로 가는 인센티브(I_r)와 총 주문량(Q)를 구해 보았다. 또한 최적 값을 계산하기 위해 알고리즘을 개발하였고 각 고정 변수들의 고유값을 기준으로 -50%~+50%범위 안에서 또는 그 범위에서 찾기가 어려울 경우 더 큰 범위를 적용하여 민감도 분석을 해 보았다. 이 분석을 해 보면서 결정변수의 변화 추이를 살펴보고 각 매개변수와 결정 변수와의 관계를 살펴보았다. 기업은 회수량을 더욱 얻기 위해 인센티브를 올리려하고 이 인센티브가 증가됨에 따라 회수량이 증가되었고 이에 따라 총 주문량(Q)이 증가하는 것을 확인해 보았다. 또한 회수 재고가 한계점에 도달함에 따라 다시 인센티브가 감소되면서 회수량이 감소되는 것을 살펴보았다. 인센티브가 증가함에 따라 최소비용이 증가되었고 재생산 비용(C_r), 재생산 제품 재고 유지비용(H_{ir})이 증가될 경우 인센티브가 감소함에도 불구하고 최소비용이 증가되었지만 생산비용(C_m)과 재생산 비용(C_r)을 증가 시켰을 경우 총 비용에 관한 편차를 비교해 볼 때 재생산 비용(C_r)에서의 편차가 작음으로 인하여 재생산 제품을 생산하는 것이 새로운 제품을 생산하는 것 보다 기업입장에서는 비용이 최소가 됨을 입증 할 수 있었다. 앞으로의 연구 방향은 이 모델을 가지고 회수량이 많을 경우 생산량을 줄여 기대재고를 최대한 줄이거나 회수량이 적을 경우 생산량을 늘리는 동시에 품질을 줄여서 기업비용을 최소화 시키는 동적(dynamic)연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Korea National Cleaner Production Center "Remanufacturing Industry and its promotion," Abbreviated Report of the Programming Research, 2007

- [2] Korea Institute of Industrial Technology, "Construction of production/evaluation system of products using remanufacturing on waste toner cartridge of printer," the Ministry of Commerce, 2006
- [3] T. W. Kim, "Research about Reverse logistics in E-Commerce," Internet Electronic Commerce Research, 2006
- [4] E. Benedito, A. Corominas "Optimal manufacturing and remanufacturing capacities of system with reverse logistics and deterministic uniform demand," Journal of Industrial Engineering and Management, vol. 3, pp33-53, 2010
- [5] I. Dobos, K. Richter "An extended production/recycling model with stationary demand and return rates," International Journal of production Research, Vol. 90 pp. 311-323, 2004
- [6] M. Ferguson, "Strategic Issues in Closed-Loop Supply Chains with Remanufacturing," College of Management, Georgia Tech, 2009
- [7] M. Fleischmann, "Quantitative models for reverse logistics," European Journal of Operational Research, Vol. 103, pp.1-17, 1997
- [8] J. R. Grout, "A model of incentive contracts for just-in-time delivery," European Journal of Operational Research, Vol. 96, pp.139-147, 1996
- [9] L. Huang, "Incentive Mechanism Design to the Electronic products Reverse Supply Chain of Remanufacture Considering the Random Time," 2009 Pacific-Asia Conference on Circuits, communications and system, 2009
- [10] O. Kaya, "Incentive and production decision for remanufacturing operation," European Journal of Operational Research, Vol. 201, pp.442-453, 2010
- [11] S. G. Koh, K. I. Sohn and C. S. Ko "An optimal ordering and recovery policy for reusable items," Computers and Industrial Engineering, pp59-73, 2002
- [12] X. Liu, A. Banerjee, S. L. Kim, "Models for retail pricing and customer return incentive for remanufacturing of a product," POMS 20th Annual Conference Orlando, Florida USA, 2009
- [13] P. Majumder, H. Groenevelt. "Competition in remanufacturing," Production and Operations Management, pp.125-141, 2001
- [14] S. Minner, "Multiple-supplier inventory models in supply chain management: A review," International Journal of production Research, Vol. 81-82, pp265-279, 2003
- [15] A. Mutha, S. Pokharel, "Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product module," Computers and Industrial Engineering, Vol. 56, pp334-346, 2009
- [16] N. Nahmias and H. Rivera, "A deterministic model for repairable item inventory system with a finite repair rate," International Journal of production Research, Vol. 17, pp.215-221, 1979
- [17] K. Richter, "The extended EOQ repair and waste disposal model," International Journal of production Research, Vol. 45, pp. 443-448, 1996
- [18] R. C. Savaskan, "Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing," Management Science, Vol. 50, pp.239-252, 2004
- [19] D. A. Schrady, "A deterministic inventory model for repairable items," Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 14 pp.391-398, 1967
- [20] R. H. Teunter, "Economic ordering Quantities for repairable/manufacturable item inventory system," Preprint No. 31, Faculty of Economics and Management, Otto von Guericke University of Magdeburg, Germany, 1998
- [21] R. H. Teunter, "Economic ordering Quantities for Recoverable Item Inventory Systems," Naval Research Logistics, Vol. 46, pp. 484-495, 2001
- [22] K. B. Yoon "Standardization Model Development and its Effect Analysis for Effective Available Stock Management Process of Automobile Parts Manufacturing Industry using the ERP System," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 16, pp.279-288, 2011

저 자 소 개



이 용 현

2005년 : 세종대학교 컴퓨터공학과 학사
현 재 : 고려대학교 정보경영전문대
학원 석사과정
관심분야 : 역물류, 스마트 그리드
분산시스템, 그린물류
네트워크 시스템
Email : fmlyh@korea.ac.kr



이 철 응

1992년 : 서울대학교 산업공학과 학사
1994년 : 서울대학교 산업공학과 석사
2000년 : Pennsylvania State Univ
공학박사
현재 : 고려대학교 정보경영공학부
부교수
관심분야 : e-Marketplace, 항공/해운
교통물류, 물류시스템
설계 및 제어
Email : Leeccu@korea.ac.kr