Journal of the Korea Academia-Industrial
cooperation Society
Vol. 17, No. 8 pp. 691-697, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.8.691
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

# 회수 품질이 불확실한 재제조 시스템의 회수 가격 결정 모형

이지수
금오공과대학교 산업공학부

# Procurement Pricing Strategy for Remanufacturing System under Uncertainty in Quality of Used Product

**Ji Soo Lee**
**School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology**

**요 약** 재제조란 고객시장으로부터 회수된 중고품의 닳거나 고장 난 부품을 성한 것으로 교체하여 재제조품 시장에 재판매하는 것을 말한다. 본 논문은 사용된 제품의 회수량이 회수 가격의 함수로 나타나며 일정 계획기간 동안의 재제조품에 대한 수요량이 주어진 경우의 회수 및 재제조 정책을 다룬다. 회수한 사용후 제품은 분해 검사를 통하여 품질을 확인하며 검사가 끝난 회수제품의 품질이 고품질과 저품질의 두 부류로 분류되고 품질 수준에 따라 재제조비용이 상이해 지는 현실적 상황을 가정한다. 두 부류의 분류확률에 불확실성이 없는 경우 및 불확실성이 있는 경우 각각을 대상으로 재제조 시스템의 총비용을 최소화 하는 회수가격 및 재제조 정책을 결정하기 위한 수리모형을 개발한다. 개발한 모형의 수리적 특성을 분석하여 최적해를 구하는 절차를 찾아내고, 최적해가 얻어지는 경우를 분석하여 재제조시스템의 생산경영자에게 시사해주는 검사비용 크기의 경영학적 함의를 밝힌다. 수치 예를 통하여 검사비용 및 회수품 시장규모가 변화함에 따라 최적회수가격이 변화하는 양태를 분석하여 최적해의 민감도를 분석하고, 고품질과 저품질의 어느 한 부류로 분류되는 확률의 불확실성이 커질 때 불확실성을 무시한 의사결정의 오류가 어떻게 변화하는지 고찰한다.

**Abstract** Remanufacturing refers to restoring a used product to an acceptable condition for resale in the market of remanufactured items. In this paper, we deal with the acquisition price and remanufacturing decision for remanufacturing systems in the case where the demand for the remanufactured product in a single period is known and the return quantity of the used product is determined by its acquisition price. The quality of the acquired used product is categorized into two classes, high and low, through inspection and different qualities incur different remanufacturing costs. The probability that the acquired used product is categorized as high class can be a constant or random variable. We derive the expected total cost functions, obtain the optimal solutions, and interpret the managerial meaning of the optimal solution for each case. The sensitivity of the optimal solution with respect to the variation of the inspection cost and uncertainty of the quality of the used product is investigated through numerical examples.

**Keywords :** Acquisition price, Inspection cost, Remanufacturing, Return rate, Quality uncertainty

## 1. 서론

지속가능성을 고려한 경영은 생산경영의 중요한 이슈이며 이를 가능하게 해주는 여러 방법론 중 원가절감과 환경보호를 동시에 달성하게 해주는 재제조 (remanufacturing)가 특히 많은 기업의 관심을 끌고 있다. 재제조란 고객시장으로부터 회수된 중고품의 닳거나 고장 난 부품을 성한 것으로 교체하여 재제조품 시장에 재판매하는 것을 말한다.

재제조 기업의 제품회수율 혹은 회수량은 일정하다고

이 연구는 2014학년도 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문임.
*Corresponding Author : Ji Soo Lee(Kumoh National Institute of Technology)
Tel: +82-54-478-7652 email: jslee@kumoh.ac.kr
Received July 4, 2016 Revised July 27, 2016
Accepted August 11, 2016 Published August 31, 2016

볼 수 있을 정도로 안정적일 수도 있고, 경험적으로 알려진 확률분포를 따르는 확률 변수일 수도 있을 것이다. 더욱 현실적인 상황은 제품의 회수량이 회수 가격의 함수로 나타나는 상황인데, 이 경우 생산자가 제시하는 회수물품가격에 따라 회수량이 변동한다. 회수한 제품은 검사를 통해 상태를 점검하고 재제조하여 재제조품시장에 판매하게 되는데, 회수된 제품의 상태에 따라 재제조에 드는 비용 또한 달라진다. 실제 회수된 제품은 사소한 외관 문제로부터 폐기해야할 정도로 심각한 기능오류 상태까지 다양한 수준의 품질상태를 보인다[1]. 회수된 제품의 상태를 검사한 후 재제조여부를 결정하는 것은 생산경영자의 중요한 임무 중의 하나이다. 많은 경우 회수된 제품의 품질은 회수 시점에서는 파악하기 힘들고 회수된 제품을 분해 검사하여 품질 상태를 판단하게 된다. 회수된 제품의 상태가 양호할수록 재제조 비용은 낮을 것이므로 제품의 상태 분류 후에 상태가 양호한 제품부터 재제조하는 것은 당연하다.

본 논문에서는 회수되는 제품의 수량이 회수가격(acquisition price)에 의해 결정되고 회수된 제품의 검사 후 상태가 2개 등급으로 분류되는 재제조품을 대상으로 특정 기간의 재제조품 수요량이 주문에 의해서 주어진 경우에 제품회수 가격 및 재제조 정책을 결정하는 단일 기간 생산계획 모형을 다룬다. 본 논문의 대상이 되는 공급사슬(supply chain)체계는 Fig. 1. 과 같이 단순화 하여 묘사할 수 있다.

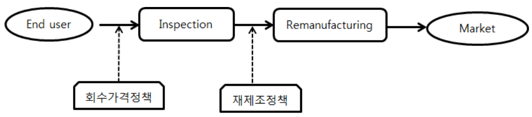


Fig. 1. Acquiring, sorting, remanufacturing system

## 2. 선행연구

소비자에게 팔려 나가 사용된 후 중고품 상태로 회수되어 재활용 혹은 재제조 되는 물품의 재고정책에 관한 연구는 지속가능경영이 문제시 된 2000년대에 들어 활발하게 진행되기 시작했다. 재제조는 기업이 환경보존에 기여하는 것을 뛰어넘어 경제적 이득을 취하는 강력한 수단이 되기도 하는데, Geyer와 Blass[2]는 영국과 미국의 휴대전화 역물류(reverse logistics) 시스템을 대상으로 구체적인 자료를 구하여 분석함으로써 휴대전화의 재활용과 재제조가 충분히 경제성이 있는 사업이라는 것을 입증하였다.

재제조시스템의 수리적 모형화와 분석은 활발히 연구되고 있는데, 이 중에는 재제조품의 품질과 관련된 연구도 다수를 차지하고 있다. Guide 등[1]은 회수된 제품(returned product)의 품질이 사소한 외관 문제로부터 폐기해야할 정도로 심각한 기능오류상태까지 다양한 수준의 품질상태를 보임에도 불구하고 회수시점에서는 파악하기 힘들다는 것을 고려하여, 이러한 재사용율의 불확실성을 어떻게 생산/재고정책에 반영하느냐는 것에 대한 연구를 수행하였다. Mitra[3]는 회수한 제품의 재제조 결과가 새 제품과 동일한 재제조품과 품질수준이 낮은 리퍼제품으로 분류되는 경우에 각각의 가격을 어떻게 결정하면 기대이익을 극대화할 것인가를 연구하였다. Galbreth 와 Blackburn(2006)[4]은 회수된 물품의 품질상태를 재제조비용으로 대체하여 표현할 수 있는 경우를 대상으로 그 표현방법을 연구하였고, Galbreth 와 Blackburn(2010)[5]은 회수한 사용품의 품질 수준이 다양할 때 회수비용, 폐기비용 및 재제조비용의 상충(tradeoff)을 고려한 최적 회수량을 결정하는 문제를 다루었다. Wang 등[6]은 수요와 회수율이 모두 확률적인 제품을 대상으로 총비용을 최소화하는 재제조비율과 새제품 제조량을 동시에 결정하는 문제를 다루었다. Teunter와 Flapper[7]은 회수한 제품의 품질 수준이 다단계(multiple classes)이고 각 로트 크기가 다항분포를 따를 때 회수와 재제조정책을 다루었다. 이지수[8]는 회수된 제품의 수량은 주어져 있지만 품질의 수준이 다양하게 존재하며 품질에 따라 재제조비용이 달라지는 경우를 대상으로 재제조 수량과 새제품 제조량을 동시에 결정하는 문제를 다루었다. 최근 발간된 Ilgin과 Gupta[9]의 저서에는 재제조시스템과 관련한 다양한 수리모형과 분석 방법들이 잘 정리되어 소개되어 있다.

재제조와 관련된 최근의 이슈 중 하나는 사용 후 제품의 회수가격에 따라 회수량이 달라지는 경우의 생산계획 문제이다. Cai 등[10]은 휴대전화 재제조기업인 ReCellular의 사례를 분석하여, 회수된 사용후 제품은 핵심부품의 훼손 정도가 경미하여 재제조 비용이 작게 소요되는 높은 품질등급과 핵심부품의 훼손 정도가 심각하여 재제조비용이 많이 소요되는 낮은 품질등급의 2단계 품질등급으로 분류되는 경우가 일반적임을 보여주고

이 경우의 사용 후 제품 회수가격을 동적으로 결정하는 방법을 연구하였다. Watanabe와 Kusukawa[11]는 단일 생산계획기간의 수요분포를 알고 있고 사용한 제품의 회수량이 회수가격의 함수로 주어지며 재제조제품의 품질은 새 제품과 같아지는 경우를 대상으로 재제조 수량과 새제품 제조량을 동시에 결정하는 문제를 다루었다.

본 논문에서는 사용된 제품의 회수량이 회수 가격의 함수로 나타나며 검사가 끝난 제품의 품질이 고품질과 저품질의 두 부류로 분류되는 상황을 가정하고, 재제조품 시장으로부터 주문받은 재제조제품을 주문수량에 맞추어 공급해야 하는 상황을 대상으로, 재제조 시스템의 총비용을 최소화 하는 사용 후 제품 회수가격 및 재제조 정책을 결정하기 위한 수리모형을 개발한다. 개발한 모형의 최적해를 구하는 절차를 찾아내고 그로부터 재제조 생산을 관리하는 경영자가 얻을 수 있는 직관을 해석하며, 수치 예를 통하여 상황변화에 따른 민감도 분석을 수행한다.

## 3. 수리모형의 개발

본 장에서는 1장에서 제시한 Fig. 1 로 묘사되는 제품 회수 및 재제조 시스템을 대상으로 제품의 회수, 검사 및 재제조와 관련된 총비용을 구하는 수리 모형을 개발한다. 회수된 제품은 회수 후 분해검사를 통해 높은 품질과 낮은 품질의 두 부류로 분류되는데, 각 부류로 분류될 확률이 상수인 경우와 확률변수인 경우로 나누어 기대총비용함수를 유도하고, 총비용을 최소하는 회수가격을 결정하며 그 결과를 생산관리 측면에서 해석한다.

### 3.1 모델의 가정 및 사용 기호

Cai 등[10]의 논문에서 예로 제시한 휴대전화 재제조 기업인 ReCellular의 사례처럼 회수된 사용후제품 중 재제조 가능한 제품은 높은 품질등급과 낮은 품질등급의 2단계 품질등급으로 분류되는 경우를 대상으로 하며, 품질등급에 따라 재제조비용이 달라진다. 회수제품의 수량은 Cai 등[10]이나 Watanabe와 Kusukawa[11]의 경우처럼 회수가격의 직선함수로 나타나는 상황을 가정한다. 이 경우 생산관리자는 먼저 수요량과 회수량 함수를 감안하여 회수가격을 결정하고, 회수된 전량을 분해검사하여 등급을 결정한 후 높은 등급부터 차례대로 주문받은 수요량을 만족시킬 때 까지 재제조하게 된다.

주어진 모수와 변수에 사용되는 기호는 가능하면 Teuner와 Flapper[7]의 논문에서 사용한 기호와 동일하게 사용하며, 다음과 같다.

$c^a$ : 사용 후 제품의 회수가격

$A(c^a)$ : 회수가격을 $c^a$로 책정할 경우 회수품의 수량

$A(c^a) = \alpha c^a + \beta \ (\alpha > 0, \beta \geq 0)$

$A_k$ : 검사결과 $k$ 품질등급으로 분류되는 제품의 수량

$k$는 품질등급을 나타내는 첨자

($k = H$: 높은 등급, $k = L$: 낮은 등급)

$c_k^r$ : $k$ 품질등급 제품의 재제조 비용

($c_H^r < c_L^r$)

$c^i$ : 회수한 제품의 분해검사 비용

$D$ : 재제조품 수요량

주문 받은 수요량이 알려져 있는 경우를 가정하므로 총기대비용 $TC$는 제품회수비용, 분해검사비용 및 재제조비용의 합으로 이루어진다. 결정변수는 회수가격 $c^a$이므로, $TC(c^a)$는 식(1)과 같이 얻어진다. $\beta = 0$으로 하여도 일반성을 잃지 않으므로, 수식전개 및 해석의 편리를 위해 $A(c^a) = \alpha c^a$ 의 경우를 분석한다.

$$\begin{aligned} TC(c^a) &= c^a A(c^a) + c^i A(c^a) + c_H^r A_H + c_L^r A_L \quad (1) \\ &= \alpha c^{a2} + c^i \alpha c^a + c_H^r A_H + c_L^r A_L \end{aligned}$$

수요량이상을 회수하여야 하므로 $\alpha c^a \geq D$이어야 하고 이는 $c^a \geq \dfrac{D}{\alpha}$를 뜻한다.

#### 3.1.1 회수제품품질에 불확실성이 없는 경우

회수제품품질의 분포에 불확실성이 없는 경우는 구입한 회수제품의 검사결과 높은 품질로 판명될 확률 $p_H$ 및 낮은 품질로 판명될 확률 $p_L$이 일정한 상수가 되고, 총회수제품 중 높은 품질 제품의 개수는 이항분포를 따르게 된다. 따라서 $k$ 품질등급으로 분류되는 제품의 기대수량은 각각 $E[A_H] = \alpha c^a p_H$, $E[A_L] = \alpha c^a (1 - p_H)$이다. 높은 품질회수품의 재제조비용이 낮은 품질 회수품의 재제조비용보다 작은 것이 자명하고 높은 품질의 회수품부터 재제조하여 수요량 $D$를 채우게 되므로, 총비용함수는 $\alpha c^a p_H \geq D$ (즉, $c^a \geq \dfrac{D}{\alpha p_H}$)이면 식(2)와 같이 되고 $\alpha c^a p_H < D$ (즉, $c^a < \dfrac{D}{\alpha p_H}$)이면 식(3)과 같

이 된다.

$$TC(c^a) = \alpha c^{a\,2} + c^i \alpha c^a + c_H^r D \tag{2}$$

$$TC(c^a) = \alpha c^{a\,2} + c^i \alpha c^a + c_H^r \alpha c^a p_H + c_L^r \left[D - \alpha c^a p_H\right] \tag{3}$$

식(2)와 식(3)으로 나타나는 총비용함수를 분석하면 최적회수가격(Optimal acquisition price) $c^{a*}$를 구하는 Proposition을 아래와 같이 얻을 수 있다.

**Proposition 1** : $B = p_H(c_L^r - c_H^r)$ 라고 할 때

$$c^{a*} = \begin{cases} \dfrac{D}{\alpha p_H} & c^i \le B - \dfrac{2D}{\alpha p_H} \\ \dfrac{-c^i + B}{2} & B - \dfrac{2D}{\alpha p_H} < c^i \le B - \dfrac{2D}{\alpha} \\ \dfrac{D}{\alpha} & B - \dfrac{2D}{\alpha} < c^i \end{cases}$$

Proof : $c^a \ge \dfrac{D}{\alpha p_H}$에서 유효한 식(2)는 식(4)와 같이 다시 정리할 수 있고, $TC(c^a)$는 대칭축이 음수인 2차 볼록함수이므로 $c^a = \dfrac{D}{\alpha p_H}$ 에서 최소값 $c_H^r D + \dfrac{D}{p_H}[\dfrac{D}{\alpha p_H} + c^i]$ 를 갖는 단조증가함수이다.

$$TC(c^a) = \alpha(c^a + \frac{c^i}{2})^2 - \frac{\alpha c^{i^2}}{4} + c_H^r D \tag{4}$$

$c^a < \dfrac{D}{\alpha p_H}$에서 유효한 식(3)은 식(5)와 같이 다시 정리할 수 있으므로 대칭축이 $c^a = \dfrac{-c^i + B}{2}$인 2차볼록함수이다.

$$TC(c^a) = \alpha(c^a + \frac{c^i - B}{2})^2 - \frac{\alpha(c^i - B)^2}{4} + c_L^r D \tag{5}$$

따라서 대칭축이 $\dfrac{D}{\alpha}$와 $\dfrac{D}{\alpha p_H}$로 나뉘어지는 세영역 중 어디에 위치하느냐에 따라 최소값이 달라진다. 즉, $\dfrac{-c^i + B}{2} \ge \dfrac{D}{\alpha p_H}$이면 $c^{a*} = \dfrac{D}{\alpha p_H}$이고, $\dfrac{D}{\alpha} \le \dfrac{-c^i + B}{2} < \dfrac{D}{\alpha p_H}$이면 $c^{a*} = \dfrac{-c^i + B}{2}$이며, $\dfrac{-c^i + B}{2} < \dfrac{D}{\alpha}$이면 $c^{a*} = \dfrac{D}{\alpha}$이다. ■

Proposition 1이 생산관리자에게 주는 경영학적 함의는, 회수제품의 분해검사비용이 특정한 값 이하이면 높은 등급 회수품이 수요량만큼 되도록 충분히 회수하고, 분해검사비용이 특정한 값 이상이 되면 낮은 등급 회수품도 일부 재제조해야 할 만큼 회수하여야 하며, 분해검사비용이 너무 커지면 수요량만큼만 회수하여 회수한 제품을 모두 재제조하는 것이 최적의 의사결정이라는 것이다.

### 3.1.2 회수제품품질에 불확실성이 있는 경우

이 절에서는 회수제품품질의 분포에 불확실성이 있는 경우를 다루며, 구입한 회수제품의 검사결과 높은 품질로 판명된 제품의 비율 $p_H$가 특정한 확률분포 $f(p_H)$를 따르는 확률변수라고 가정한다. $p_H$의 확률분포로는 베타분포가 가장 일반적으로 사용된다.

앞 절에서 기술하였듯이 회수품 검사결과 높은 품질의 회수품부터 재제조하여 수요량 $D$를 채우게 되고 부족분이 발생한 경우에만 낮은 품질의 회수품도 재제조하게 되므로, $\alpha c^a p_H \ge D$ (즉, $p_H \ge \dfrac{D}{\alpha c^a}$)인 경우와 $\alpha c^a p_H < D$ (즉, $p_H < \dfrac{D}{\alpha c^a}$)인 경우로 나눈 후 두 경우를 함께 고려한 총기대비용함수를 구하면 식(6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E[TC(c^a)] &= \int_{\frac{D}{\alpha c^a}}^{1} [\alpha c^{a2} + c^i \alpha c^a + c_H^r D] f(p_H) dp_H \\ &+ \int_0^{\frac{D}{\alpha c^a}} [\alpha c^{a2} + c^i \alpha c^a + c_H^r \alpha c^a p_H + c_L^r \{D - \alpha c^a p_H\}] f(p_H) dp_H \\ &= D(c_L^r - c_H^r) \int_0^{\frac{D}{\alpha c^a}} f(p_H) dp_H \\ &- \alpha c^a (c_L^r - c_H^r) \int_0^{\frac{D}{\alpha c^a}} p_H f(p_H) dp_H + \{\alpha c^{a2} + \alpha c^i c^a + c_H^r D\} \end{aligned} \tag{6}$$

식(6)으로 묘사되는 총기대비용함수를 최소화하는 $c^{a*}$를 구하기 위하여 식(6)을 $c^a$에 대하여 미분하여 정리하면 식(7)를 얻는다.

$$\frac{dE[TC(c^a)]}{dc^a} = -\alpha(c_L^r - c_H^r) \int_0^{\frac{D}{\alpha c^a}} p_H f(p_H) dp_H + 2\alpha c^a + \alpha c^i \tag{7}$$

식(7)을 0으로 놓고 풀면 총기대비용함수를 최소화하는 회수품 최적구매비용 $c^{a^*}$를 얻기 위한 관계식인 식(8)을 얻는다.

$$\int_0^{\frac{D}{\alpha c^{a^*}}} p_H f(p_H) dp_H = \frac{2c^{a^*} + c^i}{c_L^r - c_H^r} \qquad (8)$$

식(8)을 분석하면 최적회수가격(Optimal acquisition price) $c^{a^*}$를 구하는 Proposition을 아래와 같이 얻을 수 있다

**Proposition 2** : $\overline{B} = \overline{p_H}(c_L^r - c_H^r)$ 라고 할 때, $c^i \le \overline{B} - \frac{2D}{\alpha}$이면 식(8)을 만족하는 $c^{a^*} \ge \frac{D}{\alpha}$인 $c^{a^*}$가 유일하게 존재하고 이 값이 최적회수가격이며, $c^i > \overline{B} - \frac{2D}{\alpha}$이면 $c^{a^*} = \frac{D}{\alpha}$이 최적회수가격이다.

Proof : 식(8)의 좌변 식은 $c^a \ge \frac{D}{\alpha}$에서 단조감소하는 함수이며, 최대값은 $c^a = \frac{D}{\alpha}$에서 $\int_0^1 p_H f(p_H) dp_H$이고 이는 $p_H$의 평균값 $\overline{p_H}$ 이다. 식(8)의 우변식은 $c^a \ge \frac{D}{\alpha}$에서 단조증가하는 직선함수이며, 최소값은 $c^a = \frac{D}{\alpha}$에서 $\frac{\frac{2D}{\alpha} + c^i}{c_L^r - c_H^r}$이다. 따라서 $\overline{p_H} \ge \frac{\frac{2D}{\alpha} + c^i}{c_L^r - c_H^r}$인 경우, 즉 $c^i \le \overline{B} - \frac{2D}{\alpha}$인 경우에는 $c^a \ge \frac{D}{\alpha}$ 영역에서 좌변식과 우변식은 유일한 교차점을 갖는다. $c^i \le \overline{B} - \frac{2D}{\alpha}$ 이면 $c^a \le \frac{D}{\alpha}$에서 교차점을 갖게 되지만 수요량을 만족시키려면 $c^a = \frac{D}{\alpha}$로 책정하여 $D$개를 회수하여야 한다.

식(6)을 $c^a$에 대하여 2차미분하여 정리하면 아래 식을 얻으므로 총기대비용함수는 볼록함수(convex)이고 위에서 얻어진 값에서 최소값을 갖는다.

$$\frac{d^2 E[TC(c^a)]}{dc^{a2}} = (c_L^r - c_H^r)\frac{D^2}{\alpha c^{a2}} + 2\alpha > 0 \qquad ■$$

Proposition 2가 생산관리자에게 주는 경영학적 함의는, 회수제품품질의 분포에 불확실성이 존재하여 높은 품질로 평가되는 회수품의 비율 $p_H$가 확률변수로 표현되는 경우에는 회수제품의 분해검사비용이 $p_H$의 평균값 $\overline{p_H}$를 사용하여 계산되는 특정한 값 이하이면 총기대비용함수를 최소화하는 회수비용을 책정하여 수요량보다 더 많은 제품을 회수하고, 분해검사비용이 특정한 값 이상으로 커지면 수요량만큼만 회수하여 회수한 제품을 모두 재제조하는 것이 최적의 의사결정이라는 것이다.

## 4. 수치예제 및 민감도분석

이 절에서는 3장에서 유도한 최적해를 구하는 과정을 수치예제에 적용하고, 몇 가지 민감도분석을 수행한다.

먼저, 회수제품에서 차지하는 특정등급품질의 비율에 불확실성이 없는 경우의 수치예제를 대상으로 3.1.1.절에서 개발한 최적해를 구하는 절차를 적용해보고, 회수제품 검사비용이 변화함에 따라 최적해(최적구매가격)이 어떻게 변화하는지 살펴본다.

(예제 1)

주어진 모수는 $c^i$=2.5, $c_H^r$=10, $c_L^r$=22, $p_H$=0.6, $A(c^a) = 5c^a$(즉, $\alpha$=5), $D$=10이다.

Proposition 1을 이용하여 최적회수가격을 구하면 $c^{a^*}$=2.35이고, 이 때의 회수품 개수는 11.75개가 된다.

Proposition 1의 해석 과정에서 보았듯이 회수제품의 분해검사비용이 회수가격 결정에 큰 영향을 미치므로, 분해검사비용이 회수가격이 변화함에 따라 최적 회수가격이 얼마나 민감하게 반응하는지 관찰하기 위해 (예제 1)에서 사용한 모수를 그대로 사용하되 분해검사비용 $c^i$만 0.5부터 5까지 0.5씩 증가시키면서 $\alpha$=5, 6, 7인 각 경우에 대해 최적해를 구하고 이를 그래프로 표현한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2에서 보듯이 회수품 시장규모(Market scale)를 나타내는 $\alpha$값이 커질수록 그 회수가격은 작게 제시하는 것이 최적이다.

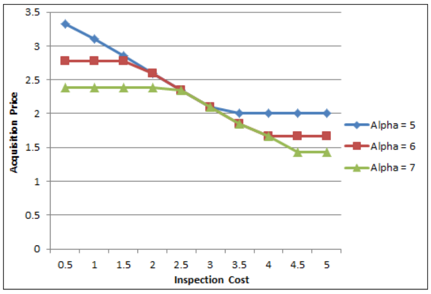


Fig. 2. The effect of inspection cost on the acquisition price

Fig. 2에서 구한 회수가격을 회수량으로 바꾸어 표현하면 Fig. 3을 얻는다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 회수품 검사비용이 커질수록 회수가격을 작게 제시하여 회수품의 수를 줄이는 것이 비용을 최소화한다는 것을 알 수 있으며 이는 우리의 직관과 일치한다.

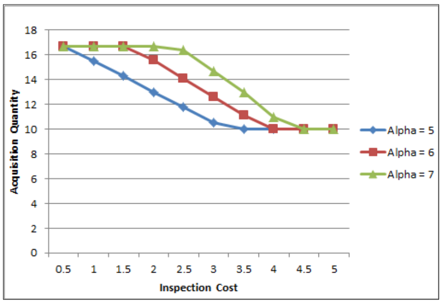


Fig. 3. The effect of inspection cost on the acquisition quantity

회수제품의 품질에 불확실성이 있는 경우의 수치 예를 보기 위해 $p_H$의 확률분포 $f(p_H)$로 베타분포의 특수형태인 균일분포(Uniform distribution)를 가정한다.

(예제 2)

주어진 모수는 $c^i$=2.0, $c_H^r$=10, $c_L^r$=25, $A(c^a)=5c^a$ (즉, $\alpha$=5), $D$=5이고, $p_H$ ~ U(0.2, 0.6)을 가정한다.

$p_H$를 0.2와 0.6사이의 균일분포로 가정했으므로 $\overline{p_H}$=0.4가 되고, 3.1.2절에서 유도한 Proposition 2를 이용하여 최적회수가격을 구하면 $c^{a*}$=1.914이고, 이 때의 회수품 개수는 9.57개가 된다.

회수제품의 품질에 불확실성이 있음에도 불구하고 품질에 불확실성이 없다고 가정하여 $\overline{p_H}$를 상수 $p_H$로 보고 Proposition 1을 이용하여 해를 구할 경우에 총비용에 얼마나 큰 오차가 발생하는지 관찰해 본다. Proposition 1을 사용하여 해를 구했을 때의 총비용을 $TC^o$라고 하고 Propositipo 2를 이용하여 구한 최적해의 총비용 $TC^*$와의 총비용%편차를 아래와 같이 정의한다.

$$\text{cost \% deviation} = \frac{TC^o - TC^*}{TC^*} \times 100(\%)$$

$p_H$의 분산이 변화함에 따라 총비용%편차가 얼마나 민감하게 반응하는지 관찰하기 위해 (예제 2)에서 사용한 모수를 그대로 사용하되 $\overline{p_H}$=0.4는 유지하면서 균일분포의 상한과 하한을 조정하여 $p_H$의 분산을 변경해 가면서 각 경우에 대해 $TC^*$를 구한다. 각 경우의 $TC^*$와 $TC^o$를 이용하여 총비용%편차를 구한 후 분산변화에 따른 총비용%편차의 변화 형태를 그래프로 그리면 Fig. 4를 얻는다.

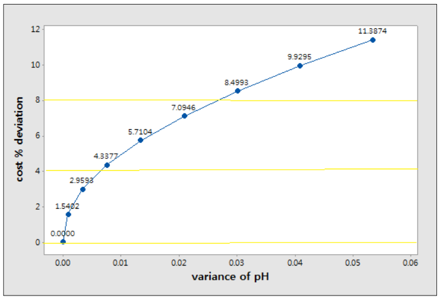


Fig. 4. The Influence of uncertainty in $p_H$ on cost percent deviation

Fig. 4를 보면 $p_H$의 분산이 커질수록 총비용%편차가 커진다는 것을 알 수 있다. 즉, $p_H$의 불확실성이 클수록 $p_H$를 상수로 보고 해를 구하면 오류가 점점 더 커진다는 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 제품의 회수량이 회수 가격의 함수로 나타나고 검사가 끝난 제품의 품질등급이 두 부류로 분류되며 재제조제품을 주문수량에 맞추어 공급해야 하는 상황을 대상으로, 각 품질등급으로 분류될 확률이 상수

인 경우와 확률변수인 경우 각각에 대해서 총비용을 최소화 하는 제품 회수가격을 결정하기 위한 수리모형을 개발하였다. 최적해를 구하는 절차를 나타내는 Proposition들을 유도하고, 그로부터 재제조 생산경영자가 얻을 수 있는 경영학적 함의를 해석한 결과 회수제품의 분해검사비용이 최적해의 위치를 정하는데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었으며 수치 예를 통하여 이를 확인하였다. $p_H$의 불확실성이 존재함에도 불구하고 $p_H$를 상수로 보고 해를 구하면 해의 오류가 생기는데, 불확실성이 클수록 해의 오류가 점점 더 커진다는 것 또한 수치 예를 통하여 확인할 수 있었다.

## References


[1] V. D. R. Guide Jr., R. H. Teunter, L. N. Van Wassenhove, "Matching Demand and Supply to Maximize Profits from Remanufacturing", *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 5, No. 4, pp. 303-316, 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.1287/msom.5.4.303.24883

[2] R. Gayer, V. D. Blass, "The Economies of Cell Phone Reuse and Recycling", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47, No.5 , pp. 515-525, 2010.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2228-z

[3] S. Mitra, "Revenue Management for Remanufactured Products", *Omega*, Vol. 35, No. 5, pp. 553-562, 2007.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2005.10.003

[4] M. R. Galbreth, J. D. Blackburn, "Optimal Acquisition and Sorting Policies for Remanufacturing, *Production and Operations Management*, Vol. 15, N0. 3, pp.61-69, 2006.

[5] M. R. Galbreth, J. D. Blackburn, "Optimal Acquisition Quantities in Remanufacturing with Condition Uncertainty", *Production and Operations Management*, Vol. 19, N0. 1, pp. 61-69, 2010.

[6] J. Wang, J. Jhao, X. Wang, "Optimal Policy in Hybrid Manufacturing/Remanufacturing System", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 60, pp. 411-419, 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2010.05.002

[7] R. H. Teunter, S. D. P. Flapper, "Optimal Core Acquisition and Remanufacturing Policies under Uncertain Core Quality Fraction", European *Journal of Operational Research*, Vol. 210, pp. 241-248, 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.015

[8] J. S. Lee, "Optimal Production Policy for Hybrid Manufacturing/Remanufacturing System with Condition Uncertainty", *Journal of the Korea Management Engineers Society*, Vol.19, No. 1, pp. 25-38, 2014.

[9] M. A. Ilgin, S. M. Gupta, *Remanufacturing Modelling and Analysis*. CRC Press, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.1201/b11778

[10] Xiaoqiang Cai, Minghui Lai, Xiang Li, Yongjian Li, Xiany Wu , "Optimal Acquisition and Procurement Policy in a hybrid Manufacturing and Remanufacturing System with Core Acquisition at Different Quality Levels", European *Journal of Operational Research*, Vol. 233, pp. 374-382, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.017

[11] Takeshi Watanabe, Etsuko Kusukawa, "Optimal Operation for Green Supply Chain Considering Demand Information, Collection Incentive and Quality of Recycling Parts", *Industrial Engineering and Management Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 129-147, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.7232/iems.2014.13.2.129



**이 지 수(Ji Soo Lee)** **[정회원]**

- 1981년 2월 : 서울대학교 산업공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : KAIST 산업공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : KAIST 산업공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 산업공학과 교수

<관심분야>
생산계획 및 통제, SCM, 원가관리