韓國經營科學會誌
第25卷 第4號
2000年 12月

단일 재생 처리 설비를 이용한 재생계획

주 운 기*

Remanufacturing Planning on a Single Facility

Un Gi Joo*

■ Abstract ■

This paper considers remanufacturing planning problems under deterministic environments. As increasing the environmental pressures in manufacturing, various methods for reducing wastes or postponing the time to be waste are considered. This paper considers remanufacturing planning problems on a single facility, where the wastes(or used products) are remanufactured to satisfy the given demand on the remanufactured product. The objective is to find the optimal remanufacturing and purchasing planning of the wastes which minimize total cost subject to satisfaction all the given demand on the remanufactured products. Two problems that the amount of wastes is a given constant or a decision variable are considered, respectively. For the problems, the extreme point solutions are characterized, and dynamic programming algorithms are developed with numerical examples.

1. 서 론

산업혁명 이래로 제품 생산량이 급증하였고, 이를 위해서 원자재, 에너지, 물 등의 여러 가지 자원을 많이 사용하게 되었다. 미국의 경우, 년간 1인당 평균 20톤의 원자재를 사용하고 매일 1인당 27년의 태양에너지에 버금가는 화석에너지를 소비하고 있어서 이를 통해 발생되는 쓰레기(waste) 양은 엄청나다. EPA(Environmental Protection Agency)에 따르면, 미국내 쓰레기는 년간 120억톤 정도 발생한다고 하는데, 정보화 사회에 접어든 후 중고 컴퓨터와 같은 전자제품 쓰레기도 막대하다[4, 5]. 우리 나라의 경우, 종이, 유리병, 고철, 캔 및 플라스틱류를 중심으로 폐자원의 재활용(recycling) 및

* 선문대학교 벤처 및 산업공학 전공

재사용(reuse)을 위해 아나바다(아껴쓰고 나눠쓰고 바꿔쓰고 다시쓰는) 운동을 전개하여, 폐지 이용률은 58%, 플라스틱 재활용 율은 17%, 캔의 재활용율은 68%, 유리병의 재 사용율은 95%정도에 이르고 있다[2]. 재활용된 종이 1톤은 나무 17그루, 물 28톤, 전력 4200Kw를 절감하는 효과가 있고, 알루미늄캔의 재활용은 원광석으로부터 얻는데 필요한 에너지의 1/26의 에너지 절감효과가 있으므로[2], 우리 나라와 같이 자원이 부족한 나라는 제품의 재제조(remanufacturing) 및 재사용(reuse) 개념이 매우 중요하다.

쓰레기(폐기물)를 줄이기 위한 방안으로는 제품의 효용 및 수명 주기를 증진시키는 것을 고려할 수 있는데, 이를 위한 방법으로는 내구성이 큰 제품을 생산하고, 제품 또는 부품의 사용기간 연장을 위해 재사용, 수선, 재가공(product recycling) 등을 하거나, 다용도 제품(multiple functional products)을 생산하는 방법 등이 있다[1, 3].

본 논문은 폐기물의 절감 및 재활용을 위한 재생 계획 수립을 위한 문제를 고려하는데, 주어진 재생품의 수요량을 최소 비용으로 만족시키기 위해 각 기간별 사용 가능한 폐기물 중 얼마만큼의 폐기물을 재생 처리할 지를 결정하는 문제를 다룬다. 이러한 이산시점(discrete time)별 주어진 수요량을 최소의 비용으로 만족시키기 위한 계획 수립 문제는 Wagner and Whitin[8]이 단일설비로 단일종류의 제품에 대한 각 기간별 주어진 수요량을 만족시키기 위한 생산계획 수립 방법을 제시한 이래로, 설비의 구성이나 생산 및 재고량의 제약과 생산 제품의 종류 및 특성 등에 따라 다양한 DLSP (Dynamic Lot Sizing Problem) 모델에 대한 연구가 진행되었다. 그러나, 이들 DLSP 문제에 대한 연구는 최종적인 제품 수요량을 최소 비용으로 만족시키기 위한 생산계획 수립을 위한 문제들에 대한 것으로서, 제품 생산을 위한 원자재(raw material) 또는 폐기물을 고려하지 않은 모델들에 대한 것이다. 재생품의 원료가 되는 폐기물을 고려한 연구로, Richter and Sombrutzki[6]는 각 기간 별 주어진 폐기물 양을 재생 처리하여 재생품에 대한 모든 수요를 만족시키기 위한 재생산 계획 수립 문제를 다루었다. 여기에서 고려한 모델은 보유할 폐기물 양은 결정이 불가능한 상황에서 1단위의 폐기물을 재생처리하면 1단위의 재생 완제품이 생산되는 경우, 선형(linear)의 폐기물 및 재생품의 재고 유지비용과 재생 준비 비용의 최소화를 위한 것이다.

본 논문에서는 유한 기간내 각 시점에서의 한 종류의 제품 수요량을 만족시키기 위한 재생산 계획 수립에 대한 것으로, 재생산을 위해서 필요한 폐기물 양이 각 기간 별로 주어진 경우 외에 폐기물 수거량을 결정해야 하는 경우의 모형도 다룬다. 여기서, 각 기간별 재생처리 되는 폐기물 중 일정 비율(재생율)만 완제품으로 다시 생산되고, 나머지는 2차 폐기물을 형성하는 경우를 고려하였다. 관련 비용함수가 모두 위로 볼록(concave) 함수라고 할 때, 각 기간별 주어진 재생품 수요를 최소의 비용으로 모두 만족시키기 위한 재생 계획을 수립하기 위해 동적계획법을 제안한다. 이를 위해 제 2장에서는 문제에 대한 설명 및 모형을 수립하였다. 제 3장에서는 두개의 각 모델 별 최적해의 성질을 규명하고 최적 계획안을 찾기 위한 동적계획법을 개발한다. 마지막으로, 제 4장에서는 추후 연구 과제 및 본 연구 결과의 활용 방안을 검토하였다.

2. 재생계획 모형

폐기물 재생계획 수립을 위한 모델링을 위해 다음의 기호를 정의하여 사용한다.

T : 재생 계획 기간

d_t : t 기간의 폐기물 양, $t = 1, 2, \cdots, T$

X_t : t 기간 초에 재생 처리하는 폐기물 양, $t = 1, 2, \cdots, T$

Y_t : t 기간 말의 폐기물 재고량

D_t : t 기간의 재생품 수요량, $t = 1, 2, \cdots, T$

I_t : t 기간 말의 재생품 재고량, $t = 1, 2, \cdots, T$

α : 재생율, $0 < \alpha \leq 1$

$R_t(X_t)$: t 시점 초에 X_t 만큼 재생처리에 소요되는 비용

$h_t(Y_t)$: t 기간에 Y_t 만큼의 폐기물 재고유지 비용

$H_t(I_t)$: t 기간에 I_t 만큼의 재생품 재고유지 비용

$M_t((1-\alpha)X_t)$: t 기간에 발생한 2차 폐기물 양 $(1-\alpha)X_T$을 처리하는 비용

$$\delta(X_t) = \begin{cases} 1, & X_t > 0 \\ 0, & X_t = 0 \end{cases}$$

$S_t(\delta(X_t))$: t 시점에 X_t만큼 재생 처리하기 위한 준비 비용

여기서 모든 비용함수 $R_t(X_t)$, $h_t(Y_t)$, $H_t(I_t)$, $M_t((1-\alpha)X_t)$, $S_t(\delta(X_t))$는 비감소 오목함수(nondecreasing concave function)라고 가정한다. 그리고, 폐기물의 재생은 각 기간 초에 수행하고 폐기물 및 재생품의 재고는 각 기간 말에도 재고가 존재하는 경우를 그 기간의 재고로 간주한다. 주어진 재생품 수요량 $\{D_t\}$을 최소의 비용으로 만족시키기 위한 수리 모형 (P1)은 다음과 같다.

$$Min. \sum_{t=1}^{T} [\ R_t(X_t) + h_t(Y_t) + H_t(I_t) + M_t((1-\alpha)X_t) + S_t(\delta(X_t))] \tag{P1}$$

s.t.

$$Y_t = Y_{t-1} - X_t + d_t \tag{1}$$

$$I_t = I_{t-1} + \alpha X_t - D_t \tag{2}$$

$$Y_0 = I_0 = 0\ ,\ I_T = 0 \tag{3}$$

$$X_t,\ \ Y_t,\ \ I_t \geq 0,\ t = 1, 2, \cdots, T \tag{4}$$

첫 번째 제약식 (1)은 폐기물 재고 수준의 균형식을 나타내고, 두 번째 제약식 (2)는 재생 처리한 완제품의 재고 균형식을 나타낸다. 첫 번째 제약식에 표시된 바와 같이 각 기간 t에 폐기물 원재료는 X_t 만큼 재생 처리되지만 이중 αX_t 만큼의 재생 완성품을 생산하고 나머지 $(1-\alpha)100\%$는 2차 폐기물을 만들고 이는 $M_t((1-\alpha)X_t)$의 비용으로 즉시 처리하는 것을 가정하는데, 재생 계획 중에 총 $(1-\alpha)\sum_{t=1}^{T} X_t = \frac{1-\alpha}{\alpha} \sum_{t=1}^{T} D_t$ 만큼의 2차 폐기물이 발생하게 된다. 여기서, $\alpha = 0$이면 실행가능해는 존재하지 않고, $\alpha = 1$이면 X_t개의 폐기물을 재생 처리하면 X_t 개의 재생품을 생산할 수 있는 경우가 된다. 셋째 제약식 (3)은 계획기간 시작 및 마지막 시점에서의 폐기물 및 재생품 재고 수준에 대한 가정으로, 여기서 초기의 폐기물 및 재생품 재고가 0이 아닌 경우는 $d'_1 = d_1 + Y_0$ 및 $D'_1 = D_1 + I_0$로 조정하여 풀면 되므로, $Y_0 = I_0 = 0$로 해도 일반성에 문제는 없다. 그리고, 재생품에 대한 생산계획 기간 말의 재고인 I_T는 관련 비용이 모두 비 감소 오목함수라고 가정하였으므로 0이 되어야 최적이 됨을 쉽게 알 수 있다. 그러나, 폐기물에 대한 T시점의 재고수준은 각 기간별 폐기물 양 d_t가 주어진 경우에는 $Y_T = \sum_{t=1}^{T} d_t - \frac{\sum_{t=1}^{T} D_t}{\alpha}$ 이므로, $Y_T = 0$인 경우가 최적이라는 보장을 못한다.

각 기간별 폐기물 d_t는 필요 이상의 양만큼 보유하면 재고 유지비용이 발생하므로, 본 논문에서는 $\{d_t\}$가 주어진 경우와 $\{d_t\}$를 결정해야하는 경우의 두 가지로 구분하여 분석한다.

3. 최적해의 성질

문제 (P1)은 선형 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 규명하므로서 최적해의 성질을 규명한다.

다음 성질은 문제 (P1)이 실행가능해(feasible solution)를 갖기 위한 조건을 밝힌다.

성질 1. 모형 (P1)이 실행가능해를 갖기 위한 필요

충분 조건은 다음과 같다.

$$\alpha \sum_{j=1}^{t} d_j \geq \sum_{j=1}^{t} D_j,\ t=1,2,\cdots,T$$

(증명) (P1)의 식 (3)에서 $Y_0 = I_0 = 0$ 이므로, 식 (1)은 $Y_t = \sum_{j=1}^{t} d_j - \sum_{j=1}^{t} X_j$ 이 되고, 식 (2)은 $I_t = \alpha \sum_{j=1}^{t} X_j - \sum_{j=1}^{t} D_j$이 된다. 따라서, 식 (4)의 비음제약을 만족시키는 해는 $\frac{\sum_{j=1}^{t} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} X_j \leq \sum_{j=1}^{t} d_j$의 관계를 만족하는 것이어야 한다.

다음 절에서는 $\{d_t\}$가 주어진 경우와 $\{d_t\}$를 결정해야하는 경우의 두 가지로 구분하여 꼭지점 가능해의 성질을 기술하고, 각각 동적계획법(Dynamic Programming)을 개발하였다.

3.1 폐기물 양 d_t가 주어진 경우

성질 1을 만족하는 각 기간 별 폐기물 수거량 d_t이 주어진 경우, 모형 (P1)의 꼭지점 해는 다음과 같다.

성질 2. 모형 (P1)의 꼭지점 해가 되기 위한 필요충분 조건은 다음과 같다.

$$I_{t-1} \cdot X_t = 0,\ t=1,2,\cdots,T$$

(증명) 이 성질의 증명은 Zangwill[8]과 유사한 방법으로 보일 수 있다. 즉, 재생계획 $X = (X_1, X_2, \cdots, X_T)$이 꼭지점 해이지만 $I_{t-1} \cdot X_t = 0$, $\forall t$를 만족하지는 않는다고 하자. 그러면, 적어도 한 시점 a에서는 $I_{a-1} \cdot X_a > 0$ 이고, 두 개의 서로 다른 실행 가능해 $X^1 = (X_1^1, X_2^1, \cdots, X_a^1, \cdots, X_b^1, \cdots, X_T^1) = X - \delta\mu_a + \delta\mu_b$와 $X^2 = X + \delta\mu_a - \delta\mu_b$의 볼록조합식(convex combination) $X = \frac{1}{2}(X^1 + X^2)$으로 표현 가능하다. 여기서, $\delta = \frac{1}{2}\text{Min}\{X_a, X_b, \min_{a \leq t \leq b}\{I_t\}\}$ 이고, μ_t는 t번째 요소만 1이고 나머지는 0인 단위 벡터(unit vector)를 나타낸다. 따라서, 꼭지점 해는 $I_{t-1} \cdot X_t = 0$, $\forall t$, $t = 1, 2, \cdots, T$를 만족한다.

마찬가지로, $I_{t-1} \cdot X_t = 0$, $\forall t$, $t=1,2,\cdots,T$를 만족하는 X가 꼭지점 해가 아니라면, $X = \frac{1}{2}(X^1 + X^2)$로 표현되는 서로 다른 실행가능해 $X^1 = X - \delta\mu_a + \delta\mu_b$과 $X^2 = X + \delta\mu_a - \delta\mu_b$가 존재한다. 여기서, $\delta = \frac{1}{2}\text{Min}\{X_a, X_b, \min_{a \leq t \leq b}\{I_t\}\}$이다. 그러나, 이를 위해서는 $I_t > 0$, $a-1 \leq t \leq b$이어야 하므로 $I_{a-1} \cdot X_a > 0$ 이고 $I_{b-1} \cdot X_b > 0$가 되어 모순이 된다. 따라서, $I_{t-1} \cdot X_t = 0$, $\forall t$를 만족하는 X는 꼭지점 해이다.

성질 2에 의하면 (P1)의 꼭지점 해는 폐기물 원재료의 재고 수준을 나타내는 변수인 Y_t에는 무관하게 결정되고, 각 기간별 재생량은 다음과 같은 형태를 가진다.

성질 3. 다음 형태의 재생계획은 모형 (P1)의 최적해가 된다.

$$X_t = 0 \text{ 또는 } \frac{\sum_{j=t}^{k} D_j}{\alpha},\ t=1,2,\cdots,T,$$

여기서 $t \leq k \leq \arg \underset{t \leq k \leq T}{Max} \{ \frac{\sum_{j=1}^{k} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} d_j \}$ 이다.

(증명) 성질 2를 위해서는, $I_{t-1} > 0$ 이면 $X_t = 0$이다. 그리고, 만약 $I_{t-1} = 0$이라면 $X_t = \frac{\sum_{j=t}^{k} D_j}{\alpha}$여야 한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 여기서, 재생량의 크기는 처리 가능한 폐기물 원재료 양 한도 내에서 결정되어야 하는데, $Y_t = \sum_{j=1}^{t} d_j - \sum_{j=1}^{t} X_j$ 이고 $\frac{I_t}{\alpha} = \sum_{j=1}^{t} X_j - \frac{\sum_{j=1}^{t} D_j}{\alpha}$이므로, $X_t + Y_t + \frac{I_{t-1}}{\alpha} = \sum_{j=1}^{t} d_j -$

$\frac{\sum_{j=1}^{t-1} D_j}{\alpha}$ 이다. 그리고, $X_t > 0$ 이고 $Y_t \geq 0$ 이므로, 성질 2에 의해 $I_{t-1} = 0$ 이고 $X_t \leq \sum_{j=1}^{t} d_j - \frac{\sum_{j=1}^{t-1} D_j}{\alpha}$ 이다. 따라서, X_t 대신 $\frac{\sum_{j=t}^{k} D_j}{\alpha}$ 를 대입하여 정리하면 관계식 $\frac{\sum_{j=1}^{k} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} d_j$이 되므로, X_t를 위한 k 값의 최대값은 $\arg \max_{t \leq k \leq T} \{ \frac{\sum_{j=1}^{k} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} d_j \}$이다.

성질 3에서 각 기간 t에 재생처리 가능한 최대 크기가 t 기간에서부터 특정 조건을 만족하는 k 기간까지의 수요량에 대한 것으로 한정되는 것은, 성질 1의 실행가능해 존재 조건을 만족시키는 한도 내에서만 재생처리가 가능하기 때문이다.

위에서 규명한 꼭지점 해 중 목적함수 값을 최소화시키는 값을 찾기 위해서 다음을 정의하자.

정의 1. $I_{t-1} = 0$를 만족하는 시점 t를 재생점(regeneration point)이라고 하자.

성질 2에 의하면, 재생 처리를 할 수 있는 것은 재생점에서만 가능하므로, 총 계획 기간 T를 재생점으로 구획을 나눠가며 동적계획법(dynamic programming)을 이용하여 최적해를 구할 수 있다. 이를 위해 다음을 정의한다.

f_t : 처음 t기간까지의 최소 비용

d_{uv} : 연속적인 두 개의 재생점 u, v+1간의 수요량을 만족시키기 위한 재생계획안의 비용으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d_{uv} = R_u(X_u) + S_u(1) + M_u((1-\alpha)X_u) + \sum_{t=u}^{v} H_t(I_t) + \sum_{t=u}^{v} h_t(Y_t)$$

여기서, $X_u = \frac{\sum_{t=u}^{v} D_t}{\alpha}$, $1 \leq u \leq v \leq \arg \max_{u \leq v \leq T} \{ \frac{\sum_{j=1}^{v} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{u} d_j \}$이다. 그리고, u~v 기간 동안의 시점 t에서의 재고량은 재생 제품 재고가 $I_t = \alpha X_u - \sum_{j=u}^{t} D_j$이고 원재료 재고는 $Y_t = Y_{u-1} - X_u + \sum_{j=u}^{t} d_j$이다. 그리고, $Y_{u-1} = \sum_{j=1}^{u-1} d_j - \sum_{j=1}^{u-1} X_j$ 에서 $I_{u-1} = 0$이므로, $\sum_{j=1}^{u-1} X_j = \frac{\sum_{j=1}^{u-1} D_j}{\alpha}$ 이다. 따라서, $Y_{u-1} = \sum_{j=1}^{u-1} d_j - \frac{\sum_{j=1}^{u-1} D_j}{\alpha}$ 가 되어, d_{uv} 계산을 위해 필요한 Y_{u-1}는 u 이전의 재생 계획 $\{X_t\}$에는 무관하고 재생시점 u에 따라 정해지는 값이다. 이러한 여러 부 문제(sub-problem) d_{uv}에 대해 다음과 같이 최적 재생계획 수립을 위한 동적계획법을 구성할 수 있다.

$$f_0 = 0$$

$$f_v = \min_{1 \leq u \leq v} \{ f_{u-1} + d_{uv} \}$$

위의 동적계획법을 이용하여 최적해를 구하기 위해서는 v = 1에서 시작하여 v = T일 때까지 진행한 후, 후진 방향(backward)으로 각 시점 별 최적해를 형성한 시점을 찾아가면 된다. 그리고, 여기서 제시한 동적계획법은 Wagner and Whitin[7]과 마찬가지로 다음과 같은 특성을 가지고 있으므로 효율적으로 최적해를 찾을 수 있는데, 이의 자세한 증명은 생략한다.

성질 4. $f_{v*} = f_{(u-1)*} + d_{u*v*}$ 형태로 기간 v*에서의 최소 비용 계획안이 기간 (u-1)*에서 발생했다면, v* 이후의 기간 t에서의 최소 비용을 위해서는 (u-1)* ≤ t의 기간 범위만 고려하면 된다.

계산 예를 위해 주어진 폐기물 수거량 (d_1, d_2, d_3, d_4) = (8, 1, 1, 3)을 재생산 처리하여 각 기간별 재생품 수요량 (D_1, D_2, D_3, D_4) = (2, 3, 1, 4)을 만족시키는 경우를 고려하자. 폐기물의 재생율이 α = 0.8이고, 관련 비용 함수는 다음과 같이 주

어진 경우, 총 비용을 최소화하는 재생계획안을 구하고자 한다.

$$R_t(X_t) = (30 + 10X_t)0.9^{t-1}$$

$$M_t((1-\alpha)X_t) = 5(1-\alpha)X_t 0.9^{t-1}$$

$$S_t(\delta(X_t)) = 20\delta(X_t)0.9^{t-1}$$, 여기서 $X_t > 0$이면, $\delta(X_t) = 1$이고, $X_t = 0$이면, $\delta(X_t) = 0$이다.

$$H_t(I_t) = 5I_t 0.9^{t-1}$$

$$h_t(Y_t) = 3Y_t 0.9^{t-1}$$

이 문제는 $\alpha \sum_{j=1}^{t} d_j \ge \sum_{j=1}^{t} D_j$, $t = 1, 2, \cdots, T$의 관계를 만족하므로, 성질 1에 의해 실행가능해가 존재하는 문제이다.

동적계획법을 적용하기 위해서는 부분 문제인 d_{uv}값을 구해야 한다. 예를 들면, d_{11}을 위해서는 재생점 1에서의 처리량 X_1은 $X_1 = \frac{D_1}{\alpha} = \frac{2}{0.8} = 2.5$이 되고, 재고량 $Y_1 = d_1 - X_1 = 8 - 2.5 = 5.5$이 된다. 따라서, $d_{11} = R_1(2.5) + S_1(1) + M_1(0.2X_1) + \sum_{t=1}^{1} H_t(I_t) + \sum_{t=1}^{1} h_t(Y_t) = 30 + 10(2.5) + 20 + 0.2(5)(2.5) + 5(0) + 3(5.5) = 74$이다. 마찬가지로, d_{23}를 위해서는 $X_2 = \frac{D_2 + D_3}{\alpha} = 5$이므로 $I_2 = \alpha X_2 - D_2 = 1$이다. 그리고, $Y_1 = d_1 - \frac{D_1}{\alpha} = 5.5$이므로 $Y_2 = Y_1 + d_2 - X_2 = 1.5$ 이고 $Y_3 = Y_2 + d_3 = 2.5$이다. 따라서, $d_{23} = R_2(5) + S_2(1) + M_2(0.2X_2) + \sum_{t=2}^{3} H_t(I_t) + \sum_{t=2}^{3} h_t(Y_t) = 109.25$이다. 그러나, <표 1>에서 보는 바와 같이 d_{14}, d_{24}, d_{34}는 성질 1의 실행 가능해 제약 때문에 u시점에 한 번의 재생산으로 v시점까지의 수요량을 만족시킬 수 없으므로 무한대의 비용을 갖는 것으로 설정하였다. 예를 들면, d_{14}를 위해서는 $X_1 = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{\alpha} = 12.5$ 만큼의 폐기물을 재생 처리해야 하는데, t = 1시점에서 가용한 폐기물 양은 $d_1 = 8$이므로 $X_1 = 12.5$ 만큼을 재생 처리할 수가 없다.

각 부 문제별 계산한 비용인 <표 1>을 이용하여 동적계획법을 적용하면 다음과 같다.

$$f_0 = 0$$

$$f_1 = f_0 + d_{11} = 0 + 74 = 74$$

$$f_2 = \text{Min}\{f_0 + d_{12},\ f_1 + d_{22}\} = \text{Min}\{0 + 130.525,\ 74 + 89.55\} = 130.525$$

$$f_3 = \text{Min}\{f_0 + d_{13},\ f_1 + d_{23},\ f_2 + d_{33}\} = \text{Min}\{0 + 168.625,\ 74 + 109.125,\ 130.525 + 57.7125\} = 168.625$$

$$f_4 = \text{Min}\{f_0 + d_{14},\ f_1 + d_{24},\ f_2 + d_{34},\ f_3 + d_{44}\} = \text{Min}\{\infty,\ \infty,\ \infty,\ 168.625 + 74.7225\} = \text{Min}\{f_3 + d_{44}\} = 243.3475$$

T = 4에서의 해인 f_4가 f_3에서 발생하였고, f_3는 f_0에서 발생하였으므로, 최적 재생 계획안은 $(X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*) = (7.5, 0, 0, 5)$로써 총 비용이 243.3475가 된다.

〈표 1〉 부 문제 d_{uv}

d_{uv}	d_{uv}값	기간 u~v에서 양의 변수
d_{11}	74	$X_1 = 2.5$, $Y_1 = 5.5$
d_{12}	130.525	$X_1 = 6.25$, $I_1 = 3$, $Y_1 = 1.75$, $Y_2 = 2.75$
d_{13}	168.625	$X_1 = 7.5$, $I_1 = 4$, $I_2 = 1$, $Y_1 = 0.5$, $Y_2 = 1.5$, $Y_3 = 2.5$
d_{14}	∞	
d_{22}	89.55	$X_2 = 3.75$, $Y_2 = 2.75$
d_{23}	109.125	$X_2 = 5$, $I_2 = 1$, $Y_2 = 1.5$, $Y_3 = 2.5$
d_{24}	∞	
d_{33}	57.7125	$X_3 = 1.25$, $Y_3 = 2.5$
d_{34}	∞	
d_{44}	74.7225	$X_4 = 5$, $Y_4 = 0.5$

3.2 $\{d_t\}$를 결정하는 경우

폐기물을 관리하는 데에도 비용이 소요되므로, 적절한 양을 수거(구입)하여 이를 재생 처리하는

것이 경제적이다. 이 장에서는 각 기간 t에서의 폐기물 수거량인 d_t도 결정해야 하는 경우를 다룬다. d_t를 결정해야하는 문제는 다음의 모형 (P2)로 표현될 수 있다.

$$Min. \sum_{t=1}^{T}[\ R_t(X_t)+h_t(Y_t)+H_t(I_t)+ M_t((1-\alpha)X_t)+S_t(\delta(X_t))+P_t(d_t)] \quad (P2)$$

s.t. 식 (1) ~ (4)

$d_t \geq 0$, t = 1, 2, ⋯ , T

여기서 $P_t(d_t)$는 t 시점 초에 d_t만큼의 폐기물 구입 비용을 나타내며, 오목함수라고 가정한다. $P_t(d_t)$를 포함한 모든 관련 비용이 비감소 오목함수를 가정하고 있으므로, (P1)과는 다르게 계획기간 말의 폐기물 재고량은 $Y_T=0$이어야 최적이 된다. 그리고, 모형 (P2)의 경우에도 실행가능해가 존재하기 위해서는 성질 1의 조건이 필요하므로 모든 t = 1, 2, ⋯ , T-1에 대해 $\frac{\sum_{j=1}^{t} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} X_j \leq \sum_{j=1}^{t} d_j$여야 하고, 시점 T에서는 $Y_T=0$이어야하므로 $\sum_{j=1}^{T} X_j = \sum_{j=1}^{T} d_j = \frac{\sum_{j=1}^{T} D_j}{\alpha}$의 관계가 성립된다.

모형 (P2)의 경우에도 볼록집합의 제약식에서 오목함수를 최소화하는 해를 찾는 문제이므로, 모형 (P1)과 마찬가지로 꼭지점 해 중에서 제일 좋은 해를 찾으면 최적해가 얻어진다. 다음 성질은 실행가능해가 존재하는 경우, 모형 (P2)의 꼭지점 해의 특성이다.

성질 5. 모형 (P2)의 꼭지점 해가 되기 위한 필요충분 조건은 다음과 같다.

$$I_{t-1}\cdot X_t=0,\ t=1,2,\ \cdots,\ T$$
$$Y_{t-1}\cdot d_t=0,\ t=1,2,\ \cdots,\ T$$

(증명) 이 성질의 증명도 성질 2와 유사한 방법으로 할 수 있으므로 생략한다.

성질 5에 의하면, 각 기간 t에서의 폐기물 수거량 및 재생량은 다음과 같은 형태를 취하는 것이 최적해가 될 수 있음을 성질 3과 유사하게 보일 수 있다.

$X_t=0$ 또는 $\frac{\sum_{j=t}^{k} D_j}{\alpha}$, t = 1, 2, ⋯, T, 여기서 t ≤ k ≤ arg $\underset{t\leq k\leq T}{Max}\{\frac{\sum_{j=1}^{k} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} d_j\}$ 이다. 그리고, 폐기물 구매량은 d_t = 0 또는 $\frac{\sum_{j=t}^{l} D_j}{\alpha}$이다. 여기서, l은 1 ≤t ≤ l ≤T 이고, $\frac{\sum_{j=1}^{t} D_j}{\alpha} \leq \sum_{j=1}^{t} X_j \leq \sum_{j=1}^{t} d_j$, t = 1, 2, ⋯ , T의 관계를 만족해야 한다. 즉, X_t뿐 아니라 d_t도 생산(주문)을 하는 경우에는 각각 향후 k기간 및 l기간만큼의 수요에 정확히 맞출 수 있는 정도로 하는 것이 최적이다. 그러나, 얼마나 자주 폐기물을 구매하는 것이 좋은 지는 아직 규명이 안되었는데, 다음 성질에서는 이를 규명한다.

성질 6. 두 개의 연속적인 재생점 u, v + 1 동안의 폐기물 구매는 다음과 같이 많아야 두 번의 구매행위를 한다.

(1) 전혀 구매를 안하는 경우 : $d_t=0$, $Y_t=Y_{u-1}-X_u$, t = u, u + 1, ⋯ , v

(2) 한번의 구매를 하는 경우 : $Y_{u-1}=0$ 이라면, $d_u=\frac{\sum_{j=u}^{l} D_j}{\alpha}$, v ≤ l ≤T, $d_t=0$, t = u + 1, u + 2, ⋯ , v, 와 같이 구매하고, $Y_{u-1}>0$ 이라면, u와 v 사이의 한 시점 m에서만 $d_m=\frac{\sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}$이고, 나머지는 모두 $d_t=0$, u ≤t ≤v, t ≠m와 같은 구매를 한다. 여기서 l은 v+1 ≤ l ≤T이다.

(3) 두 번의 구매를 하는 경우 : 첫 번째 구매는 $d_u = \frac{\sum_{j=u}^{v} D_j}{\alpha}$ 이고, 두 번째 구매는 $d_m = \frac{\sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}$ 이고, $d_t = 0$, u+1 ≤t ≤v, t ≠m, t ≤ l ≤T와 같이 수행한다.

(증명) u가 재생점이므로 $D_u > 0$ 라면, 성질 5에 의해 $X_u > 0$이고 $Y_{u-1} \cdot d_u = 0$이다.

$Y_{u-1} > 0$인 경우를 먼저 고려하자. 만약에 시점 u~v 동안에 두 번 이상의 폐기물 구입을 한다고 하면, 성질 5에 의해 꼭지점 해가 될 수 없다. 그리고, 정확히 한번의 구매가 이루어지기 위해서는 $Y_{u-1} = X_u$이어야 하고 시점 u+1~v 사이의 임의의 시점에서 한번의 구매처리가 가능하다. 여기서, u와 v+1을 연속적인 두 개의 재생점이라 가정하였으므로, 시점 u+1~v 사이에서 구매한 폐기물은 u~v 사이의 재생품 수요를 위한 것으로 사용할 수 없고, v+1시점 이후의 재생품 수요를 만족시키기 위해 사용해야 한다. 그러나, $Y_{u-1} \neq X_u$ 인 경우는 성질 5를 만족시키기 위해 u~v 기간동안 전혀 구매를 하지 않아야 한다.

시점 u에 구매를 하는 $d_u > 0$ 경우에 대해서도 비슷하게 보일 수 있다. 먼저, $d_u = X_u$이라면, u+1~v 시점에서는 많아야 한번의 폐기물 구입을 할 수 있는데, 이 때 구입하는 폐기물은 v+1 시점 이후의 재생품 수요를 위해 사용해야 한다. $d_u \neq X_u$인 경우는, u 시점에 구입한 폐기물 중 일부가 재고로 남겨 있으므로 성질 5를 만족하는 형태를 위해서는 u~v 동안 구매를 전혀 하지 말아야 한다.

위의 성질은 두 개의 인접한 재생점 구간에서의 폐기물 구매의 횟수, 시기 및 구매량을 결정하기 위한 것인데, 실제로 언제 몇 번의 구매가 이루어지는 것이 최적인 지는 관련 비용함수 및 주어진 재생품 수요량 $\{D_t\}$에 따라 결정될 것이다.

성질 7. 어떤 구매량 α에 대해 $P_t(\alpha) \geq P_{t+1}(\alpha)$, $\forall \alpha \geq 0$, $1 \leq t \leq T$라면, 최적 폐기물 구매계획 및 재생 계획은 $d_t^* = X_t^*$, $\forall t$, $1 \leq t \leq T$이다.

(증명) 두 개의 연속적인 재생점 u, v+1에 대해 구간 u+1~v 사이의 시점 m에서 두 번째로 폐기물을 구입하는 것은 시점 v+1에서 구입하는 것보다 $P_m(d_m) - P_{v+1}(d_m) + \sum_{t=m}^{v} h_t(Y_t)$ 만큼의 비용이 더 소요된다. 따라서, 가정에 의해 $P_m(d_m) \geq P_{v+1}(d_m)$이므로, u+1 ~ v 사이에서의 두 번째 구입보다는 재생점 v+1에서의 구입을 하여, u~v 사이에서는 많아야 한 번의 폐기물 구매를 하는 것이 좋다.

시점 u 초의 폐기물 재고량이 $Y_{u-1} = 0$인 경우, 폐기물을 $d_u = \frac{\sum_{j=u}^{v} D_j + \sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}$ 양 만큼 일시에 구매하는 것은 시점 u에 $\frac{\sum_{j=u}^{v} D_j}{\alpha}$ 양 만큼 구매를 하고, 시점 v+1에 $\frac{\sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}$ 만큼 구매하는 것 보다 $P_u(\frac{\sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}) - P_{v+1}(\frac{\sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}) + \sum_{t=m}^{v} h_t(Y_t) >$ 0 만큼 비용이 더 소요되므로, 두 개의 연속적인 재생점 u, v+1에 대해 시점 u에서 v까지의 제품 수요량을 만족시킬 수 있는 양인 $d_u = \frac{\sum_{j=u}^{v} D_j}{\alpha}$ 만큼의 폐기물을 구매하여 $Y_{v+1} = 0$이되도록 하는 것이 좋다. 그리고, t=1에서는 $Y_0 = 0$이므로, $D_1 > 0$을 만족시키기 위해서는 $d_1 > 0$이어야 한다. 따라서, 모든 시점 t에서 $d_t = X_t$인 것이 최적이다.

최적해를 찾기 위한 동적계획법을 개발하기 위해 다음을 정의한다.

$d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v)$: 두 개의 재생점 u, v+1에 대해, u 기간 초의 폐기물 재고 수준이 Y_{u-1}이고 v 시점 말의 폐기물 재고량이 Y_v일 때, u~v 간의 수요량을 만족시키기 위한 최적 재생계획안의 비용

으로, 다음과 같이 계산할 수 있다

$$d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v) = R_u(X_u) + S_u(1) + M_u((1-\alpha)X_u) + \sum_{t=u}^{v} H_t(I_t) + \sum_{t=u}^{v} P_t(d_t) + \sum_{t=u}^{v} h_t(Y_t)$$

여기서, $X_u = \frac{\sum_{t=u}^{v} D_t}{\alpha}$, u ≤ v ≤ arg $\underset{u \le v \le T}{Max}$ $\{\frac{\sum_{j=1}^{v} D_j}{\alpha} \le \sum_{j=1}^{u} d_j\}$이다. d_u 값은 $Y_{u-1} > 0$인 경우에는 0의 값을 가지지만, $Y_{u-1} = 0$인 경우에는 $d_u = \frac{\sum_{j=u}^{l} D_j}{\alpha}$, v ≤ l ≤T 만큼을 구매할 수 있다. 그리고, u+1~v 사이에서 두 번째의 구매를 하는 경우에는 시점 u에서 $d_u = \frac{\sum_{j=u}^{v} D_j}{\alpha}$ 만큼 구매를 하고, 두 번째 구매는 시점 m에서 $d_m = \frac{\sum_{j=v+1}^{l} D_j}{\alpha}$ 만큼의 구매를 할 수 있다, 여기서, u+1 ≤ m ≤v 이고 l은 v+1 ≤ l ≤ T이다. 또한, u~v 기간 동안의 시점 t에서의 재고량은 재생제품 재고가 $I_t = \alpha X_u - \sum_{j=u}^{t} D_j$이고 원재료 재고는 $Y_t = Y_{u-1} - X_u + \sum_{j=u}^{t} d_j$ 이다. 여기서, $Y_{u-1} = \sum_{j=1}^{u-1} d_j - \sum_{j=1}^{u-1} X_j = \sum_{j=1}^{u-1} d_j - \frac{\sum_{j=1}^{u-1} D_j}{\alpha}$ 이므로, Y_{u-1}은 시점 u 이전의 폐기물 구매 계획 $\{d_t\}$에 따라 결정된다. 이러한 부 문제(sub-problem)를 이용하여 다음과 같이 최적 재생계획 수립을 위한 동적계획법을 구성할 수 있다.

$f_t(Y_t)$: 처음 t기간까지의 최소 비용으로, t 시점 말의 폐기물 재고수준이 Y_t

$f_0(0) = 0$

$$f_v(Y_v) = \underset{1 \le u \le v}{Min} \{ f_{u-1}(Y_{u-1}) + d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v)\},$$

여기서 v는 u ≤ v ≤ arg Max $\{\frac{\sum_{j=1}^{v} D_j}{\alpha} \le \sum_{j=1}^{u} d_j\}$이고, $f_v(Y_v)$의 Y_v는 $f_v(Y_v)$를 형성하는 $d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v)$의 Y_v값이다.

계산 예를 위해 앞에서 고려한 문제를 다시 고려하자. 그러나, 여기에서는 폐기물 수거량 $\{d_t\}$가 주어진 값이 아니라 결정해야 하는 변수인 경우를 다룬다. 즉, 각 기간 별로 주어진 재생품 수요량 $(D_1, D_2, D_3, D_4) = (2, 3, 1, 4)$을 최소 비용을 만족시키기 위한 재생 계획 $\{X_t\}$ 및 폐기물 구매계획 $\{d_t\}$를 결정하는 문제를 고려하자. 관련 비용 함수는 앞에서 고려한 것과 동일한 함수를 고려하는데, 다음과 같은 폐기물 구매 비용함수를 추가로 가정한다.

$$P_t(d_t) = 5d_t 0.9^{t-1}$$

먼저 각 부 문제를 풀어 $d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v)$ 값을 구해야 한다. 여기서, $d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v) = R_u(X_u) + S_u(1) + M_u((1-\alpha)X_u) + \sum_{t=u}^{v} H_t(I_t) + \sum_{t=u}^{v} P_t(d_t) + \sum_{t=u}^{v} h_t(Y_t)$인데, 고려하고 있는 폐기물 구입 비용 함수가 $P_t(a) \ge P_{t+1}(a)$, $\forall a \ge 0$, $1 \le t \le T$이므로, 성질 7을 적용하여 최적해를 구할 수 있지만, 여기에서는 두 인접 재생점 사이에서는 시점 u에서만 폐기물 구입을 하는 것이 좋다는 성질만 이용하여 $d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v) = R_u(X_u) + S_u(1) + M_u((1-\alpha)X_u) + \sum_{t=u}^{v} H_t(I_t) + P_u(d_u) + \sum_{t=u}^{v} h_t(Y_t)$로 각 부 문제를 계산하고 최적해를 찾는 과정을 보이기로 한다. 여기서, 재생점 u에서의 재생량은 $X_u = \frac{\sum_{t=u}^{v} D_t}{\alpha}$, u ≤v ≤ arg $\underset{u \le v \le T}{Max}$ $\{\frac{\sum_{j=1}^{v} D_j}{\alpha} \le \sum_{j=1}^{u} d_j\}$이고, u~v 기간 동안의 시점 t에서의 재고수준은 $I_t = \frac{X_u}{\alpha} - \sum_{j=u}^{t} D_j$이다. 그리고, 시점 u에

서의 폐기물 구입량은 0이거나 $d_u = \frac{\sum_{j=u}^{l} D_j}{\alpha}$, $v \le l \le T$이다.

예를 들면, $d_{11}(0,\ Y_1)$을 위해서는 재생점 1에서의 처리량 X_1은 $X_1 = \frac{D_1}{\alpha} = \frac{2}{0.8} = 2.5$이 되고, 폐기물 구입량은 $d_1 = \{ \frac{D_1}{\alpha}, \frac{D_1+D_2}{\alpha}, \frac{D_1+D_2+D_3}{\alpha}, \frac{D_1+D_2+D_3+D_4}{\alpha} \} = \{2.5,\ 6.25,\ 7.5,\ 12.5\}$의 4가지 방안이 존재한다. 이와 같은 폐기물 구입량에 따른 재고 수준은 $\{ Y_1 \} = \{ \frac{D_1}{\alpha} - X_1, \frac{D_1+D_2}{\alpha} - X_1, \frac{D_1+D_2+D_3}{\alpha} - X_1, \frac{D_1+D_2+D_3+D_4}{\alpha} - X_1 \} = \{0,\ 3.75,\ 5,\ 10\}$이 된다. 따라서, $d_1 = \frac{D_1}{\alpha} = 2.5$일 때, $Y_1=0$이 되므로, $d_{11}(0,\ 0) = R_1(2.5) + S_1(1) + M_1(0.2(2.5)) + \sum_{t=1}^{1} H_t(I_t) + P_1(d_1) + \sum_{t=1}^{1} h_t(Y_t) = 30 + 10(2.5) + 20 + 0.2(5)(2.5) + 5(0) + 3(5.5) = 74$이다. 마찬가지로, $d_{23}(10,\ 5)$를 위해서는 $X_2 = \frac{D_2+D_3}{\alpha} = 5$이므로 $I_2 = \alpha X_2 - D_2 = 1$이다. 그리고, $Y_1 = 10$이므로 $Y_2 = Y_3 = Y_1 - X_2 = 5$이다. 따라서, $d_{23}(10,\ 5) = R_2(5) + S_2(1) + M_2(0.2X_2) + \sum_{t=2}^{3} H_t(I_t) + \sum_{t=2}^{3} h_t(Y_t) = 124.65$이다. 이러한 부 문제를 푸는 과정에는 <표 2>에는 표시하지 않았지만 실행가능해 조건을 만족하기 위해 일부의 부 문제의 해는 존재하지 않는다. 예를 들면, $d_{12}(0,\ Y_2)$에서 $d_1 = \frac{D_1}{\alpha} = 2.5$이라면, $Y_2 = d_1 - X_1 = 2.5 - 6.25 = -3.75 < 0$이 되어, $d_{12}(0,\ Y_2)$를 위한 $d_1 = \frac{D_1}{\alpha}$은 실행 불가능하다. 이러한 실행 불가능해를 제외한 모든 부 문제에 대한 비용 값 및 관련 변수 값은 <표 2>와 같다. 이를 이용하여 동적계획법을 적용하면 다음과 같이 최적해를 찾을 수 있다.

$$f_0(0) = 0$$

$$f_1(Y_1) = \mathrm{Min}\{ f_0(0) + d_{11}(0,0),\ f_0(0) + d_{11}(0, 3.75),\ f_0(0) + d_{11}(0,5),\ f_0(0) + d_{11}(0, 10)\}$$
$$= \mathrm{Min}\{0 + 90,\ 0 + 120,\ 0 + 130,\ 0 + 170\} = 90$$

으로, $f_1(Y_1)$이 $f_0(0) + d_{11}(0,0)$에서 발생하였으므로, $Y_1 = 0$이고 $f_1(0) = 90$이다.

비슷한 방법으로 계산하면,

$$f_2(0) = \mathrm{Min}\{ f_0(0) + d_{12}(0,0),\ f_0(0) + d_{12}(0, 1.25),\ f_0(0) + d_{12}(0,\ 6.25),\ f_1(0) + d_{22}(0,0),\ f_1(0) + d_{22}(0,\ 1.25),\ f_1(0) + d_{22}(0,\ 6.25)\}$$
$$= \mathrm{Min}\{165,\ 178.375,\ 231.875,\ 90 + 99,\ 90 + 108,\ 90 + 144\} = 165,$$

$$f_3(0) = \mathrm{Min}\{ f_0(0) + d_{13}(0,\ 0),\ f_0(0) + d_{13}(0,\ 5),\ f_1(0) + d_{23}(0,\ 0),\ f_1(0) + d_{23}(0,\ 5),\ f_2(0) + d_{33}(0,\ 0),\ f_2(0) + d_{33}(0,\ 5)\}$$
$$= \mathrm{Min}\{194.5,\ 260.15,\ 90 + 121.5,\ 90 + 169.65,\ 165 + 56.7,\ 165 + 89.1\} = 194.5,$$

$$f_4(0) = \mathrm{Min}\{ f_0(0) + d_{14}(0,\ 0),\ f_1(0) + d_{24}(0,\ 0),\ f_2(0) + d_{34}(0,\ 0),\ f_3(0) + d_{44}(0,\ 0)\}$$
$$= \mathrm{Min}\{0 + 328.7,\ 90 + 219.6,\ 165 + 137.7,\ 194.5 + 94.77\} = 289.27$$

으로 계산된다.

T = 4에서의 해인 $f_4(0)$가 $f_3(0)$에서 발생하였고, $f_3(0)$는 $f_0(0)$에서 발생하였으므로, 최적 폐기물 구매 계획은 $(d_1^*,\ d_2^*,\ d_3^*,\ d_4^*) = (7.5, 0, 0, 5)$이고, 최적 재생 계획안은 $(X_1^*,\ X_2^*,\ X_3^*,\ X_4^*) = (7.5, 0, 0, 5)$로써 총 비용이 289.27이 된다.

이 계산 예에서 보는 바와 같이, $P_t(a) \ge P_{t+1}(a),\ \forall a \ge 0,\ \sim 1 \le t \le T$인 경우에는 $d_t^* = X_t^*,\ \forall t$이다. 따라서, 성질 7을 이용한다면 <표 2>의 '*' 표시된 19개의 부 문제는 최적해를 구성할 수 없으므로 고려대상에서 제외해도 전혀 문제가 없다. 그리고, $d_t^* = X_t^*, \forall t$이므로, 연속된 두 재생점 u, v+1에 대해 $Y_{u-1} = Y_v = 0$이기 때문에 동적계획법을 위해 필요한 $d_{uv}(Y_{u-1}, Y_u)$ 및 $f_v(Y_v)$의

〈표 2〉 $d_{uv}(Y_{u-1}, Y_v)$ 계산 값

d_{uv} (Y_{u-1}, Y_v)	d_{uv} (Y_{u-1}, Y_v) 값	기간 u~v에서 양의 변수
$d_{11}(0, 0)$	90	$X_1=2.5,\ d_1=2.5$
$d_{11}(0, 3.75)^*$	120	$X_1=2.5,\ d_1=6.25,$ $Y_1=3.75$
$d_{11}(0, 5)^*$	130	$X_1=2.5,\ d_1=7.5,\ Y_1=5$
$d_{11}(0, 10)^*$	170	$X_1=2.5,\ d_1=12.5,\ Y_1=10$
$d_{12}(0, 0)$	165	$X_1=6.25,\ I_1=3,\ d_1=6.25$
$d_{12}(0, 1.25)^*$	179.375	$X_1=6.25,\ I_1=3,\ d_1=7.5,$ $Y_1=1.25,\ Y_2=1.25$
$d_{12}(0, 6.25)^*$	231.875	$X_1=6.25,\ I_1=3,\ d_1=12.5,$ $Y_1=6.25,\ Y_2=6.25$
$d_{13}(0, 0)$	194.5	$X_1=7.5,\ I_1=4,\ d_1=7.5$
$d_{13}(0, 5)^*$	260.15	$X_1=7.5,\ I_1=4,\ d_1=12.5,$ $Y_1=5,\ Y_2=5,\ Y_3=5$
$d_{14}(0, 0)$	328.7	$X_1=12.5,\ I_1=8,\ I_2=4,$ $d_1=12.5$
$d_{22}(0, 0)$	99	$X_2=3.75,\ d_2=3.75$
$d_{22}(0, 1.25)^*$	108	$X_2=3.75,\ d_2=5,\ Y_2=1.25$
$d_{22}(0, 6.25)^*$	144	$X_2=3.75,\ d_2=10,$ $Y_2=6.25$
$d_{22}(3.75, 0)^*$	82.125	$X_2=3.75$
$d_{22}(5, 1.25)^*$	85.635	$X_2=3.75,\ Y_2=1.25$
$d_{22}(10, 6.25)^*$	99	$X_2=3.75,\ Y_2=6.25$
$d_{23}(0, 0)$	121.5	$X_2=5,\ I_2=1,\ d_2=5$
$d_{23}(0, 5)^*$	169.65	$X_2=5,\ I_2=1,\ d_2=10,\ Y_2=5,$ $Y_3=5$
$d_{23}(5, 0)^*$	99	$X_2=5,\ I_2=1$
$d_{23}(10, 5)^*$	124.65	$X_2=5,\ I_2=1,\ Y_2=5,\ Y_3=5$
$d_{24}(0, 0)$	219.6	$X_2=10,\ I_2=5,\ I_3=4,\ d_2=10$
$d_{24}(10, 0)^*$	174.6	$X_2=10,\ I_2=5,\ I_3=4$
$d_{33}(0, 0)$	56.7	$X_3=1.25,\ d_3=1.25$
$d_{33}(0, 5)^*$	89.1	$X_3=1.25,\ d_3=6.25,\ Y_3=5$
$d_{33}(1.25, 0)^*$	51.6375	$X_3=1.25$
$d_{33}(6.25, 5)^*$	63.7875	$X_3=1.25,\ Y_3=5$
$d_{34}(0, 0)$	137.7	$X_3=6.25,\ I_3=4,\ d_3=6.25$
$d_{34}(6.25, 0)^*$	112.3875	$X_3=6.25,\ I_3=4$
$d_{44}(0, 0)$	94.77	$X_4=5,\ d_4=5$
$d_{44}(5, 0)^*$	76.545	$X_4=5$

* : 최적해를 구성하지 못하는 부 문제

Y_{u-1}, Y_v 값을 계산하여 유지할 필요가 없으므로, 성질 7의 조건이 만족되는 경우에는 효율적으로 최적해를 구할 수 있다.

4. 결 론

산업 혁명 이래로 많은 공산품이 생산 및 소모됨에 따라 폐기물(쓰레기)의 양도 급증하고 있다. 우리 나라는 폐기물을 관리위한 관련법을 제정하고, 아나바다 운동을 통해 이를 줄이고 재활용하기 위한 방안을 마련하고 있다.

본 논문에서는 폐기물을 재생 처리하여 생산하는 재생품의 수요량을 만족시키기 위한 생산계획 수립 문제를 다룬다. 재생산 준비 및 처리비용, 2차 폐기물 처리비용, 재생품 재고유지 비용, 그리고 폐기물 수거(구입) 비용 등의 관련 총 비용을 최소화하기 위한 방안을 찾기위해 먼저 꼭지점 해가 되기 위한 성질을 규명하였다. 분석 결과, 재생산계획 수립문제의 꼭지점 해는 폐기물(원재료)을 고려하지 않은 기존의 DLSP 모델의 것과 유사한 성질을 갖는 것을 밝혔다. 그러나, 폐기물 양의 제한 때문에 각 기간 별 재생 처리할 수 있는 양에 한계가 있는 형태의 꼭지점 해를 형성함을 규명하였다. 이러한 성질 규명은 폐기물 수거량이 주어진 경우와 수거량도 결정해야하는 경우의 두 가지로 나누어서 다루었는데, 꼭지점 해 중 최적해를 찾기 위해서 동적계획법을 개발하였다. 본 논문의 연구결과는 폐기물 처리를 위한 재생계획 수립 외에도 제품생산을 위한 원재료의 가용량을 고려한 생산 계획 수립 문제 해결을 위해서도 활용될 수 있다.

추후 연구과제로는 2차 폐기물을 즉시 처리하지 않는 경우의 모델을 고려할 수 있는데, 이 문제의 해결을 위해서는 동적계획법 외의 다른 해법도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그리고, 단일 설비가 아닌 여러 개의 설비를 이용하여 재생 처리하는 경우의 문제도 분석이 더 필요한 상태이다.

참 고 문 헌

[1] 정선양, 임채윤, 「환경 친화적 생산개념 : 제품의 재제조 및 재활용」, 과학기술정책연구원, (1999).

[2] 한국자원재생공사 홈페이지, http : //www.ko-reco.or.kr, (2000).

[3] Gungor, A. and S.M., Gupta, "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery : A Survey", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.36, (1999), pp. 811-853.

[4] Krikke, H.R., A. van, Harter, and P.C., Schuur, "Business Case Roteb : Recovery Strategies for Monitors", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.36, (1999), pp.739-757.

[5] Nagel, C. and P., Meyer, "Caught between Ecology and Economy : End-of-Life Aspects of Environmentally Conscious Manufacturing", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.36, (1999), pp.781-792.

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

[7] Wagner, H.M. and T.M., Whitin, "Dynamic Version of the Economic Lot Size Model", *Management Science*, Vol.5, No.1(1958), pp. 89-96.

[8] Zangwill, W.I., "Minimum Concave Cost Flows in Certain Networks", *Management Science*, Vol.14, No.7(1968), pp.429-450.