

# 하방 수요 대체가 허용되는 역공급망에서 신제품 및 재생제품 재고 관리

김 은 갑<sup>†</sup>

이화여자대학교 경영대학

## Managing Inventories of Brand-New and Recovered Products in a Reverse Supply Chain with Downward Demand Substitution

Eungab Kim

College of Business Administration, Ewha Womans University

### ■ Abstract ■

This paper considers a reverse supply chain with simultaneous recovery of used products and manufacturing of brand-new ones. Recovered products are downgraded and have to be sold in a market different from that of brand-new products at a different price. In case of a shortage of recovered product inventory, a brand-new item, if available, can be offered at the price of a recovered product. In other words, one-way demand substitution is allowed. We address the joint decision of when to manufacture brand-new product, when to recover returned product, and how to control demand substitution to maximize the hybrid production system's profits. To this end, we propose a Markov decision Process model and investigate the structure of the optimal policy. Performance comparison is numerically implemented between the models with and without downward demand substitution option under different operating conditions of the system parameters.

Keywords : Reverse Supply Chain, Product Return, One-Way Demand Substitution, Recovered Product, Hybrid Production System



주제들은 다음과 같다. 첫째, 신제품 생산에 대한 의사 결정이다. 신제품 재고의 크기는 미래의 독자 수요뿐만 아니라 재생제품 수요 대체를 고려하여 결정되어야 한다. 둘째, 재생제품 생산에 대한 의사 결정이다. 회수 제품 재가공은 재생제품 재고유지비용을 높이기 되므로 미래의 재생제품 수요와 확보된 회수 제품 재고 크기를 고려하여 결정되어야 한다. 셋째, 재생제품 재고 고갈인 상황에서 수요가 발생했을 경우, 수요 대체 허용 여부에 대한 의사 결정이다. 이 결정은 현재 확보된 신제품 재고 수준과 미래의 신제품 수요 크기를 고려하여 이루어져야 한다.

본 논문은 기업의 수익을 최대화하기 위한 최적의 신제품과 재생제품 생산, 그리고 수요 대체 통제 전략의 특성을 분석한다. 본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구 모형을 마코프 의사 결정(Markov Decision Process, 이하 MDP) 문제로 모형화하고, 최적 통제 전략의 함수적 특성을 파악하였다. 둘째, 수치 실험을 통해 재생제품 수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 영향을 모형의 모수들 관점에서 분석하였다.

생산-재가공 혼성 시스템을 연구한 기존 문헌에서 재고 관리는 주기적 보충 방식과 연속형 보충 방식으로 나눌 수 있다. 주기적 재고 보충 방식에서는 최적 재고 보충 정책을 규명하는 연구가 주를 이루는데 반해 연속적 재고 보충 방식에서는 주어진 재고 보충 정책의 최적 모수 값들을 결정하는 연구들이 주를 이루어왔다. 연속형 재고 보충 방식에서 최적 정책에 대한 연구가 진행되지 않았던 가장 주된 이유는 생산과 재가공에 소요되는 시간이 확률적이라는 데서 기인하는 문제의 복잡성 때문이다[13]. 연속형 방식에서 생산과 재가공 시간이 확률적일 때 최적 재고 보충 정책을 분석할 수 있는 방법론은 MDP 모형이며, 확률모형 시스템에서 MDP 모형을 이용하여 최적 정책을 규명하는 연구는 관련 분야에서 보편화된 연구 방법론이다. 본 논문은 MDP 모형을 적용시키기 위해서 생산과 재가공 시간을 지수 분포로 가정한다. 생산/재가공 시간이 지수분포를 따르는 가정이 현실성이 낮음에도 불구하고 MDP

모형을 이용해서 최적 정책의 구조를 분석하는 가장 주된 이유 중의 하나는 최적 정책에 대한 분석을 통해서 얻은 함수적 특성들이 휴리스틱 재고 보충 정책을 개발하는데 유용하게 활용될 수 있기 때문이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 연구 모형과 관련된 문헌 연구를 진행하였으며, 제 3절은 연구 모형의 주요 가정과 MDP 모형을 제시하였다. 제 4장은 최적 정책의 함수적 특성을 기술하였고, 제 5장에서는 MDP 모형에 대한 수치 실험을 수행하였다. 마지막 절에서는 결론을 기술하였다.

## 2. 문헌 연구

제품 회수가 이루어지는 역공급망에서 생산/재고 관리를 연구한 대부분의 기존 연구 문헌들은 신제품과 재생제품간의 품질 수준이 동일하여 제품 차별화가 이루어지지 않는다고 가정한다. Simpson[20]은 신제품 재고 보충, 회수제품 수용/처분, 수용된 회수 제품 재가공을 통제하는 문제를 다루었으며, 세 가지 임계치 값들에 의해 운영되는 최적 정책을 규명하였다. Inderfurth[8]는 외부 주문과 재가공시 고정 비용이 발생하지 않는다고 가정한 후, 신제품 주문과 재가공 프로세스에 따른 고정 인도 기간의 영향을 분석하였다. Teunter and Vlachos[21]은 제품 수요가 낮고 제품 회수율은 높으며, 재가공 비용과 신제품 생산 비용 간에 큰 차이가 나지 않는다면, 회수 제품을 처분하는 것이 비용 절감에 기여할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. Mahadevan et al.[16]은 고정 기간마다 회수된 모든 제품을 재가공하고, 판매용 제품의 재고 수준이 목표 수준 이하가 되면, 목표 수준에 도달시킬 수 있는 양을 생산하는 모델을 제안하였다. Fleischmann and Kuik[7]은 회수 제품 재가공 시간이 신제품 주문 인도기간보다 짧다면 (s, S) 주문정책이 최적임을 증명하였다. 제품 회수 프로세스가 고객 수요 프로세스에 종속적인 연구 모형은 Yuan과 Cheung(1998)에서 다루졌는데, 마코프 체인의 결과를 이용하여 재고 보충 정책을 제

산할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. Inderfurth et al.[9]은 다양한 재가공 옵션이 존재할 때, 옵션별로 최적 재고 충전 정책의 파라미터 값들을 결정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 김은갑과 정봉주[2]는 최적의 신제품 구매 정책과 구매량을 결정하는 연구를 수행하였고, 김은갑[1]은 최적의 신제품 생산 정책과 회수제품 수용 통제 정책의 함수적 특성을 분석하였다. 제품 회수가 이루어지는 역공급망에서 생산/재고 관리를 연구한 문헌들에 대한 상세한 분석은 Junior, and Filho[12]에 나와 있다.

신제품과 재생제품간의 품질 수준과 목표하는 시장이 다르다고 가정하여 한 방향 수요 대체를 고려한 연구들은 제한적으로 이루어져 왔다. Inderfurth [10]는 신제품과 재생제품 각각에 대해 확률적 수요와 확정적 생산/재가공 시간을 가정한 단일 기간 문제에서 수요 대체가 허용될 때, 최적의 신제품과 재생제품 목표재고수준을 수리적으로 유도하였다. Bayindir et al.[5]는 수요 대체가 허용되는 상황에서 신제품과 재생제품 목표재고수준을 결정하는 문제를 분석하였다. Pineyro와 Viera[17]는 신제품과 재생제품 가공 시간을 고려하지 않고, 신제품과 재생제품 각각에 대해 확정적 수요를 갖는 복수 기간 문제에서 기간별 신제품 생산 규모, 재생제품 생산 규모, 회수제품 처분 규모를 결정하는 혼합 정수 계획법 문제를 제시하였다. Li et al.[14]은 신제품과 재생제품 간에 품질 차이가 존재하지 않는 혼성시스템에서 수요 대체가 품목들 사이에서 이루어질 때, 신제품 생산 규모와 재생제품 생산 규모를 결정하는 문제를 다루었다. Jin et al.[11]은 회수되는 모듈들의 품질 수준이 다양하고 모듈들 간에 한방향 수요 대체가 이루어질 때, 최적 조립 정책과 모듈 수요 대체 정책을 MDP모형을 통해 분석하였다.

신제품과 재생제품이 아닌 일반적인 두 제품 간에 한 방향 수요 대체가 이루어지는 경우에 생산/재고 관리를 다룬 연구들은 Deflem and Van Nieuwenhuysel[6]에 상세하게 기술되어 있다. 한편, 김현수 외 3인[3]은 폐가전제품의 회수 및 재활용을 위한 RFID 기반 통합관리시스템의 설계를 다

룬 연구를 수행하였으며, 수송 비용을 최소화하는 역공급망 네트워크를 설계하는 문제를 다룬 연구로는 한용호[4]가 있다.

본 연구 모형은 회수제품 재가공과 한 방향 수요 대체를 다루고 있는 선행 연구들과 비교했을 때 다음과 같은 측면에서 차이점이 있다. 첫째, 재생제품 재고 고갈시 발생한 수요를 신제품 재고가 가용하다면 모두 대체해주는 선행 연구들과는 달리, 본 논문에서는 의사 결정을 통해 수요 대체 여부를 판단한다. 즉, 수요 대체를 통제하는 전략을 고려한다. 따라서 본 논문에서는 신제품 재고가 있어도 수요 대체가 허용되지 않는 상황이 발생할 수 있다. 둘째, 선행 연구들은 정기형 목표 수준 재고 모형을 가정하고, 신제품과 재생제품 재고의 목표 수준 값을 결정하는 문제를 다루는 반면에, 본 논문은 연속형 재고 모형을 가정하고 신제품 생산과 재생제품 가공을 통제하기 위한 최적 정책을 분석한다.

### 3. 연구 모형

본 연구 모형의 주요 가정은 다음과 같다 :

- 신제품 수요, 재생제품 수요, 그리고 제품 회수 발생은 포아송 분포를 따른다.
- 신제품 생산과 재생제품 가공 시간은 지수 분포를 따른다.
- 신제품 재고 부족시 발생한 수요는 기회 손실 (lost sales)로 처리한다.
- 재생제품 재고 부족시 발생한 수요는 의사 결정에 의해 신제품 재고로 충족되거나 또는 기회 손실로 처리된다.
- 재생제품 수요가 신제품 재고로 충족될 경우, 재생제품 단가로 판매된다.
- 수요 대체에 따른 비용은 발생하지 않는다.
- 회수 제품이 재생제품으로 가공될 때 비용이 발생한다.
- 모든 제품 회수는 재생제품으로의 가공을 위해 수용된다.
- 재생제품의 품질 수준은 균일하다.

수리 모형에서 사용될 주요 용어는 <표 1>과 같다.

<표 1> 연구 모형의 주요 용어

용어	용어 설명
$\lambda_1(\lambda_2)$	단위 시간당 신(재생)제품 수요 빈도
$\lambda_3$	단위 시간당 제품 회수 발생 빈도
$\mu_1^{-1}(\mu_2^{-1})$	신(재생)제품 한 단위 평균 생산(가공) 시간
$R_1(R_2)$	신(재생)제품 판매 단가
$c_M(c_R)$	신(재생)제품 한 단위 생산(가공)비용
$h_1(h_2)$	신(재생)제품 한 단위 재고유지비용
$h_3$	회수제품 한 단위 재고유지비용
$x_1(x_2)$	신(재생)제품 재고 크기
$x_3$	회수제품 재고 크기
$x$	$(x_1, x_2, x_3)$ , 시스템 상태 변수
$e_i$	$i$ 번째 좌표값이 1인 단위 벡터
$f(x)$	상태 변수 $x$ 에서 최적 가치 함수

MDP 모형을 이용한 최적 정책의 규명은 벨만(Bellman) 방정식을 도출하고, 가치 함수(value function)에 대한 분석을 통해 이루어진다[18]. 벨만 방정식을 도출하기 위해 고려해야 할 시스템 상태 전이(transition) 과정은 다음과 같다. 시스템 상태 변수는 신제품, 재생제품, 그리고 회수제품들의 재고의 크기로 결정되며,  $\gamma$ 를 상태 전이 속도라고 표기하기로 한다. 그런데 신제품과 재생제품을 생산하기로 하는 경우에는 시스템 전이 속도는  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1 + \mu_2$  이 되고, 생산하지 않기로 하는 경우에는 시스템 전이 속도는  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$  이 되어 상태 변수에 따라 시스템 전이 확률이 달라지는 문제가 발생한다. 그러나 Lippman[15]의 uniformization을 적용시켜 신제품과 재생제품을 생산하지 않기로 하는 경우에 허구의 자체 순환(self loop)을 상태 전이에 추가하게 되면 모든 시스템 상태에서의 전이 속도를 동일하게 만들 수 있다. 따라서  $\gamma$ 는  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1 + \mu_2$  이 된다. 시스템 상태 전이는 다음과 같은 다섯 가지 사건(event)들에 의해 전개된다.

- $\lambda_1/\gamma$ 의 확률로 신제품 수요 도착 :  $x_1 > 0$ 이면  $x_1$ 은 한 단위 감소하고  $R_1$ 의 매출이 발생한다.  $x_1 = 0$ 이면 이 수요는 기회 손실로 처리한다.
- $\lambda_2/\gamma$ 의 확률로 재생제품 수요 도착 :  $x_2 > 0$ 이면  $x_2$ 는 한 단위 감소하고  $R_2$ 의 매출이 발생한다.  $x_2 = 0$ 이면 의사 결정에 의해  $x_1$ 을 한 단위 감소시키고  $R_2$ 의 매출을 일으키거나 또는 이 수요를 기회 손실로 처리한다.
- $\lambda_3/\gamma$ 의 확률로 제품 회수 발생 :  $x_3$ 는 한 단위 증가한다.
- 신제품 생산 의사 결정이 이루어지면  $\mu_1/\gamma$ 의 확률로  $x_1$ 은 한 단위 증가하고  $c_M$ 의 비용이 발생한다. 생산하지 않기로 의사 결정이 이루어지면  $x$ 에는 변화가 없다.
- 재생제품 가공 의사 결정이 이루어지면  $\mu_2/\gamma$ 의 확률로  $x_2$ 는 한 단위 증가하고,  $x_3$ 는 한 단위 감소하며  $c_R$ 의 비용이 발생한다. 가공하지 않기로 의사 결정이 이루어지면  $x$ 에는 변화가 없다.

본 논문의 MDP 모형의 벨만 방정식은 다음과 같다. 수식 표현의 용이성을 위해  $H(x) \equiv h_1x_1 + h_2x_2 + h_3x_3$ 를 정의한다. 즉,  $H(x)$ 는 재고 비용의 합을 나타낸다. 또한,  $1(a)$ 를  $a$ 가 성립하면 1, 성립하지 않으면 0의 값을 갖도록 정의한다 :

$$g^S + f(x) = \frac{1}{\gamma} [-H(x) + \lambda_1 \{ \{R_1 + f(x - e_1)\} 1(x_1 > 0) + f(x) 1(x_1 = 0) \} + \lambda_2 \{ \{R_2 + f(x - e_2)\} 1(x_2 > 0) + \max\{f(x), R_2 + f(x - e_1)\} 1(x_2 = 0) \} + \lambda_3 f(x + e_3) + \mu_1 \max\{f(x), f(x + e_1)\} - c_M \} + \mu_2 \{ \max\{f(x), f(x + e_2 - e_3)\} - c_R \} 1(x_3 > 0) + f(x) 1(x_3 = 0) ] \tag{1}$$

식 (1)에서  $g^S$ 는 단위 시간당 최적 평균 수익이다.  $\lambda_1$ 항목은 재고가 가용할 때 신제품 판매가 이루어지는 상황을 보여준다.  $\lambda_2$ 항목은 재고가 가용할 때 재생제품 판매가 이루어지는 상황과 재고 부족일 경우 수요 대체 여부에 대한 의사 결정을 보여준다.

$\lambda_3$  항목은 제품 회수가 이루어지는 상황을 나타낸다.  $\mu_1$  항목은 신제품 한 단위를 생산할지 여부에 대한 의사 결정을 보여준다.  $\mu_2$  항목은 회수 제품 재고가 가용할 때 재생제품 한 단위를 생산할지 여부에 대한 의사 결정을 보여준다.

### 4. 최적 정책의 구조

이번 절에서는 MDP 모형으로부터 최적 신제품 생산, 재생제품 가공, 그리고 수요 대체 전략의 구조적 특성을 분석한다. 수식 표현의 용이성을 위해 다음 기호를 도입한다 :

$$\Delta_{23}f(x) = f(x+e_2) - f(x+e_3),$$

$$\Delta_1f(x) = f(x+e_1) - f(x).$$

즉,  $\Delta_{23}f$ 는 회수제품 한 단위를 더 재고로 유지하는 것에 비해 재생제품 한 단위를 더 재고로 유지할 때 기대할 수 있는 상대적 가치이고,  $\Delta_1f$ 는 신제품 한 단위가 갖는 한계 가치를 의미한다.

[그림 2]는 수치 예제  $R_1 = 80, R_2 = 40, c_M = 10, c_R = 5, h_1 = 2, h_2 = 1.5, h_3 = 0.75, \lambda_1 = 0.4, \lambda_2 = 0.4, \lambda_3 = 0.25, \mu_1 = 0.6, \mu_2 = 1$ 에 대해  $x_3 = 4$ 일 때의 최적 신제품 생산, 재생제품 가공, 그리고 수요 대체 전략을 나타낸다. [그림 2]는 최적 신제품 생산과 재생제품 가공 전략은 전환 곡선(switching curve)들로, 수요 대체 전략은 임계치로 주어짐을 보여준다. 또한, [그림 2]로부터 두 개의 전환 곡선과 임계치에 의해 상태 변수들의 공간  $\{(x_1, x_2)\}$ 이 여러 세부 영역으로 나뉠 수 있음을 알 수 있다. [그림 2]에서 M(NM)는 신제품 생산(안함), R(NR)는 재생제품 생산(안함), S(NS)는 수요 대체 수용(안함)을 나타내는데, (1, 7)에서는 신제품은 생산하고 재생제품은 생산하지 않는다는 것을 알 수 있다.  $x_2 = 0$ 일 때,  $\{(x_1, 0)\}$ 은 4개의 통제 영역으로 나누게 된다. (1, 0)에서는 신제품과 재생제품 생산은 진행되지만 수요 대체는

허용되지 않고, (6, 0)에서는 신제품을 생산하지 않고 재생제품은 생산하며, 수요 대체가 이루어지게 된다.

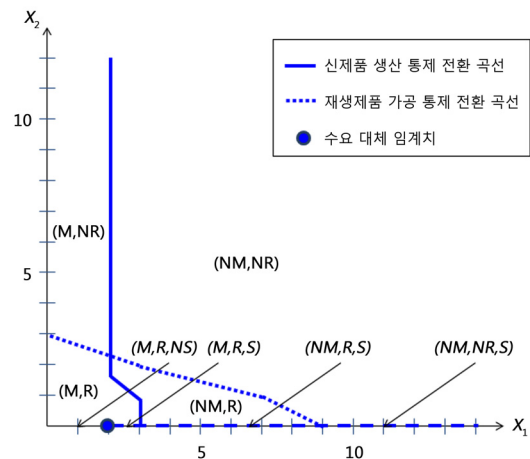
식 (1)로부터  $m(x_2, x_3), r(x_1, x_3), s(0, x_3)$ 을 다음과 같이 정의한다 :

$$m(x_2, x_3) \equiv \max\{x_1 : f(x) \leq f(x+e_1) - c_M\},$$

$$r(x_1, x_3) \equiv \max\{x_2 : f(x) \leq f(x+e_2 - e_3) - c_R\},$$

$$s(0, x_3) \equiv \min\{x_1 : f(x) \leq R_2 + f(x - e_1)\}.$$

$m(x_2, x_3)$ 은  $x_2$ 와  $x_3$ 가 주어졌을 때 신제품 생산이 수익 측면에서 유리한 신제품 재고 수준 중에서 가장 큰 값을 의미한다.  $r(x_1, x_3)$ 는  $x_1$ 과  $x_3$ 가 주어졌을 때 재생제품 한 단위 생산이 수익 측면에서 유리한 재생제품 재고 수준 중에서 가장 큰 값을 의미한다.  $s(0, x_3)$ 는  $x_2 = 0$ 이고  $x_3$ 가 주어졌을 때 수요 대체 허용이 수익 측면에서 유리한 신제품 재고 수준 중에서 가장 작은 값을 의미한다.



[그림 2] 최적 신제품 생산, 재생제품 가공, 그리고 수요 대체 전략의 구조

다양한 예제들로 구성된 수치 실험분석 결과는 상태변수  $(x_1, x_2, x_3)$ 에서 최적 신제품 생산 정책은  $m(x_2, x_3)$ , 최적 재생제품 가공 정책은  $r(x_1, x_3)$ , 최

적 수요 대체 정책은  $s(0, x_3)$ 로 다음과 같이 결정 될 수 있음을 추론해볼 수 있다:

- $x_1 \leq m(x_2, x_3)$ 이면 신제품을 생산하고  
 $x_1 > m(x_2, x_3)$ 이면 생산하지 않는다.
- $x_2 \leq r(x_1, x_3)$ 이면 재생제품을 생산하고,  
 $x_2 > r(x_1, x_3)$ 이면 생산하지 않는다.
- $x_1 \geq s(0, x_3)$ 일 경우에 한해 재생제품 수요 대체를 허용한다.

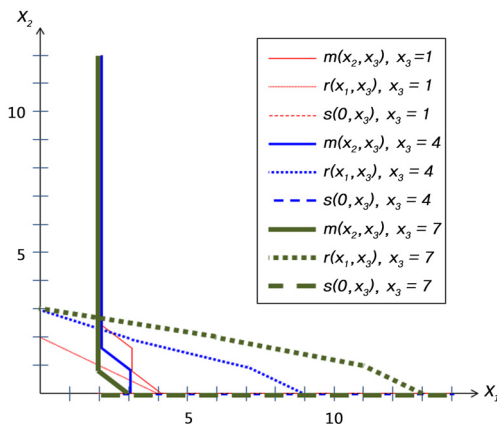
[그림 3]은 세 가지  $x_3$  값(1, 4, 7)에 대해서  $m(x_2, x_3)$ ,  $r(x_1, x_3)$ ,  $s(0, x_3)$ 를 비교한 그래프이다.  $x_3$  값이 증가할수록  $m(x_2, x_3)$ 은 감소하고  $r(x_1, x_3)$ 은 증가하는 것을 알 수 있다.  $x_3$  값이 증가하면, 회수제품 재고유지비용 부담 때문에 재생제품 생산이 확대되어 재고 수준이 높아지게 되므로 하방 수요 대체와 신제품 생산은 이전보다 다소 축소 될 것으로 판단할 수 있다. 한편, [그림 3]은  $x_3$  값이 증가하더라도  $s(0, x_3)$ 에는 변화가 없음을 보여주고 있다.

[그림 4]는 [그림 2]에서 사용된 예제를 이용하여 재생제품 수요 대체가 허용되는 모형과 허용되지 않는 모형에 대해서 최적 정책을 비교한 그

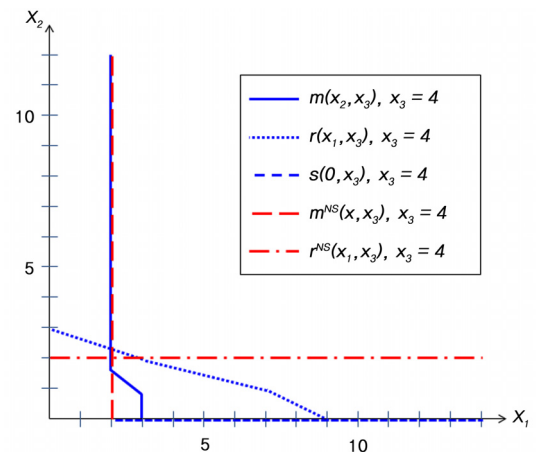
래프이다. 수요 대체가 허용되는 모형의 경우에는  $x_3 = 4$ 일 때의  $m(x_2, x_3)$ ,  $r(x_1, x_3)$ ,  $s(0, x_3)$ 을, 수요 대체가 허용되지 않는 모형의 경우에는  $x_3 = 4$ 일 때의  $m^{NS}(x_2, x_3)$ ,  $r^{NS}(x_1, x_3)$ 을 제시하였다. 수요 대체가 허용되면 수요 대체가 허용되지 않을 때와 비교해 재생제품 재고 수준이 낮은 경우에 신제품 생산은 다소 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 재생제품 생산은 신제품 재고 수준이 낮을 때는 다소 늘어나고 반대로 높을 때는 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 신제품 재고 수준이 높은 경우에는 수요 대체가 가능하기 때문에 재생제품 생산이 줄어드는 것으로 이해할 수 있다.

### 5. 수치 실험

이번 절에서는 수치 실험을 통해 수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 영향을 비교한다. 이를 위해 <표 2>에 제시된 수치 실험의 시나리오별로 <부록>에 제시된 가치 반복 알고리즘을 이용하여  $g^S$ 와 수요 대체가 허용되지 않을 때의 단위 시간당 최적 평균 수익,  $g^{NS}$ 를 구하게 된다. 수요 대체가 허용되지 않는 모형의 벨만 방정식은 다음과 같다:



[그림 3]  $x_3$  값과  $m(x_2, x_3)$ ,  $r(x_1, x_3)$ ,  $s(0, x_3)$ 와의 관계



[그림 4] 수요 대체가 허용되는 모형과 허용되지 않는 모형의 최적 정책 비교

<표 2> 수요 대체 효과 분석을 위한 시나리오 구성

시나리오	분석 내용	표	예제 구성 설명
I	시간 모수 관점	<표 4>	$\lambda_1$ 값만 0.1씩 증가시킨 예제 5개 생성
			$\lambda_2$ 값만 0.1씩 증가시킨 예제 5개 생성
			$\lambda_3$ 값만 0.1씩 증가시킨 예제 5개 생성
			$\mu_1$ 값만 0.1씩 증가시킨 예제 5개 생성
II	판매단가 관점	<표 5>	$\lambda_2 = 0.3$ 일 때, $R_2/R_1$ 을 증가시킨 예제 5개 생성
			$\lambda_2 = 0.6$ 일 때, $R_2/R_1$ 을 증가시킨 예제 5개 생성
III	생산/가공비용 관점	<표 6>	$c_M$ 값만 2.5씩 증가시킨 예제 5개 생성
			$c_R$ 값만 1씩 증가시킨 예제 5개 생성
IV	재고유지비용 관점	<표 7>	$h_1$ 값만 0.5씩 증가시킨 예제 5개 생성
			$h_2$ 값만 0.25씩 증가시킨 예제 5개 생성
			$h_3$ 값만 0.25씩 증가시킨 예제 5개 생성

$$g^{NS} + f(x) = \frac{1}{\gamma} [-H(x) + \lambda_1 \{R_1 + f(x - e_1)\} 1(x_1 > 0) + f(x) 1(x_1 = 0)] + \lambda_2 \{R_2 + f(x - e_2)\} 1(x_2 > 0) + f(x) 1(x_2 = 0) + \lambda_3 f(x + e_3) + \mu_1 \max\{f(x), f(x + e_1) - c_M\} + \mu_2 [\max\{f(x), f(x + e_2 - e_3) - c_R\}] 1(x_3 > 0) + f(x) 1(x_3 = 0)] \quad (2)$$

본 수치 실험에서 VI 알고리즘 종료 기준은  $\epsilon = 0.001$ 으로 설정하였다. <표 3>~<표 6>에서 %는  $g^S$ 과  $g^{NS}$ 간의 백분율 차이인  $(g^S - g^{NS})/g^S \times 100$ 를 나타낸다. 따라서 %는 수요 대체에 따른 수익성 개선 정도를 의미하게 된다. <표 3>~<표 6>에 제시된 수치 실험결과는 수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 영향의 크기는 모수 값마다 크게 달라질 수 있음을 보이고 있다. 시나리오별 구체적인 분석 결과는 다음과 같다.

<표 3>의 예제 1~5는 수요 대체에 따른 수익성 개선 효과는  $\lambda_1$ 이 증가할수록 작아지고 있음을 보여준다. 신제품 수요가 높은 경우에는 확보된 재고를 판매 단가가 낮은 재생제품 수요 대체를 위해 사용하기보다는 미래의 신제품 수요를 충족시키는데 사용하는 것이 더 유리하기 때문인 것으로 판단된다. 예제 6~10은 수요 대체에 따른 수익성 개선 효과가  $\lambda_2$ 가 증가할수록 현저히 커지고 있음을

보여준다. 재생제품 수요가 높은 경우에는 확보된 재고로 모든 수요를 충족시킬 수 없기 때문에 기회 손실의 위험성이 커지는데, 이때 수요 대체가 기업의 수익성을 개선시키는데 기여한 것으로 판단된다. 예제 11~15는 수요 대체에 따른 수익성 개선 효과가  $\lambda_3$ 이 증가할수록 현저히 줄어들고 있음을 보여준다. 제품회수 빈도가 높은 경우에는 재가공을 통해 재생제품 재고를 보충하는 것이 용이하여 재고 고갈 위험성이 줄어들고, 이로 인해 수요 대체 가능성도 작아진데서 기인한 것으로 판단된다. 특히,  $\lambda_2 = 0.6$ ,  $\lambda_3 = 0.7$ 일 때는 수요 대체 허용에 따른 수익성 개선 효과는 0.28%로 매우 작다. 예제 16~20은 수요 대체에 따른 수익성 개선 효과가  $\mu_1$ 이 증가할수록 증가하지만 그 증가 폭은 줄어들고 있음을 보여준다. 신제품 생산 속도가 빠른 경우에는 재고 보충이 용이해지기 때문에 수요 대체로 인한 신제품 재고 고갈 위험성이 줄어들게 된다. 따라서 생산 속도가 느린 경우보다 수요 대체를 더욱 활성화시킬 것으로 예상되어 수요 대체가 기업의 수익성을 개선시키는데 기인한 것으로 판단된다. 그러나 신제품 생산 속도가 재생제품 수요 빈도보다 훨씬 커지게 되면 수요 대체가 기업의 수익 개선에 미치는 영향은 매우 제한적인 것으로 판단된다.



〈표 3〉 시간 모수 관점에서 수요 대체 효과 분석

예제번호	$R_1$	$R_2$	$c_M$	$c_R$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$g^S$	$g^{NS}$	%
1	80	40	10	5	2	1.5	0.75	0.3	0.5	0.35	0.75	1	27.24	24.62	9.62
2								0.4					32.75	30.28	7.54
3								0.5					37.95	35.68	5.98
4								0.6					42.75	40.86	4.42
5								0.7					47.1	45.67	3.04
6	80	40	10	5	2	1.5	0.75	0.6	0.3	0.35	0.75	1	7.23	7.2	0.41
7								0.4					36.92	36.23	1.87
8								0.5					42.75	40.86	4.42
9								0.6					44.92	41.94	6.63
10								0.7					46.37	42.44	8.48
11	80	40	10	5	2	1.5	0.75	0.6	0.6	0.3	0.75	1	44.34	40.8	7.98
12								0.4					45.25	42.84	5.33
13								0.5					43.96	42.7	2.87
14								0.6					35.44	35.08	1.02
15								0.7					21.58	21.52	0.28
16	80	40	10	5	2	1.5	0.75	0.5	0.6	0.35	0.6	1	38.01	35.51	6.58
17												0.7	39.68	36.45	8.14
18												0.8	40.95	37.05	9.52
19												0.9	41.88	37.65	10.10
20												1	42.59	38.07	10.61

〈표 4〉 판매단가 관점에서 수요 대체 효과 분석

예제번호	$R_1$	$R_2$	$c_M$	$c_R$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$g^S$	$g^{NS}$	%
1	80	20	10	5	2	1.5	0.75	0.6	0.3	0.3	0.75	1	23.27	23.23	0.17
2			30										26.2	26.09	0.42
3			40										29.15	28.95	0.69
4			50										32.11	31.81	0.93
5			60										35.07	34.67	1.14
6	80	20	10	5	2	1.5	0.75	0.6	0.6	0.3	0.75	1	35.57	34.79	2.19
7			30										39.8	37.8	5.03
8			40										44.34	40.8	7.98
9			50										49.08	43.8	10.76
10			60										54.04	46.8	13.40

〈표 4〉의 결과는  $R_2/R_1$  비율이 감소할수록 수익성 개선 폭이 커지고 있음을 보여주고 있다.  $R_2/R_1$ 이 작은 경우에는 신제품 재고가 신제품 수요 충족에 더 많이 배정되고, 이로 인해 수요 대체에 배정되는 재고의 양은 줄어들어서 수요 대체가 수익성 개선에 기여하는 효과는 작아질 것으로 예상할 수 있다. 이와는 반대로  $R_2/R_1$ 이 큰 경우에는 재생제품 재고고갈

로 인한 기회손실이 수익성을 악화시킬 수 있으므로 수요 대체 허용이 기업의 수익성 개선에 기여하는 효과는 클 것으로 예상할 수 있다. 그러나  $\lambda_2/\lambda_1 = 0.5$ 인 경우(예제 1~5)에서 보듯이 신제품 수요 빈도에 비해서 재생제품 수요 빈도가 현저히 낮은 경우에는 비록  $R_2/R_1$  비율이 작은 경우라 하더라도 수요 대체에 따른 효과는 미미할 것으로 예상할 수 있다.

〈표 5〉 생산/가공비용 관점에서 수요 대체 효과 분석

예제번호	$R_1$	$R_2$	$c_M$	$c_R$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$g^S$	$g^{NS}$	%		
1	80	40	5	5	2	1.5	0.75	0.6	0.6	0.35	0.75	1	48.27	44.68	7.44		
2			7.5										46.59	43.31	7.04		
3			10										44.92	41.94	6.63		
4			12.5										43.26	40.63	6.08		
5			15										41.62	39.31	5.55		
6	80	40	10	3	2	1.5	0.75	0.6	0.6	0.35	0.75	1	47.88	44.02	8.06		
7					4										47.53	43.67	8.12
8					5										47.18	43.32	8.18
9					6										46.83	42.97	8.24
10					7										46.48	42.62	8.30

〈표 5〉의 예제 1~5의 결과는  $c_M$ 이 증가함에 따라 수익성 개선 효과는 줄어들고 있음을 보여준다.  $c_M$ 이 커지면 신제품 생산은 이전보다 위축되어 신제품 재고가 줄어들 가능성이 높다. 따라서 대부분의 신제품 재고가 신제품 수요 충족에 사용되기 때문에 수요 대체에 할당될 재고의 양은 이전보다 제한될 것이며, 이로 인해 수요 대체로 인한 수익성 개선 효과는 줄어들 것으로 예상할 수 있다. 한편, 예제 6~10의 결과는  $c_R$ 이 증가할 때, 수요 대체가 기업의 수

익성에 미치는 효과는 커지지만 그 크기는 매우 제한적임을 보이고 있다.  $c_R$ 이 커지는 경우에는  $c_M$ 의 경우와는 달리, 재가공을 위축시켜 재생제품 재고를 이전보다 줄어든게 할 가능성은 낮아진다. 왜냐하면, 재가공 비용을 낮추기 위해 재생제품 가공을 위축시킬 경우 회수제품 재고유지비용에 대한 부담과 함께 재생제품 판매기회손실을 키울 수 있다. 따라서  $c_R$ 이 증가하더라도 재가공과 수요 대체 통제 전략에는 거의 변화가 없을 것으로 예상할 수 있다.

〈표 6〉 재고유지비용 관점에서 수요 대체 효과 분석

예제번호	$R_1$	$R_2$	$c_M$	$c_R$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$g^S$	$g^{NS}$	%				
1	80	40	10	5	2	1.5	0.75	0.5	0.4	0.3	0.75	1	34.96	33.39	4.49				
2					2.5										33.73	32.29	4.27		
3					3										32.66	31.3	4.16		
4					3.5										31.66	30.3	4.30		
5					4										30.7	29.31	4.53		
6	80	40	10	5	2	0.75	0.75	0.6	0.5	0.4	0.75	1	43.77	42.5	2.90				
7							1										43.05	41.79	2.93
8							1.25										42.45	41.18	2.99
9							1.5										41.9	40.62	3.05
10							1.75										41.37	40.08	3.12
11	80	40	10	5	2	1.5	0.3	0.6	0.4	0.3	0.75	1	41.07	39.68	3.38				
12							0.55										40.36	39.01	3.34
13							0.8										39.79	38.46	3.34
14							1.05										39.32	38	3.36
15							1.3										38.94	37.62	3.39

<표 6>의 예제 1~5의 결과는  $h_1$ 이 증가함에 따라 수익성 개선 효과는 감소하다가 증가하고 있음을 보여준다.  $h_1$ 이 커지면 신제품 생산은 이전보다 위축되어 신제품 재고가 줄어들 가능성이 높다. 따라서 수요 대체에 할당될 재고의 양은 이전보다 제한되어 수요 대체로 인한 수익성 개선 효과는 줄어들 것으로 예상할 수 있다. 그러나  $h_1$ 의 증가가 어느 수준을 넘어서게 되면( $h_1 = 3$ ) 재고유지비용에 대한 부담 때문에 수요 대체의 활용을 늘리는 것으로 해석할 수 있다. 예제 6~10의 결과는  $h_2$ 가 증가할 때, 수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 효과가 증가하고 있음을 보이고 있다.  $h_2$ 가 커지는 경우에는 재가공을 위축시켜 재생제품 재고를 이전보다 줄어든다 하여 재생제품 판매 기회손실 증가로 이어질 수 있다. 따라서 수요 대체 통제 전략은 이전보다 수요 대체를 확대하게 되고, 이로 인해 수요 대체가 수익성 개선에 기여한 것으로 해석할 수 있다. 예제 11~15의 결과는  $h_3$ 가 증가할 때, 수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 효과는 거의 발생하지 않음을 보이고 있다.  $h_3$ 가 커지는 경우에는 회수제품 재고유지비용 부담을 줄일 목적으로 재가공을 활성화시킬 가능성은 낮다고 예상된다. 왜냐하면, 재가공을 활성화시키면, 재생제품 재고유지비용에 대한 부담을 키울 수 있기 때문이다. 따라서  $h_3$ 가 증가하더라도 재가공 정책에는 거의 변화가 생기지 않아 수요 대체 통제 전략에 미치는 영향도 크게 달라지지 않을 것으로 예상할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문은 제조 기업이 신제품 판매뿐만 아니라 재생제품을 판매하는 상황에서 하방 수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 논문은 MDP 모델을 제시하였으며, 최적의 신제품과 재생제품 생산 정책, 그리고 수요 대체 전략의 구조적 특성을 분석하였다. 최적 정책의 구조는 신제품, 재생제품, 그리고 회수제품 재고 수준에 의해 영향을 받으며, 각각의 통제 전략은 이들 제품들의 재고 수준과 단조 관계에 있음을 파악하였다. 또한, 수치 실험을 통해

수요 대체가 기업의 수익성에 미치는 영향의 크기는 시간, 수익, 비용 모수 값들의 변화에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 연구 모형의 추후 연구 주제는 다음과 같다. 첫째, 수치적으로 분석한 최적 신제품 생산, 재생제품 가공, 그리고 수요 대체 전략의 구조적 특성을 수리적으로 증명하는 것이다. 둘째, 재생제품들도 다양한 품질 수준이 존재하는 경우, 이들 간에 발생하는 수요 대체를 분석하는 것이다. 셋째, 신제품과 재생제품 수요가 제품 회수 프로세스에 영향을 미치는 상황을 분석하는 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김은갑, “혼성 생산 시스템의 지속 가능 운영을 위한 신제품 생산과 회수제품 수용 통제의 통합적 구현”, 『대한산업공학회지』, 제39권(2013), pp. 440-449.
- [2] 김은갑, 정봉주, “Joint decision of optimal procurement policy and optimal order size for a product recovery system”, 『대한산업공학회지』, 제34권(2008), pp.398-407.
- [3] 김현수, 한대희, 정해준, 이성현, “국내 폐가전제품의 회수 및 재활용을 위한 RFID 기반 통합관리시스템 설계”, 『대한산업공학회지』, 제35권 (2009), pp.120-131.
- [4] 한용호, “역물류 네트워크 모델의 최적화를 위한 협력적 공진화 알고리즘”, 『경영과학』, 제27권 (2010), pp.15-31.
- [5] Bayindir, Z., N. Erkip, and R. Gullu, “Assessing the benefits of remanufacturing option under one-way substitution,” *Journal of Operational Research Society*, Vol.56(2005), pp. 286-296.
- [6] Deflem, Y. and I. Van Nieuwenhuysse, “Managing inventories with one-way substitution : A newsvendor analysis,” *European Journal of Operational Research*, Vol.228 (2013),

- pp.484-93.
- [7] Fleischmann, M. and R. Kuik, "On optimal inventory control with independent stochastic item returns," *European Journal of Operational Research*, Vol.151(2003), pp.25-37.
- [8] Inderfurth, K., "Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with lead times," *OR Spektrum*, Vol.19(1997), pp.111-122.
- [9] Inderfurth, K. and E.A. van der Laan, "Lead-time effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing," *International Journal of Production Economics*, Vol.71(2001), pp.381-390.
- [10] Inderfurth, K., "Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing systems with product substitution," *International Journal of Production Economics*, Vol.90(2004), pp. 325-343.
- [11] Jin, X., S. Hu, J. Ni, and G. Xiao, "Assembly Strategies for Remanufacturing Systems With Variable Quality Returns," *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, Vol.10(2013), pp.76-85.
- [12] Junior, M. and M. Filho, "Production planning and control for remanufacturing : literature review and analysis," *Production Planning and Control*, Vol.23(2012), pp.419-435.
- [13] Kim, E., S. Saghafian, and M.P. Van Oyen, "Joint control of production, remanufacturing, and disposal activities in a hybrid manufacturing-remanufacturing system," *European Journal of Operational Research*, Vol. 231(2013), pp.337-348.
- [14] Li, Y., J. Chen, and X. Cai, "Uncapacitated production planning with multiple product types, returned product remanufacturing, and demand substitution," *OR Spectrum*, Vol.28(2005), pp.101-125.
- [15] Lippman, S., "Applying a new device in the optimization of exponential queueing systems," *Operations Research*, Vol.23(1975), pp.687-710.
- [16] Mahadevan, B., D.F. Pyke, and M. Fleischmann, "Periodic review, push inventory policies for remanufacturing," *European Journal of Operational Research*, Vol.151(2003), pp.536-551.
- [17] Pineyro, P. and O. Viera, "The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution," *International Journal of Production Economics*, Vol.124(2010), pp.482-488.
- [18] Porteus, E., "Conditions for characterizing the structure of optimal strategies in infinite-horizon dynamic programs," *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol.36 (1982), pp.419-432.
- [19] Puterman, M., *Markov Decision Processes*, John Wiley and Sons, 2005.
- [20] Simpson, V., "Optimal solution structure for a repairable inventory problem," *Operations Research*, Vol.26(1978), pp.270-281.
- [21] Teunter, R.H. and D. Vlachos, "On the necessity of a disposal option for returned items that can be recovered," *International Journal of Production Economics*, Vol.75 (2002), pp.257-266.
- [22] Toktay, L.B., L.M. Wein, and S.A. Zenios, "Inventory management of remanufacturings," *Management Science*, Vol.46(2000), pp.1412-1426.
- [23] Van der Laan, E.A., M. Salomon, R. Dekker, and L. Van Wassenhove, "Inventory control in hybrid systems with remanufacturing," *Management Science*, Vol.45(1999), pp.733-747.
- [24] Yuan and Cheung, "Modeling returns of merchandise in an inventory system," *OR Spectrum*, Vol.20(1998), pp.147-154.

## 〈부 록〉 가치 반복 알고리즘

식 (1)의  $g^s$ 를 구하기 위한 가치 반복(value iteration, 이하 VI로 표기) 알고리즘은 MDP 모형의 벨만 방정식을 수리적으로 풀 수 없는 경우에 사용한다. 알고리즘의 핵심은 첫째,  $f(x)$ 를  $f^k(x)$ ( $k = 0, 1, \dots$ )로 추정된 VI 방정식을 수립하고, 둘째,  $f(x)$ 에 대한 연속적인 추정치  $f^{k+1}(x)$ 와  $f^k(x)$ 의 차이가 특정 오차 범위 내에 도달할 때까지 VI 방정식을 반복하는 것이다(Puterman, 2005). 본 논문의 MDP 모형을 위한 VI 방정식은 다음과 같다 :

$$\begin{aligned} \mathcal{T}f^k(x) = & \frac{1}{\gamma}[-H(x) + \lambda_1[\{R_1 + f^k(x - e_1)\}1(x_1 > 0) + f^k(x)1(x_1 = 0)] \\ & + \lambda_2[\{R_2 + f^k(x - e_2)\}1(x_2 > 0) + \max\{f^k(x), R_2 + f^k(x - e_1)\}1(x_2 = 0)] \\ & + \lambda_3 f^k(x + e_3) + \mu_1 \max\{f^k(x), f^k(x + e_1) - c_M\} \\ & + \mu_2 [\max\{f^k(x), f^k(x + e_2 - e_3) - c_R\}]1(x_3 > 0) + f^k(x)1(x_3 = 0)]. \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $f^k(x)$ 는 VI 알고리즘의  $k$ 번째 단계에서 구한  $f(x)$ 의 추정 값이다. 다음에 제시된 VI 알고리즘은 특정 오차 범위 내에서  $f(x)$ 과  $g^s$ 의 근사 값을 구한다.

### 〈VI 알고리즘〉

알고리즘의 종료 조건을  $\epsilon$ 으로 둔다.

1) 초기화 : 모든  $x = (x_1, x_2, x_3)$ 에 대해  $f^0(x) = 0$ 으로 둔다.

2) Value Iteration : 단계  $k$ 의  $f^k(x)$ 에 대해 식 (2)를 적용하여  $\mathcal{T}f^k(x)$ 를 구한다.

3) 종료 검증 :  $d_{\min}^k \equiv \min_{(x)}\{\mathcal{T}f^k(x) - f^k(x)\}$ ,  $d_{\max}^k \equiv \max_{(x)}\{\mathcal{T}f^k(x) - f^k(x)\}$ .

$d_{\max}^k - d_{\min}^k \geq \epsilon$ 이면 모든  $x = (x_1, x_2, x_3)$ 에 대해  $f^{k+1}(x)$ 을  $\mathcal{T}f^k(x)$ 으로 대체하고 단계 (b)로 간다.

$d_{\max}^k - d_{\min}^k < \epsilon$ 이면 평가 단계로 간다.

4) 평가 :  $f(x)$ 와  $g^s$ 를 다음과 같이 추정한다;  $f(x) \approx \mathcal{T}f^k(x)$ ,  $g^s \approx (d_{\min}^k + d_{\max}^k)/2$ .