Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 31, No. 3, pp. 240-247, September 2005.

단일 재생처리 설비를 이용한 다중 제품 재생계획

주운기† · 이충호

선문대학교 지식정보산업공학과

Multi-product Remanufacturing Planning on a Single Facility

Un Gi Joo · Choong-ho Lee

Department of Industrial Engineering, Sun Moon University, Asan, 336-708

Today's hightech society requires thousands of different products which ultimately result in billions of tons of materials discarded, most of which end up in landfills. Therefore industrial circles could not help thinking about environmental problems by regulations of government or pressures of consumer. Generally, the related research subjects are classified into both of environmentally conscious manufacturing and product recovery, where product recovery aims to minimize the amount of waste sent to landfills by recovering materials and parts from old or outdated products by means of recycling and remanufacturing (including reuse of parts and products). In this research, we constructed a model for remanufacturing various goods using a single facility and developed a dynamic programing(DP) algorithm based upon the optimal solution characterization. We showed the efficiency of the developed DP algorithm with a numerical example.

Keywords**:** remanufacturing planning, recovery rate, extreme point, dynamic programming

1. 서 론

소비자 요구의 다양화 및 제품 수명의 단축은 다양한 제품을 생산하기 위한 원자재, 에너지, 물 등의 많은 자원의 사용과 생산된 제품의 급속한 쓰레기화를 초래하고 있다. 한정된 자원에 대한 원자재의 부족난이 심화되고 있는 상황에서는 자원의 재활용이 효과적인 대처 방안이 된다.

자원의 재활용은 쓰레기(waste)의 보이지 않는 경제적 가치, 시장의 요구 그리고 정부의 규제와 같은 세 가지 주된 이유에 의해서 시행된다. 자재의 재활용 경우는 대부분 분리와 자재의 처리(필요에 따라서 화학적 처리도 필요)를 위하여 분해 작업을 거친다. 이 작업의 주된 목적은 버려지는 자재의 양을 최소화하고 다시 생산에 필요한 부품으로 되돌려지는 자재의 양을 최대화하는 데 있다. 제품의 재활용 경우는 분해, 세척, 정렬, 재배치 그리고 손상이 있는 부품들에 대한 수리, 수선, 시험, 재조립 및 검사 작업을 거친다. 재생된 부품들과 제품들은 수리하는 데 사용되거나 다른 제품과 부품들의 재생산에 사용된다.

자동차, 전자제품 그리고 종이의 재활용은 대부분 일반화되고 있다. 미국의 경우 유리제품은 20%, 종이는 30% 그리고 알루미늄 캔이 61%가 재활용되고 있는 것에 반해 1000만대의 자동차와 트럭들은 95%가 폐기된 후 재활용되고 있다. 무게로 따졌을 경우 70%의 무게가 재활용되기 위해 회수되고 있는 것이다(Fleischmann *et al*., 1997).

쓰레기(폐기물)를 줄이기 위한 방안으로는 제품의 효용 및 수명주기를 증진시키는 것을 고려할 수 있는데, 이를 위한 방법으로는 내구성이 큰 제품을 생산하고, 제품 또는 부품의 사용기간 연장을 위해 재생산(remanufacturing) 또는 수선, 재활용(recycling) 등을 하거나, 다용도 제품(multiple functional products)을 생산하는 방법 등이 있다(Krikke *et al*., 1999; Nagel and Meyer, 1999).

자원의 재생은 사용 가능한 부품을 분리한 후 수리나 정비 그리고 품질을 개선하여 새로운 제품의 부품으로 재사용하거나, 폐기물에서 재사용이 가능한 부품을 분리해 내어 다시 부

† 연락저자 : 주운기 교수, 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100 선문대학교 지식정보산업공학과, Fax : 041-541-7426,
E-mail : ugjoo@sunmoon.ac.kr
2004년 7월 접수; 2005년 7월 수정본 접수; 2005년 8월 게재 확정.

품 생산을 위한 원자재로 활용하게 된다.

본 논문은 자원의 재생에 대한 연구로서 폐기물의 절감 및 재활용을 위한 재생계획 수립을 위한 문제를 고려하는데, 이산시간(discrete time)별 주어진 재생품의 수요량을 최소 비용으로 만족시키기 위해 각 기간별 사용 가능한 폐기물 중 얼마 만큼의 폐기물을 재생처리할지를 결정하는 문제를 다룬다. 이러한 이산시점별 주어진 수요량을 최소의 비용으로 만족시키기 위한 계획 수립 문제는 Wagner and Whitin(1958)이 단일 설비로 단일 종류의 제품에 대한 각 기간별 주어진 수요량을 만족시키기 위한 생산계획 수립 방법을 제시한 이래로, 설비의 구성이나 생산 및 재고량의 제약과 생산제품의 종류 및 특성 등에 따라 다양한 DLSP(Dynamic Lot Sizing Problem) 모형들에 대한 연구가 진행되었다. 예를 들어, Luss(1984)는 단일 설비로 여러 종류의 제품에 대한 각 기간별 주어진 수요량을 만족시키기 위한 생산계획 수립 방법을 제시하였다. 그러나 이들 DLSP 문제에 대한 연구는 최종적인 제품 또는 용량 수요량을 최소 비용으로 만족시키기 위한 생산계획 또는 용량확장 계획수립을 위한 문제들에 대한 것으로서, 제품생산을 위한 원자재(raw material) 또는 폐기물을 고려하지 않은 모형들에 대한 것이다.

재생품의 원료가 되는 폐기물을 고려한 연구로는, Rhicher and Sombrutzki(2000)은 각 기간별로 주어진 폐기물의 양을 재생처리하여 재생품에 대한 모든 수요를 만족시키기 위한 단일 설비 단일 제품에 대한 재생산계획 수립 문제를 다루었다. Joo(2000)는 이러한 단일 설비 단일 제품 재생계획 수립 문제에 대해 재생산을 위해서 필요한 폐기물의 양이 각 기간별로 주어진 경우와 폐기물 수거량을 결정해야 하는 경우의 모형으로 구분하여 분석하였다. 그리고 Richter and Weber(2001)도 단일 설비 단일 제품에 대한 재생산계획 수립 문제를 다루었는데, 여기에서는 폐기물 수거 후 필요가 없으면 처분이 가능한 경우를 다루었다.

본 연구는 단일 설비 다중 제품에 대한 재생계획 수립에 관한 문제를 다루었는데, 일정기간 동안의 추후 납품(backlog)이 가능한 경우, 유한 기간 내 각 시점에서의 여러 종류의 주어진 재생품 수요량을 최소의 비용으로 만족시키기 위한 단일 설비 재생계획 수립을 위해 최적해의 성질을 규명하고 동적계획법(Dynamic Programming)을 이용하였다.

본 논문에서 다루는 단일 설비 다중 제품에 대한 재생계획 수립에 대한 문제는 아직까지 연구 결과가 발표된 바가 없는 문제로, 여기서 다루는 모형은 재사용이나 재활용이 가능한 폐기물을 처리하는 업체의 재생일정계획 수립에 사용될 수 있을 것이다. 예를 들면, 요즘 많이 늘고 있는 셀룰러 폰의 중고 단말기의 PCB 기판에서 금, 은, 파라듐, IC칩 등의 여러 유형의 재생품을 회수하여 다시 하나의 새로운 단말기를 제작한다거나, 자동차의 경우도 다시 재사용할 수 있는 부품은 재사용하고, 재사용할 수 없는 고철의 경우 다시 원자재로 변환하여 재활용하는 업체의 경우도 본 연구의 재생계획 모델에 적용할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 재생계획 수립을 위한 수리모형을 수립하고 논문의 목적을 설명하였다. 3장에서는 수립한 재생계획 수립 모형의 실행 가능해의 존재 조건 및 꼭지점 해의 특성을 밝혔고, 이를 이용하는 동적계획법(Dynamic Programing Algorithm) 알고리듬을 개발하였다. 그리고 제안한 동적계획법에 대한 효율성을 분석하고 수치 예를 보였다. 마지막으로 5장에서는 추후 연구 과제 및 본 연구 결과의 활용 방안을 검토하였다.

2. 다중 제품 재생산 모형

폐기물 재생계획 수립을 위한 모델링을 위해 다음의 기호를 정의하여 사용한다.

T: 재생계획에서 고려하는 총 기간, t=1, 2, ..., T

N: 재생계획에서 고려하는 총 재생품의 종류, i=1, 2, ..., N

p: 재생된 재생품의 재고에 대한 추후납품(backlog) 허용기간

α_i: 재생품 i의 재생률, $\alpha_i \geq 0$

$r_{i,t}$: 기간 t에서의 재생품 i의 수요량

$R_{i,t} = \sum_{\tau=1}^{t} r_{i\tau}$: 기간 t까지의 재생품 i의 누적 수요량

d_t: 기간 t에서의 폐기물 수거량, $d_t \geq 0$

$D_t = \sum_{\tau=1}^{t} d_\tau$: 기간 t까지의 폐기물 누적 수거량

x_t: 기간 t에서의 폐기물 처리량, $x_t \geq 0$

$X_t = \sum_{\tau=1}^{t} x_\tau$: 기간 t까지의 폐기물 누적 처리량

Y_t: 기간 t에서의 폐기물 재고량, $Y_t \geq 0$

$I_{i,t}$: 기간 t 초기에서의 재생품 i의 재고량

$C_t(x_t)$: 기간 t에서의 x_t만큼의 폐기물을 재생처리 하는 데 소요되는 비용

$H_t(Y_{t+1})$: 기간 t에서 폐기물 재고 유지비용

$h_{i,t}(I_{i,t+1})$: 기간 t에서 재생품 i를 위한 재고 유지비용, 여기서, $I_{i,t+1} > 0$.
단, $I_{i,t+1} \leq 0$일 때는 $h_{i,t}(I_{i,t+1})=0$

$s_{i,t}(I_{i,t+1})$: 기간 t에서 재생품 i를 위한 추후 납품비용, 여기서, $I_{i,t+1} < 0$.
단, $I_{i,t+1} \geq 0$일 때는, $s_{i,t}(I_{i,t+1})=0$

재생품 재고량을 나타내는 $I_{i,t}$는 음(negative)의 값을 가질 수 있는데, $I_{i,t} < 0$인 경우는 추후 납품될 양을 나타내고, 추후 납품은 최대 p기간 동안만 할 수 있는 상황을 고려한다. 각 기간별 주어진 폐기물 수거량 $\{d_t\}$ 중 일부는 재생처리하여 재생품 수요에 만족을 시키고, 처리하고 남은 수거물은 재고로

유지하는데, 여기서 폐기물에 대한 재생처리는 단일 설비를 이용하는 것을 가정한다. 수거한 폐기물 중 일정량 x_t만큼을 재생처리하면, 유형 i는 $\alpha_i x_t$만큼의 재생품이 생산된다. 재생에 필요한 비용을 포함한 주어진 모든 비용함수는 비감소 오목함수(non-decreasing concave function)라 가정하고, 계획기간 T 내의 각 기간별 주어진 N 유형의 재생품 수요량 $\{r_{i,t}\}$에 대해 단일 재생설비를 이용하여 최소의 비용으로 만족시키기 위한 재생계획 문제는 모형 (1)과 같이 모형화할 수 있다.

Min.

$$\sum_{t=1}^{T}[C_t(x_t)+H_t(Y_{t+1})+\sum_{i=1}^{N}h_{i,t}(I_{i,t+1})+\sum_{i=1}^{N}s_{i,t}(I_{i,t+1})] \qquad (1)$$

s.t. $Y_{t+1}=Y_t-x_t+d_t$, $t=1,2,\ldots,T$ (1.1)

$I_{i,t+1}=I_{i,t}+\alpha_i x_t-r_{i,t}$, $i=1,2,\ldots,N$; $t=1,2,\ldots,T$ (1.2)

$I_{i,t+1}\ \ge\ -\sum_{k=t-p+1}^{t}r_{ik}$, $i=1,2,\ldots,N$; $t=1,2,\ldots,T$ (1.3)

$x_t\ge 0,\ Y_t\ge 0$, $t=1,2,\ldots,T$ (1.4)

$Y_1=I_{i,1}=I_{i,T+1}=0$, $i=1,2,\ldots,N$ (1.5)

첫 번째 제약식 (1.1)는 폐기물에 대한 재고 균형식을 나타내고, 두 번째 제약식 (1.2)은 재생품에 대한 재고 균형식을 나타낸다. 여기서, 시점 t에 재생처리한 x_t에 대해 유형 i의 재생품이 $\alpha_i x_t$만큼 생성되는 경우를 고려하였는데, 유형 i의 재생률(recovery rate) α_i는 비음(non-negative)의 값을 갖는 상수이다. 제약식 (1.3)은 재생품에 대한 재고 $I_{i,t}$의 추후 납품 허용기간 p에 따른 최소한도의 부재고(negative inventory)에 대한 제약을 나타내는데, p=0인 경우는 추후 납품이 허용되지 않는 경우를 위한 모델이 된다. 제약식 (1.5)는 계획기간 시작에서의 재고수준에 대한 가정으로, 초기 재고 수준에 대한 가정은 재생품 재고가 0이 아닌 경우는 $d'_1=d_1+Y_1$, $r'_{i1}=r_{i1}+I_{i1}$로 조정하여 풀면 되므로, $Y_1=I_{i,1}=0$으로 해도 일반성에 문제는 없다. $I_{i,T+1}$=0은 각 유형 i에 대한 재생품 수요를 모두 만족시켜야 함을 나타낸다. 모든 i에 대해 $I_{i,1}$=0으로 가정하였으므로, $I_{i,t+1}=\alpha_i\sum_{k=1}^{t}x_k-\sum_{k=1}^{t}r_{i,k}$가 되고, $I_{i,T+1}$=0이므로, 결국 계획기간 T 중 처리되는 총 폐기물의 양 $\sum_{k=1}^{T}x_k$은 $(1/\alpha_i)\sum_{k=1}^{T}r_{i,k}$(또는 $(1/\alpha_i)R_{i,T}$)인데, 가정에 의해 $(1/\alpha_i)R_{i,T}$는 모든 i에 대해 일정해야 한다. 그러나 $I_{i,T+1}$=0이라는 가정 역시 $r_{i,T+1}=(\alpha_i)\max_{1\le j\le N}\{R_{j,T}/\alpha_j\}-R_{i,T}$만큼의 가상수요에 대해, $C_{i,T+1}(x_{T+1})=H_{T+1}(Y_{T+2})=h_{i,T+1}(I_{i,T+2})$=0이고, 만약 $I_{i,T+1}$<0이라면 $s_{i,T}(I_{i,T+1})=\infty$인 가상기간 T+1을 추가하여 총 계획기간 T+1을 가진 문제를 다루면 되므로 일반성에는 문제가 되지 않는 가정이다. 그리고 목적함수식은 총 계획기간 동안 발생하는 총 재생처리비용과 재고 유지비용을 최소화하는 재생계획 $\{x_t\}$을 찾는 것을 나타내는데, 여기서 재생처리비용 및 재고 유지비용은 규모의 경제(economy of scale) 현상에 대한 모형화에 주로 이용되는 오목함수를 가정하였다.

모형 (1)은 수거한 총 폐기물 양 $\sum_{t=1}^{T}d_t$ 중 $\max_{1\le j\le N}\{R_{j,T}/\alpha_j\}$만큼을 재생처리하는 데 있어서, 언제 얼마나 재생처리하는 것이 좋은가를 규명해서, 동적으로(dynamic) 주어진 재생품 수요를 최소의 비용으로 만족시키기 위한 재생계획을 수립하는 데 목적이 있다.

3. 재생계획 문제의 해법

재생품에 대한 모든 수요를 만족시킬 수 있는 재생계획이 존재하기 위해서는 충분한 양의 폐기물이 수거되어야 한다. 다음 성질은 모형 (1)이 실행 가능해(feasible solution)를 갖기 위한 조건이다.

성질 1. 모형 (1)이 실행 가능해를 갖기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{t}d_k\ge(1/\alpha_i)\sum_{k=1}^{t-p}r_{i,k},\quad \text{i=1,2,...,N; t=1,2,...,T}$$

(증명) 모형 (1)의 제약식 (1.5)에서 $Y_1=I_{i1}=0$이므로, 제약식 (1.1)은 $Y_{t+1}=\sum_{k=1}^{t}d_k-\sum_{k=1}^{t}x_k$가 되고, 제약식 (1.2)은 $I_{i,t+1}=\alpha_i\sum_{k=1}^{t}x_k-\sum_{k=1}^{t}r_{i,k}$이 된다. 따라서 제약식 (1.4)에 의해 제약식 (1.1)은 $\sum_{k=1}^{t}d_k\ \ge\ \sum_{k=1}^{t}x_k$이고, 제약식 (1.3)에 의해 제약식 (1.2)는 $\alpha_i\sum_{k=1}^{t}x_k\ \ge\ \sum_{k=1}^{t-p}r_{i,k}$의 관계를 가진다. 따라서, 모형 (1)의 실행 가능해는 모든 i와 t에 대해 $\sum_{k=1}^{t}d_k\ge\sum_{k=1}^{t}x_k\ge(1/\alpha_i)\sum_{k=1}^{t-p}r_{i,k}$의 관계를 가진다.

모형 (1)은 선형(linear) 제약식으로 구성되는 볼록집합(convex set) 내에서 오목(concave) 목적함수 값이 최소가 되는 해를 찾는 문제이므로, 제약식의 꼭지점(extreme point) 해에서 최적해가 존재한다. 따라서 모형의 꼭지점 해의 특성을 규명함으로써 최적해의 성질을 규명한다.

꼭지점 해의 특성 규명을 위해 재생점(regeneration point)을 정의하였다.

정의1. 재생점(regeneration point)이란 $\Pi_{i=1}^{N}I_{i,t}$=0인 조건을 만족하는 시점 t이다. 즉, 재생점은 N개의 재생품 종류 중에 $I_{i,t}$=0인 재생품이 적어도 하나 이상 있는 시점을 말한다.

모형 (1)은 제약식 (1.5)와 (1.6)에 의해서 기간 1과 $T+1$에서는 $I_{i,1}=I_{1,T+1}$=0이므로, 최소한 2개의 재생점이 존재한다. $I_{i,u}=\alpha_i\sum_{k=1}^{u-1}x_k-\sum_{k=1}^{u-1}r_{i,k}$이므로, 만약 $I_{j,u}$=0이라면, 재생점 u에서는 $\alpha_j\sum_{k=1}^{u-1}x_k=\sum_{k=1}^{u-1}r_{j,k}$의 관계가 성립한다. 즉, $X_{u-1}=R_{j,u-1}/\alpha_j$의 관계를 가진다. 이 때, 유형 i에 대한 재생품 재고량인 $I_{i,u}$은 $I_{i,u}=\alpha_i\sum_{k=1}^{u-1}x_k-\sum_{k=1}^{u-1}r_{i,k}=\alpha_iX_{u-1}-R_{i,u-1}=(\alpha_i/\alpha_j)R_{j,u-1}-R_{i,u-1}$와 같이 유형 j와 시점 u에 의해 결정된다. 따라서, 시점 u에서의 각 유형별 재생품 재고수준 벡터 ($I_{1,u}, I_{2,u}, \ldots, I_{j-1,u}, I_{j,u}, I_{j+1,u}, \ldots, I_{N,u}$)를 $I_u(j)$로 표시하기로 하자. 즉, $I_u(j)$는 $I_{j,u}$=0인 경우의 시점 u에서의 재생품 재고 수준 벡터를 나타내고, 이는 유형 j와 시점 u에 의해 결정된다. 폐기물 재고량의 경우도 $Y_u=\sum_{k=1}^{u-1}d_k-\sum_{k=1}^{u-1}x_k=\sum_{k=1}^{u-1}d_k-(1/\alpha_j)\sum_{k=1}^{u-1}r_{j,k}$이므로, 유형 j와 시점 u에 의해 결정되는 값이다. 그리고 만약 $I_{i,u}=I_{j,u}$=0이라면, $R_{i,u-1}/\alpha_i=R_{j,u-1}/\alpha_j$의 관계가 성립된다. 또한, $I_{j,u}=I_{k,v+1}$=0이고 시점 u와 v+1 ($v\geq u$)이 연속적인 재생점이라면, $X_{u-1}=R_{j,u-1}/\alpha_j$이고 $X_v=R_{k,v}/\alpha_k$이므로, $X_v-X_{u-1}=R_{k,v}/\alpha_k-R_{j,u-1}/\alpha_j=\sum_{t=u}^{v}x_t$가 된다. 즉, 시점 u에서 v 동안의 총 재생량은 $R_{k,v}/\alpha_k-R_{j,u-1}/\alpha_j$가 되어야 하는데, 이를 언제 얼마만큼 재생하는지의 재생계획 $\{x_t\}$에 따라 재고수준은 달라진다. 이를 위해 기간 $u\sim v$ 동안의 재생계획 중 최소 비용 값을 갖는 재생계획 방안을 찾는 문제를 생각할 수 있는데, 이를 모형 (1)의 부문제(sub-problem)라 하기로 하고, $d_{uv}(I_u(j),I_{v+1}(k))$로 표시하기로 하자. 즉, 기간 $u\sim v$ 동안의 부문제 $d_{uv}(I_u(j),I_{v+1}(k))$은 모형 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$d_{uv}(I_u(j),I_{v+1}(k))$$
$$=\underset{\{x_t\}}{Min}\Big\{\sum_{t=u}^{v}[C_t(x_t)+H_t(Y_{t+1})+\sum_{i=1}^{N}h_{i,t}(I_{i,t+1})+\sum_{i=1}^{N}s_{i,t}(I_{i,t+1})]\Big\} \quad (2)$$

s.t (i) 제약식 (1.1)과 (1.5)는 $t=u,u+1,\ldots,v$; $i=1,2,\ldots,N$에서 만족된다.

(ii) $I_{i,t}\neq 0$, $t=u,u+1,\ldots,v$; $i=1,2,\ldots,N$

(iii) $I_{j,u}=I_{k,v+1}$=0

위 (i)~(iii)의 제약식을 만족하는 $\{x_t\}$는 $\sum_{t=u}^{v}x_t=R_{k,v}/\alpha_k-R_{j,u-1}/\alpha_j$를 만족하는 것이고, $Y_{t+1}=\sum_{k=1}^{t}d_k-\sum_{k=1}^{t}x_k$이며, $I_{i,t+1}=\alpha_i\sum_{k=1}^{t}x_k-\sum_{k=1}^{t}r_{i,k}$이다. $d_{uv}(I_u(j),I_{v+1}(k))$를 구하는 문제는 선형(linear) 제약식으로 구성되는 볼록집합(convex set) 내에서 오목(concave) 목적함수 값이 최소가 되는 해를 찾는 문제이므로, 제약식의 꼭지점(extreme point) 해에서 최적해가 존재한다. 따라서 부분문제의 꼭지점 해의 특성을 규명하면, $d_{uv}(I_u(j),I_{v+1}(k))$를 쉽게 구할 수 있다.

성질 2. 제약식 (i)~(iii)을 만족하는 실행 가능해 중 $u\sim v$ 기간에 최대 한 번의 재생만 하는 재생계획안이 모형 (2)를 위한 꼭지점 해이다.

(증명) 꼭지점 해는 실행 가능해여야 하므로, 제약식 (i)~(iii)을 만족해야 한다는 것은 당연한 요구조건이다. 따라서, 꼭지점에 대한 성질의 증명은 연속된 두 재생점 간에는 많아야 한번의 재생만 이루어져야 한다는 조건이 필요함을 증명하면 된다. 그러나 만약 $u=v$로 고려기간이 하나인 경우는 자명하다. 따라서 $u<v$인 경우에 두 번 이상의 재생을 하는 형태는 꼭지점이 아니라는 것을 보임으로써 증명을 하면 된다.

$u\leq t_1<t_2\leq v$의 관계에 있는 최소한 두 시점 t_1과 t_2에서 재생산을 하는 형태의 실행 가능한 재생계획안 $\{x_t\}$을 고려하자. 그리고 실행 가능한 두 개의 다른 재생계획안 $\{x'_t\}$와 $\{x''_t\}$를 고려하자. 즉, $\{x_t\}$는 $x_{t_1}>0, x_{t_2}>0$이고 $x_t\geq 0$, $t=u,u+1,\ldots,v$ $(t\neq t_1,t_2)$이며 제약식 (i)~(iii)을 만족하는 해이다. 그리고, $\{x'_t\}$와 $\{x''_t\}$는 두 시점 t_1과 t_2에서의 재생산량만 $\{x_t\}$와 $x'_{t_1}=x_{t_1}+\varepsilon$, $x'_{t_2}=x_{t_2}-\varepsilon$, $x''_{t_1}=x_{t_1}-\varepsilon$, $x''_{t_2}=x_{t_2}+\varepsilon$와 같이 차이가 있는 실행 가능 재생계획안들이다. 여기서, $\varepsilon=\underset{t_1\leq t<t_2}{Min}\{\underset{1\leq i\leq N}{\min}(1/\alpha_i)[I_{i,t+1}+\sum_{k=t_2+1}r_{i,k}]\}$이고, 제약식 (1.3)에 의해 ε은 양수(positive number)이다. 이들 재생계획안 간에는 $x_{t_1}=(x'_{t_1}+x''_{t_1})/2$와 $x_{t_2}=(x'_{t_2}+x''_{t_2})/2$의 관계에 있으므로, 연속적인 두 재생점 간에 두 번 이상의 재생이 이루어지는 재생계획 $\{x_t\}$은 꼭지점 해가 아니다.

성질 2에 의하면, $I_{j,u}=I_{k,v+1}$=0이고 시점 u와 v+1 ($v\geq u$)이 연속적인 재생점이라면, $\sum_{t=u}^{v}x_t=R_{k,v}/\alpha_k-R_{j,u-1}/\alpha_j=x_w$가 된다. 여기서, w는 재생점 u에서부터 추후 납품 허용기간인 p 기간까지의 한 시점이다. 즉, w는 $u\leq w\leq u+p$인 하나의 시점이다. x_w값이 정해지면, Y_{t+1}및 $I_{i,t+1}$ 값이 정해지므로, $d_{uv}(I_u(j),I_{v+1}(k))$를 구할 수 있고, 이를 이용하여 동적계획법(Dynamic Programming)으로 최적해를 구할 수 있다.

동적계획법을 위해 $f_t(I_t(i))$을 다음과 같이 정의하자.

$f_t(I_t(i))$: $I_t=I_t(i)$로 주어진 기간 $t,t+1,\ldots,T$에 걸친 최소의 비용

그러면, 최적 재생계획을 찾기 위한 동적계획법은 다음과 같이 구성하면 된다.

$$f_{T+1}(I_{T+1}(i))=0,\ i=1,2,\ldots,N$$

$$f_u(I_u(i)) = \min_{\substack{u\le v\le T\\ 1\le k\le N}} \{ d_{uv}(I_u(j), I_{v+1}(k)) + f_{v+1}(I_{v+1}(k))\},$$
$$i=1,2,\ldots,N;\ u=T, T-1, \ldots, 1$$

위의 동적계획법을 이용하여 최적해를 구하기 위해서는 $v=1$에서 시작하여 $v=T$일 때까지 진행한 후, 다시 후행 방식으로 각 시점별 최적해를 형성한 시점을 찾아가면 된다.

성질 3. 위의 동적계획법은 모형 (1)에 대한 최적해를 보장하며, 계산복잡도는 $O(N^3 \cdot T^3)$이다.

(증명) 동적계획법의 최적성(optimality)의 증명은 Florian and Klein(1971)과 유사하게 임의의 재생점 u에서 마지막 시점 T까지의 최적해 $f_u(I_u(i))$는 시점 u에서 임의의 연속적인 재생점 v까지의 최적해 $d_{uv}(I_u(j), I_{v+1}(k))$와 v+1 시점부터 T 시점까지의 최적해 $f_{v+1}(I_{v+1}(k))$로 구성됨을 보이면 된다.

모형 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

Min.

$$\sum_{t=1}^{v}[C_t(x_t)+H_t(Y_{t+1}) + \sum_{i=1}^{N} h_{i,t}(I_{i,t+1}) + \sum_{i=1}^{N} s_{i,t}(I_{i,t+1})]$$
$$+ \sum_{i=1}^{N} s_{i,t}(I_{i,t+1})] + \sum_{t=v+1}^{T}[C_t(x_t)+H_t(Y_{t+1})$$
$$+ \sum_{i=1}^{N} h_{i,t}(I_{i,t+1}) + \sum_{i=1}^{N} s_{i,t}(I_{i,t+1})]$$

s.t. 제약식 (1.1)~(1.4)

$$Y_1 = I_{i,1} = I_{i,T+1} = 0$$
$$i=1,2,\ldots,N;\ t=1,2,\ldots,T$$

여기서, $\Pi_{i=1}^{N} I_{i,v+1}=0$가 되게 하는 $I_{k,v+1}=0$이 추가된다면, 이에 따라 v+1 시점의 각 재생품 유형별 재고수준은 $I_{i,v+1}= (\alpha_i/\alpha_k)R_{k,v} - R_{i,v}$로, $Y_{v+1}= \sum_{t=1}^{v} d_t - (1/\alpha_k)\sum_{t=1}^{v} r_{k,t} = \sum_{t=1}^{v} d_t - (1/\alpha_k)R_{k,v}$로 시점 1~$v$까지의 재생계획과 무관하게 결정되므로, 모형 (1)은 두 연속적인 재생점 1과 v+1까지의 문제와 또 다른 두 연속적인 재생점 v+1과 T+1 간의 문제로 독립적으로 나눠서 해결할 수 있다. 즉, $I_{k,v+1}=0$에 의해 나눠지는 모든 부문제들을 모든 가능한 $k=1, 2, \ldots, N$ 값과 $v=1, 2, \ldots, T$ 값에 대해 독립적으로 풀면 되므로 동적계획법의 최적성이 만족된다.

동적계획법의 계산 복잡도는 고려해야 할 부문제의 개수와 각 부문제를 해결하는 데 필요한 계산량에 의존한다. 부문제 $d_{uv}(I_u(j), I_{v+1}(k))$는 모든 N개의 재생품 유형 중 임의의 두 개의 유형(j, k)를, 모든 T개의 시점 중 임의의 두 시점 (u,v)를 고려해야 하므로, 고려해야 할 부문제의 개수는 $\binom{N}{2}\cdot\binom{T}{2}$가 되므로 $O(N^2 \cdot T^2)$의 계산 복잡도를 가진다. 각 부문제의 해결을 위해서는 N개 유형의 재고비용 계산을 해야 하고, p개의 재생 가능 시점에 대한 검토를 해야 하므로 $O(N \cdot p)$의 계산복잡도를 가진다. 여기서, $p \le T$이므로, 제안한 동적계획법의 계산복잡도는 $O(N^3 \cdot T^3)$이다.

부문제 $d_{uv}(I_u(j), I_{v+1}(k))$를 해결하는 데 있어서, u=1이거나 $v=T$인 경우는 가정에 의해 모든 i에 대해 $I_{i,1} = I_{i,T+1}=0$이므로, $d_{1v}(I_1(j), I_{v+1}(k))$와 $d_{uT}(I_u(j), I_{T+1}(k))$는 각각 모든 j나 k에 대해 동일한 값을 가지므로 하나의 문제만 해결하면 됨을 알 수 있다.

4. 수치 예제

재생계획기간이 $T=3$이고 폐기물의 재생처리 결과 $N=2$ 유형의 재생품이 생성되는 경우, 기간별 각 유형별로 주어진 재생품 수요량 $(r_{11}, r_{12}, r_{13})=(5,8,11)$, $(r_{21}, r_{22}, r_{23})=(3,2,7)$을 최소의 비용으로 만족시키기 위한 재생계획을 수립하고자 한다. 재생을 위한 폐기물의 각 기간별 예상 수거량은 $(d_1, d_2, d_3)=(8,10,18)$이고, 단일 설비를 통한 폐기물 재생률은 각 재생품 유형별로 $\alpha_1=1, \alpha_2=0.5$인 경우를 고려한다. 그리고 재생처리에 소요되는 비용함수, 폐기물 재고 유지비용, 재생품 재고 유지비용과 재생품의 추후 납품(backlog) 허용비용은 다음과 같다.

$$C_t(x_t)=0.9^{t-1}(5+2x_t) \quad t=1,2,3$$
$$H_t(Y_{t+1})=0.9^{t-1}0.5Y_{t+1}, \qquad i=1,2;\ t=1,2$$
$$h(I_{i,t+1})=0.9^{t-1}0.4I_{i,t+1}, \qquad i=1,2;\ t=1,2.$$
단, $I_{i,t+1} \le 0$일 때는 $h_{i,t}(I_{i,t+1})=0$
$$s(I_{i,t+1})=-0.9^{t-1}I_{i,t+1}, \qquad i=1,2;\ t=1,2.$$
단, $I_{i,t+1} \ge 0$일 때는, $s_{i,t}(I_{i,t+1})=0$

최대 추후 납품 허용기간이 p=1인 경우, 최적의 재생계획안을 찾고자 한다. 여기에서 고려하고 있는 수치 예제는 각 유형별 총 수요량이 $(1/\alpha_1)\sum_{k=1}^{3} r_{1,k} = (1/\alpha_2)\sum_{k=1}^{3} r_{2,k} = 24$이고, 모든 t=1, 2, 3과 i=1, 2에 대해 $\sum_{k=1}^{t} d_k \ge (1/\alpha_i)\sum_{k=1}^{t-1} r_{i,k}$이 성립되므로, 성질 1에 의해 실행 가능해가 존재함을 알 수 있다.

최적해를 위한 동적계획법을 적용하기 위해서는 먼저, 각 부문제를 풀어서 $d_{uv}(I_u(j), I_{v+1}(k))$ 값을 찾아야 한다. $d_{uv}(I_u(j), I_{v+1}(k))$를 위해서는 가능한 모든 ($u$, v)에 대해 가능한 모든 유형의 (j, k) 조합을 고려해야 하고, $R_{k,v}/\alpha_k$-

$R_{j,u-1}/\alpha_j$만큼을 재생처리하는 시점은 u, $u+1$, ..., $u+p$의 p까지의 모든 시점을 고려해야 한다. 여기서, 가정에 의해 $d_{1v}(I_1(1), I_{v+1}(k)) = d_{1v}(I_1(2), I_{v+1}(k))$이고, $d_{u3}(I_u(j), I_4(1)) = d_{u3}(I_u(j), I_4(2))$이다.

부문제 풀이의 예로서, 부문제 $d_{12}(I_1(1), I_3(1))$는 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저, $u\sim v$ 구간 안에서 재생처리해야 할 폐기물의 양은 $\sum_{t=u}^{v} x_t = R_{k,v}/\alpha_k - R_{j,u-1}/\alpha_j$로 구할 수 있다. 즉, 시점 1에서 2까지는 $\sum_{t=1}^{2} x_t = R_{1,2}/\alpha_1 - R_{1,0}/\alpha_1 = (r_{11} + r_{12})/1 - 0/1 = 13$만큼을 처리해야 한다. 다음으로, $\sum_{t=u}^{v} x_t$만큼의 폐기물을 $u\sim v$ 중 언제 재생처리할 것인지를 결정하기 위해 가능한 한 $v-u+1$개의 모든 대안에 대한 평가 후, 이 중에서 최소 비용을 갖는 대안을 선택한다. 즉, 13만큼의 폐기물의 재생계획 대안은 $\{(x_1, x_2)\} = \{(13,0), (0,13)\}$의 두 가지 대안이 있다. 즉, $d_{12}(I_1(1), I_3(1))$는 $\{(x_1, x_2)\} = \{(13,0), (0,13)\}$에 대해 최소의 비용을 가지는 대안에 의해 다음과 같이 정해진다.

$$d_{12}(I_1(1), I_3(1))$$

$$= \underset{\{(x_1, x_2)\}}{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{2} [C_t(x_t) + H_t(Y_{t+1}) + \sum_{i=1}^{2} h_{i,t}(I_{i,t+1}) + \sum_{i=1}^{2} s_{i,t}(I_{i,t+1})] \right\}$$

여기서, $Y_2, Y_3, I_{12}, I_{22}, I_{13}, I_{23}$값은 다음과 같이 각각 구해진다.

먼저, $(x_1, x_2) = (13,0)$의 경우, $Y_2 = Y_1 - x_1 + d_1 = 0-13+14 = 1$, $Y_3 = Y_2 - x_2 + d_2 = 1-0+10 = 11$이다. 그리고 $I_{12} = I_{11} + \alpha_1 x_1 - r_{11} = 0+13-5 = 8$, $I_{13} = 0$, $I_{22} = I_{21} + \alpha_2 x_1 - r_{21} = 0+(0.5)(13)-3 = 3.5$, $I_{23} = I_{22} - r_{22} = 3.5-2 = 1.5$로, $I_1(1) = (0, 0)$, $I_3(1) = (0, 1.5)$이다. 여기서, I_{11}와 I_{21}및 Y_1는 $I_{i,u} = (\alpha_i/\alpha_j) R_{j,u-1} - R_{i,u-1}$와 $Y_u = \sum_{k=1}^{u-1} d_k - (1/\alpha_j) \sum_{k=1}^{u-1} r_{j,k}$의 관계식을 이용하여 $I_{i,1} = (\alpha_i/\alpha_1) R_{1,0} - R_{i,0} = 0$ $(i=1,2)$와 $Y_1 = \sum_{k=1}^{0} d_k - (1/\alpha_1) \sum_{k=1}^{0} r_{1,k} = 0$의 값을 이용한다. 따라서 $(x_1, x_2) = (13, 0)$의 경우 $d_{12}(I_1(1), I_3(1)) = [C_1(x_1) + C_2(x_2)] + [H_1(Y_2) + H_2(Y_3)] + [h_{11}(I_{12}) + h_{12}(I_{13}) + h_{21}(I_{22}) + h_{22}(I_{23})] + [s_{11}(I_{12}) + s_{12}(I_{13}) + s_{21}(I_{22}) + s_{22}(I_{23})] = [C_1(13) + C_2(0)] + [H_1(1) + H_2(11)] + [h_{11}(8) + h_{12}(0) + h_{21}(3.5) + h_{22}(1.5)] = [31+4.5] + [0.5+4.95] + [3.2+0+1.4+0.54] = 46.09$이다.

비슷한 방법으로 $(x_1, x_2) = (0,13)$에 대해 계산하면, $(Y_2, Y_3) = (14, 11)$, $(I_{12}, I_{13}) = (-5, 0)$, $(I_{22}, I_{23}) = (-3, 1.5)$가 된다. $I_1(1) = (0, 0)$, $I_3(1) = (0, 1.5)$로 $(x_1, x_2) = (0,13)$ 경우와 같고, $(x_1, x_2) = (0,13)$의 경우 $d_{12}(I_1(1), I_3(1)) = 53.39$가 된다. 따라서 $d_{12}(I_1(1), I_3(1)) = \text{Min}\{46.09, 53.39\} = 46.09$가 되고, 이 때의 (x_1, x_2)는 <Table 1>과 같이 $x_1=13$이고 $x_2=0$이다. 이와 같이 각 부문제별 계산한 결과는 <Table 1>과 같다.

Table 1. Sub-problems duv

d_{uv}	value of d_{uv}	value of decision variables on periods u through v
$d_{11}(I_1(1), I_2(1))$ $d_{11}(I_1(2), I_2(1))$	20	$x_1=5, Y_2=9, I_{12}=0, I_{22}=-0.5$
$d_{11}(I_1(1), I_2(2))$ $d_{11}(I_1(2), I_2(2))$	21.4	$x_1=6, Y_2=8, I_{12}=1, I_{22}=0$
$d_{12}(I_1(1), I_3(1))$ $d_{12}(I_1(2), I_3(1))$	46.09	$x_1=13, x_2=0, Y_2=1, Y_3=11,$ $I_{12}=8, I_{22}=3.5, I_{13}=0, I_{23}=1.5$
$d_{12}(I_1(1), I_3(2))$ $d_{12}(I_1(2), I_3(2))$	43.3	$x_1=10, x_2=0, Y_2=4, Y_3=14,$ $I_{12}=5, I_{22}=2, I_{13}=-3, I_{23}=0$
$d_{13}(I_1(1), I_4(1))$ $d_{13}(I_1(1), I_4(2))$ $d_{13}(I_1(2), I_4(1))$ $d_{13}(I_1(2), I_4(2))$	85.52	$x_1=0, x_2=24, x_3=0,$ $Y_2=14, Y_3=0, Y_4=18,$ $I_{12}=-5, I_{22}=-3, I_{13}=11, I_{23}=7,$ $I_{14}=0, I_{24}=0$
$d_{22}(I_2(1), I_3(1))$	24.39	$x_2=8, Y_3=11, I_{13}=0, I_{23}=1.5$
$d_{22}(I_2(1), I_3(2))$	22.5	$x_2=5, Y_3=14, I_{13}=-3, I_{23}=0$
$d_{22}(I_2(2), I_3(1))$	22.59	$x_2=7, Y_3=11, I_{13}=0, I_{23}=1.5$
$d_{22}(I_2(2), I_3(2))$	20.7	$x_2=4, Y_3=14, I_{13}=-3, I_{23}=0$
$d_{23}(I_2(1), I_4(1))$ $d_{23}(I_2(1), I_4(2))$	56.52	$x_2=19, x_3=0, Y_3=0, Y_4=18,$ $I_{13}=11, I_{23}=7, I_{14}=0, I_{24}=0$
$d_{23}(I_2(2), I_4(1))$ $d_{23}(I_2(2), I_4(2))$	54.72	$x_2=18, x_3=0, Y_3=0, Y_4=18,$ $I_{13}=11, I_{23}=7, I_{14}=0, I_{24}=0$
$d_{33}(I_3(1), I_4(1))$ $d_{33}(I_3(1), I_4(2))$	29.16	$x_3=11, Y_4=18, I_{14}=0, I_{24}=0$
$d_{33}(I_3(2), I_4(1))$ $d_{33}(I_3(2), I_4(2))$	34.02	$x_3=14, Y_4=18, I_{14}=0, I_{24}=0$

다음으로 지금까지 구한 각 부문제별 비용값을 이용하여 동적계획법을 적용하면 다음과 같다.

$u = T+1$인 경우는 정의에 의해 N개 모두 0의 값을 가진다.

$f_4(I_4(i)) = 0,\ i = 1, 2$

$u = T, T-1, ..., 1$인 경우는 다음과 같이 각각 구한다.

$$f_3(I_3(1)) = \text{Min}\{d_{33}(I_3(1), I_4(1)) + f_4(I_4(1)),\ d_{33}(I_3(1), I_4(2)) + f_4(I_4(2))\}$$
$$= \text{Min}\{29.16 + 0, 29.16 + 0\} = 29.16$$

$$f_3(I_3(2)) = \text{Min}\{d_{33}(I_3(2), I_4(1)) + f_4(I_4(1)),\ d_{33}(I_3(2), I_4(2)) + f_4(I_4(2))\}$$
$$= \text{Min}\{34.02 + 0, 34.02 + 0\} = 34.02$$

$$f_2(I_2(1)) = \text{Min}\{d_{22}(I_2(1), I_3(1)) + f_3(I_3(1)),\ d_{22}(I_2(1), I_3(2)) + f_3(I_3(2)),\ d_{23}(I_2(1), I_4(1)) + f_4(I_4(1)),$$

$d_{23}(I_2(1), I_4(2)) + f_4(I_4(2))\}$
$= \mathrm{Min}\ \{24.39+29.16,\ 20.7+34.02,\ 56.52+0,\ 56.52+0\} = 24.39+29.16 = 53.55$

$$f_2(I_2(2)) = \mathrm{Min}\{ d_{22}(I_2(2), I_3(1)) + f_3(I_3(1)),\ d_{22}(I_2(2), I_3(2)) + f_3(I_3(2)),\ d_{23}(I_2(2), I_4(1)) + f_4(I_4(1)),\ d_{23}(I_2(2), I_4(2)) + f_4(I_4(2))\}$$
$$= \mathrm{Min}\ \{22.59+29.16,\ 20.7+34.02,\ 54.72+0,\ 54.72+0\} = 22.59+29.16 = 51.75$$

$$f_1(I_1(1)) = \mathrm{Min}\{ d_{11}(I_1(1), I_2(1)) + f_2(I_2(1)),\ d_{11}(I_1(1), I_2(2)) + f_2(I_2(2)),\ d_{12}(I_1(1), I_3(1)) + f_3(I_3(1)),\ d_{12}(I_1(1), I_3(2)) + f_3(I_3(2)),\ d_{13}(I_1(1), I_4(1)) + f_4(I_4(1)),\ d_{13}(I_1(1), I_4(2)) + f_4(I_4(2))\}$$
$$= \mathrm{Min}\ \{20+53.55,\ 21.4+51.75,\ 46.09+29.16,\ 43.3+34.02,\ 85.52+0,\ 85.52+0\} = 21.4+51.75 = 73.15$$

$$f_1(I_1(2)) = \mathrm{Min}\{ d_{11}(I_1(2), I_2(1)) + f_2(I_2(1)),\ d_{11}(I_1(2), I_2(2)) + f_2(I_2(2)),\ d_{12}(I_1(2), I_3(1)) + f_3(I_3(1)),\ d_{12}(I_1(2), I_3(2)) + f_3(I_3(2)),\ d_{13}(I_1(2), I_4(1)) + f_4(I_4(1)),\ d_{13}(I_1(2), I_4(2)) + f_4(I_4(2))\}$$
$$= 73.15$$

위와 같이 동적계획법의 적용 결과, $f_1(I_1(1))= 73.15$를 형성하는 것은 $d_{11}(I_1(1), I_2(2)) + f_2(I_2(2))$이고, $f_2(I_2(2)) = 51.75$를 형성하는 것은 $d_{22}(I_2(2), I_3(1)) + f_3(I_3(1))$이며, $f_3(I_3(1))=29.16$을 형성하는 것은 $d_{33}(I_3(1), I_4(1)) + f_4(I_4(1))$ 또는 $d_{33}(I_3(1), I_4(2)) + f_4(I_4(2))$이다. 결국, 최적 재생 계획안은 73.15의 총 비용을 소요하며, 각 기간 1, 2, 3에 각각 $x_1=6, x_2=7, x_3=11$ 만큼의 폐기물을 처리하는 것이다. 이 최적 재생 계획안은 $f_1(I_1(2))= 73.15$를 통해서도 마찬가지로 찾을 수 있다.

5. 결 론

산업혁명 이래로 많은 공산품이 생산 및 소모됨에 따라 폐기물(쓰레기)의 양도 급증하고 있다. 세계적으로 환경에 대한 문제점을 크게 인지하고 적극적으로 환경요인에 대처하여 구매의 친환경전략, 제품개발의 친환경전략, 자재 운송의 친환경전략, 생산의 친환경전략, 공급사슬 관점에서의 친환경적인 전략 등의 환경과 관련된 많은 전략들이 연구되고 있는 추세이다. 우리나라에서도 폐기물을 관리하기 위한 관련법을 제정하고, 아나바다(아껴 쓰고, 나눠 쓰고, 바꿔 쓰고, 다시 쓰는) 운동을 통해 이를 줄이고 재활용하기 위한 방안을 마련하고 있다.

본 논문에서는 추후 납품(backlog)이 허용되는 경우에 폐기물을 재생처리하여 재생품의 수요량을 만족시키기 위한 재생계획 수립 문제를 다루었다. 재생산 준비 및 처리비용, 폐기물 재고 유지비용, 재생품 재고 유지비용, 그리고 폐기물 수거(구입)비용 등과 관련된 총 비용을 최소화하기 위한 방안을 찾기 위해 먼저 실행 가능해가 존재하기 위한 조건을 규명하였고, 꼭지점 해가 되기 위한 성질을 분석하였다. 분석결과 재생산계획 수립 문제의 꼭지점 해는 폐기물 재고 유지비용을 고려하지 않는 기존의 DLSP(Dynamic Lot Sizing Problem) 모형의 것과 유사한 성질을 갖는 것을 밝혔다. 분석한 최적해의 성질을 이용한 동적계획법을 개발하였고, 분석 및 수치 예제를 통해 동적계획법의 효율성을 보였다.

본 연구에서 다룬 재생 문제는 재사용이나 재활용이 가능한 폐기물을 처리하는 작업을 시행하는 상황에서의 재생일정관리에 사용될 수 있을 것이다. 예를 들어, 요즘 많이 늘고 있는 셀룰러 폰의 중고단말기를 재활용한다면 PCB 기판에서 금, 은, 파라듐, IC 칩 등을 회수하여 다시 하나의 새로운 단말기를 제작한다거나, 자동차의 경우도 다시 재사용할 수 있는 부품은 재사용하고, 재사용할 수 없는 고철의 경우 다시 원자재로 변환하여 재활용하는 업체의 경우도 본 연구의 재생계획 모델에 적용할 수도 있다. 물론 이외에도 광범위한 재생활동을 하는 업체의 재생일정관리에 적용할 수 있다.

본 연구는 폐기물 수거량이 주어진 경우에만 적용될 수 있는데, 추후 연구과제로 폐기물 수거량을 결정하는 경우의 모형과 동적 재생률을 갖는 경우의 모형을 고려할 수 있을 것이다. 또한 단일 설비가 아닌 여러 개의 설비를 이용하여 재생처리하는 경우의 문제와 이 문제를 더욱 확장한 전체 공급사슬에 관한 분석도 필요하다.

참고문헌

Fleischmann, M., Boemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.A.E.E., Van Wassenhove, L.N. (1997), Quantitative Models for Reverse Logistics: a Review, *European Journal of Operational Research,* **103**, 1-17.

Florian, M. and Klein, M.(1971), Deterministic Production Planning with Concave Costs and Capacity Constraints, *Management Science*, **18**(1), 12-20.

Joo, U.G.(2000), Remanufacturing Planning on a Single Facility, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **24**(4), 111-122.

Krikke, H.R., van Harten, A., Schuur, P.C.(1999), Business Case Roteb : Recovery Strategies for Monitors, *Computers & Industrial Engineering*, **36**, 739-757.

Luss, H. (1984), Capacity Expansion Planning for a Single

Facility Product Line, *European Journal of Operational Research,* **18**, 27-34.

Nagel C. and Meyer, P. (1999), Caught Between Ecology and Economy : End-of-Life Aspects of Environmentally Conscious Manufacturing, *Computers & Industrial Engineering*, **36**, 781-792.

Richter K. and Sombrutzki, M. (2000), Remanufacturing Planning for the Reverse Wagner/Whitin Models, *European Journal of Operational Research*, **121**, 304-315.

Richter K. and Weber, J. (2001), The Reverse Wagner/Whitin Model with Variable Manufacturing and Remanufacturing Cost, *International Journal of Production Economics*, **17**, 447-456.

Wargner H.M. and Whitin, T.M. (1958), Dynamic Version of the Economic Lot Size Model, *Management Science*, **5**(1), 89-96.