

## MCDM 모델을 이용한 재활용 제조부품 관리\*

### Management of Recycling-Oriented Manufacturing Components Based on an MCDM Model

신완선\*\* · 오현주\*\*\*

Shin, Wan S.\*\* · Oh, Hyun-Joo\*\*\*

#### Abstract

Recycling of used products and components has been considered as one of promising strategies for resolving environmental problems. In this respect, most manufacturing companies begin to consider possible recycling (e.g., re-use or re-production) of the components contained in their products. The primary objective of this research is to develop a multiple criteria decision making model for systematic management of recycle-oriented manufacturing components. The production planning problem of recycle-oriented manufacturing components is first formulated as a multiobjective mixed 0-1 integer programming model with three conflicting objectives. An interactive multiple criteria decision making method is then developed for solving the mathematical model. Also, an Input/Output analysis software is developed to help practitioners apply the model to real problems without much knowledge on computers and mathematical programming. A numerical example is used in examining the validity of the proposed model and to investigate the impact of the input variables on recycling production strategy.

#### 1. 서론

90년대 들어서면서 환경문제와 관련한 경영과학 연구들이 많이 이루어지고 있다. 환

경문제를 해결함에 있어서 자원의 재활용이 필요하다는 인식들이 최근 대두되고 있으며 제조업체들도 이미 사용되었던 자원들을 재활용해야만 되는 상황에 직면하고 있지만, 이

\* 본 연구는 '94학술연구조성비(과제번호: 04-E-0297)에 의해서 지원받았음.

\*\* 성균관대학교 산업공학과

\*\*\* 삼성 데이터시스템

들 연구들은 대부분 공해를 유발할 수 있는 시설들의 위치 설정문제나 공공부문의 자원 재배치문제, 그리고 공공폐기물의 처리와 관련한 연구들이 대부분이다(Leschine et al.[3], Shin[6], Stam et al.[7], Vuk et al.[9]). 최근, Hoshino et al.[2]는 재활용 정책을 실시하는 생산시스템에 나타날 수 있는 여러 가지 문제들을 지적하고 제품생산에 필요한 부품들을 재사용 및 재가공하는 것에 주안점을 두어 제품수명주기에 있어서의 기본적인 부품의 흐름에 대해 연구하였다. 이 연구에서는 총 이익과 총 재활용률을 극대화하는 것을 목적으로 하는 목표계획법을 이용하여 효율적인 재활용 정책을 위한 두 목적식간의 절충(tradeoff) 관계를 분석하였다. 이 연구에서는 유효해의 집합을 의사결정자에게 제시하여 두 목적식 간의 절충 관계를 의사결정자에게 제공하는데, 실제 응용문제는 방대할 것이므로 얻어진 유효해의 수가 의사결정자가 효과적으로 분석하기에 지나치게 많을 수 있어서 직접 응용하기에는 한계가 있다. 이들이 제시한 모델이 현실적으로 응용되기 위해서는 모델이 좀더 구체적으로 표시되어 다양한 상황을 반영할 수 있어야 하고 의사결정자가 입·출력 분석을 통해서 적극 문제해결 과정에 관여할 수 있도록 지원되어야 한다. 또한 유효해 선정 과정에서 의사결정자의 부담을 줄일 수 있는 MCDM(Multiple Criteria Decision Making) 방법의 적용도 필요하다.

본 연구의 목적은 대화형 MCDM기법을 이용하여 일반적인 생산시스템에서 단위 생산주기에 필요한 재활용부품의 생산, 관리를 다목적식의 생산전략에 맞추어 결정하는 의사결정 모형을 개발하고 분석하고자 한다. 본

논문에서는, 우선 재활용부품의 전략적인 관리를 위해 의사결정에 필요한 생산전략 요소로서 총비용의 최소화(총 이익의 극대화)와 동시에, 부품의 재활용률을 극대화하면서 어떠한 특정부품의 재활용비율이 설정된 기준치를 달성하도록 하고자 하는 세 가지 목적식으로 이루어지는 다목적식 수리모형을 개발한다. 그리고 의사결정자가 선호도를 근거로 연속적인 쌍대 비교를 통해 최적절충해를 찾아나가는 연속쌍대비교법(Successive Paired Comparison Method: SPCM)을 적용하여 최적절충해를 찾는 방법을 제시하고, 실제 의사결정자가 수리모델과 MCDM기법에 대한 이해가 없더라도 입력 및 결과 분석을 용이하게 할 수 있도록 입력/출력 분석 소프트웨어를 개발한다. 또한, 수치분석을 통해서 수리모델과 연속쌍대비교법(SPCM)의 타당성을 분석하고 선호도 및 비용요소들이 모델에 미치는 영향도 조사한다.

## 2. 재활용 정책 문제

일반 생산시스템에서의 재활용부품의 생산이란, 제품을 생산함에 있어 필요한 부품의 수량을 조달하는 방법으로 이미 사용된 부품을 다시 가공하여 사용하는 것을 의미한다. 효율적인 자원 재활용 문제는 대부분의 산업 및 현장문제와 마찬가지로 여러 가지 복합적인 요소에 의해 결정될 수 있기 때문에 다목적식이나 다기준 문제로 다루어질 수 있다. 여기서 생산자 측면에서의 주요 관심은 어느 정도의 노력을 재사용부품이나 재가공부품의 회수 및 가공에 기울여야 생산 전략적인 관점에서 성공적인 결정인가 하는 것이다.

본 연구에서는 그림 1에 예시된 생산시스템을 바탕으로  $N$ 개의 부품을 필요로 하고  $T$  생산주기 동안 필요한 부품들을 조달 및 관리하는 방법을 계획할 수 있는 수리모델을 개발하였다. 그림 1에서 나타냈듯이 이 재활용생산 시스템에서는 제품을 생산하는 데 있어 부품의 구입이나 자체가공 외에도 재사용 및 재가공이 가능한 부품을 재활용하여 생산에 투입하는 것을 목적으로 한다. 이 시스템에서는 각 단위 생산기간 별로 제품생산에 필요한 부품들을 다음 3가지 방법으로 조달한다. ① 부품을 새로 가공, ② 재사용부품의 회수 및 사용, ③ 재가공부품의 회수 및 재가공. 이 때의 재사용 부품은 형태의 변조없이 부품으로 다시 사용이 가능한 것을 의미하고 재가공 부품은 원자재로 이용하여 다시 가공할 수 있는 것을 의미한다. 물론 이 과정에서 자체 생산할 것인지 아니면 완전 구입할 것인가에 대한 문제도 고려할 수 있겠지만, 일단 본 연구에서는 부품을 자체 생산하는 생산 시스템을 가정한다(Hitomi[1]).

일단 위에서 언급한 3가지 부품조달 경로를 가정하고, 각 생산주기에 필요한 부품의 수량을 어떠한 조합에 의해서 조달할 것인가를 정하는 재활용 정책을 결정할 수 있는 수리모델을 설정한다. 모델을 설정함에 있어서 고려된 사항들은 다음과 같다.

(1) 재활용부품 조달의 재고 고려: 재활용 제품을 회수해서 분리시켜도 즉시 사용하지 않고 저장하였다가 추후 생산주기에서 사용 가능하게 한다.

(2) 재활용부품의 회수비율 고려: 이 회수비율은 회수비용과 생산주기의 함수로 비선형 함수 형태의 관계를 가지고 있을 것으로

보이지만, 이 문제에서는 선형 함수 형태의 비율을 갖는 것으로 한다.

(3) 재활용 제품의 회수 누적성: 같은 생산 주기에 모든 재활용 제품을 회수할 수는 없으므로 현 생산 주기에서 일정기간 전까지 소급해서 회수가 가능한 것을 전제로 한다.

(4) 회사의 생산전략은 몇 가지 기준에 근거하지만, 그 정도를 수리적으로 표시하는 것은 가능하지 않은 경우를 전제로 한다.

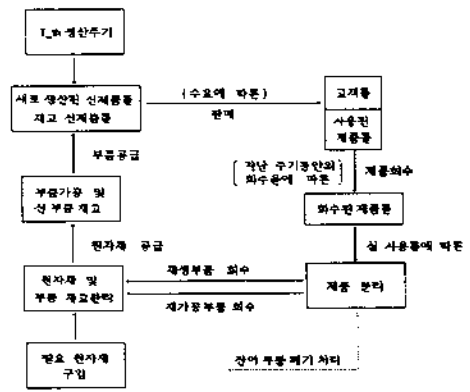


그림 1. 재활용부품 생산 시스템

의사결정자가 문제해결에 사용할 생산전략 요소로는 다음의 세 가지를 고려할 수 있다:

- ① 생산 비용의 최소화, ② 재활용부품 비율의 극대화, ③ 특정 부품의 재사용 및 재가공 비율의 기준치 달성화. 여기서 재활용률의 극대화는 생산이익 목적식에서 어느 정도 고려될 수 있으나, 환경보호의 측면에서 보면 궁극적인 목적은 완전 재사용 및 재가공인 만큼 목적식으로 이용한다. 이 목적식은 물론 다른 목적식과의 절충에 의해서 그 달성 정도가 결정될 것이다. 마지막 목적식은 특정 부품들의 재사용 및 재가공률을 목표치에 도달시키는 것인데, 이것을 조건식으로 하

지 않는 이유는 아직 재사용 및 재가공이 대부분의 경우에 있어서 강제성을 띠지 않기 때문이다.

### 3. 수리모델 개발

본 연구에서는 기초 모델을 설정함에 있어서 다음을 가정한다.

(1) 회사는  $N$ 개의 부품이 필요한 한 가지 제품을 생산한다.

(2) 회사가 재활용 제품을 회수할 수 있는 비율은 일정하며 회수비용은 상수로 주어진다.

(3) 재활용제품이 부품으로 분해되면 각 부품은 재사용부품, 재가공부품, 소모성 부품 중 하나에 속한다. 이때 3가지 형태로 분리되는 비율은 주기와 무관하다.

(4) 부품 관련 비용은 상수로 주어진다.

(5) 생산과 제품회수에 관련된 변동 및 고정비는 상수로 주어진다.

(6) 생산 계획기간은  $T$ 로 주어지고 수요는 각 생산 기간별로 주어진다.

(7) 재사용 및 재가공되어 다시 제품으로 조립된 부품의 수명은 새로운 부품의 수명과 동일한 것으로 간주한다. (즉, 빈병같이 마모성이 거의없는 부품이 재사용된다는 것을 의미함)

본 문제에 관련된 모든 요소를 신중히 고려하면 다음과 같은 혼합 0-1 정수계획법이 제약식으로 모형화될 수 있다:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{t=1}^T \{C_1 x_t + H_1 I_t + \sum_{n=1}^N \{C_{2,n} y_{1,n,t} + C_{3,n} y_{2,n,t} + C_{4,n} y_{3,n,t} \\ & + H_{2,n} S_{n,t} + H_{3,n} s_{2,n,t} + H_{4,n} s_{3,n,t} + B_n g_m + P_n v_{n,t}\} \end{aligned}$$

$$+ QU_t + RW_t + \sum_{n=1}^N \{SU_{1,n} z_{1,n} + SU_{2,n} z_{2,n}\}$$

$$\text{Max} \quad \sum_{n=1}^N \omega_n \gamma_n, \quad n \in S$$

$$\text{Min} \quad \sum_{n=1}^N \omega'_n (d_n^+ + d_n^-), \quad n \in S'$$

Subject to:

$$I_t + x_t - D_t - I_{t+1} + 1 = 0 \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

$$0 \leq x_t \leq u_t \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

$$0 \leq I_t \leq u'_t \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (3)$$

$$W_t = \sum_{i=\text{Max}\{t-2,0\}}^{t-1} \beta P_i \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (4)$$

$$U_t + W_t - v_t - U_{t+1} = 0 \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (5)$$

$$v_{nt} \leq v_t \quad (t = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (6)$$

$$\alpha_{n1} + \alpha_{n2} + \alpha_{n3} \leq 1 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} y_{nt} &= y_{1,nt} + y_{2,nt} + y_{3,nt} \\ &(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} s_{nt} + y_{nt} - x_t - s_{n,t+1} &= 0 \\ &(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} r_{1,nt} &\leq \delta_{1,n} (\alpha_{n1} v_{n,t}) \\ &(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} s_{2,nt} - y_{2,nt} + r_{1,nt} &= s_{2,n,t+1} \\ &(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \end{aligned} \quad (11)$$

$$r_{2,nt} \leq \delta_{2,n}(\alpha_{n2}v_{nt-1})$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (12)$$

$$s_{3,nt} - y_{3,nt} + r_{2,nt} = s_{3,nt+1}$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (13)$$

$$g_{nt} - \alpha_{n3}v_{nt} - (1 - \delta_{1,n})\alpha_{n1}v_{nt-t} - (1 - \delta_{2,n})\alpha_{n2}v_{nt-t} = 0$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (14)$$

$$r_{1,nt} \leq \left(\sum_{i=1}^T D_i - I_1 + I_{T+1}\right)z_{1,n}$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (15)$$

$$r_{2,nt} \leq \left(\sum_{i=1}^T D_i - I_1 + I_{T+1}\right)z_{2,n}$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (16)$$

$$z_{1,n} = 0, 1 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

$$z_{2,n} = 0, 1 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T (y_{2,nt} + y_{3,nt}) - \gamma_n \left(\sum_{t=1}^T D_t - I_1 + I_{T+1}\right) = 0$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (19)$$

$$0 \leq \gamma_n \leq 1 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^T (y_{2,nt} + y_{3,nt}) - Tr_n \left(\sum_{t=1}^T D_t - I_1 + I_{T+1}\right) + d_n^* - d_n^* = 0$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (21)$$

$$x_t, I_t, y_{nt}, y_{1,nt}, y_{2,nt}, y_{3,nt}, U_t, v_t, v_m, s_{nt},$$

$$r_{1,nt}, s_{2,nt}, r_{2,nt}, s_{3,nt}, g_{nt}, d_n, d_n^* \geq 0,$$

$$(n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T)$$

우선 먼저 제약식을 살펴보면 다음과 같이

요약할 수 있다.

생산 주기  $t$ 에 조립되는 제품수는  $x_t$ ( $t=1,2,\dots,T$ )이고, 조립된 제품의 재고는  $I_t$ 이다. 그리고  $t$ 생산주기의 수요량은  $D_t$ 로서 상수로 주어진다. 이때 생산 및 재고와 관련된 제약식은 식 (1), (2), (3)과 같이 표현될 수 있다. 이 때  $u_t$ 는  $t$ 생산 주기의 제품 생산 능력을 나타내며,  $w_t$ 는  $t$ 생산 주기의 재고 수준을 의미한다. 각 생산 주기별로 제품을 회수하는 비율은 상수  $\beta$ ( $0 \leq \beta, \leq 1$ )이고 상수로 주어지며 이 비율에 따라 회수되는 제품량은  $W$ 로서 부품의 수명  $z$ 을 고려하면 식 (4)로 표현된다.

회수된 제품 중에서 재활용할 목적으로 분리되는 제품량은 생산 주기마다  $v_t$ 이며 제품 1단위에는 부품의 각각 하나씩 들어있으므로 각 부품에 대해 분리되는 양은  $v_m$ 이라 할 수 있다. 이때 각 형태로 분리되는 부품의 수는 분리대상이 되는 제품의 수보다 작거나 같아야 한다. 이 때 회수제품의 재고를  $U_t$ 라 하면 이와 관련된 제약식은 식 (5)와 (6)과 같다.  $y_n$ 는  $t$ 생산주기의 부품 종류  $n$ 의 생산량으로 신생산 부품량  $y_{1,nt}$ , 재사용 부품량  $y_{2,nt}$ , 재가공 부품량  $y_{3,nt}$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 생산된 부품 전체의 재고는  $s_{nt}$ 이며 재사용될 부품의 재고는  $s_{2,nt}$ , 재가공될 부품의 재고는  $s_{3,nt}$ 이다. 회수된 제품을 분리했을 때 각 부품형태의 부품이 재사용, 재가공 및 폐기될 비율은  $\alpha_{n1}, \alpha_{n2}, \alpha_{n3}$ 로 주어진다. 각 부품생산형태에 따른 부품의 생산 및 재고와 관련된 제약식은 (7)서부터 (13)과 같다. 이때  $\delta_{1,n}$ 은 재사용성공률을,  $\delta_{2,n}$ 은 재가공성공률이다.  $r_{1,nt}$ 와  $r_{2,nt}$ 는 재사용성공률과 재가공성공률을 나타낸다. 재사용 및 재가공성공률은

분리된 부품이 재사용 또는 재가공되는 과정에서 완전한 부품으로 생산될 수 있는 확률을 나타낸다.

$i$ 생산 주기의 부품종류  $n$ 의 폐기량  $g_n$ 는 폐기비율과 재사용 및 재가공 과정에서 재활용에 실패한 양을 포함하여 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 재활용부품의 생산여부를 결정하기 위한 결정변수는 0-1변수여야 한다(식 (15), (16), (17)과 (18)).

전체 생산주기  $T$  동안의 부품종류  $n$ 의 재활용률  $\gamma_n (0 \leq \gamma_n \leq 1)$ 는 전체 생산주기 동안의 총 부품생산량에 대한 재사용 및 재가공 생산량의 비율이다. 이때, 전체 생산주기  $T$  동안의 총 부품생산량은 수요에 따른 판매량에 재고를 고려한 양과 같다고 볼 수 있는데,  $I$ ,  $I_{T+1}$ 는 각각 초기재고 및 최종재고를 나타낸다. 그러므로 재활용률을 극대화하기 위해서는 제약식 (19)를 만족해야 한다. 또한, 특정부품의 재활용목표치를 달성하기 위해 달성하고자 하는 목표치를  $Tr_n$ 라 하면 다음의 제약식 (21)을 만족해야 한다. 마지막으로, 제약식에 이용되는 모든 변수들은 비음수 조건을 만족해야 한다.

재활용 부품을 생산하는 시스템에서의 주요 목적은 우선 재활용률을 가능한 한 높이는 것이라 할 수 있다. 그러나 생산활동을 하는 시스템의 입장에서는 이윤추구가 또한 중요한 목적이 되기 때문에 재활용 정책이 지나치게 큰 비용을 초래한다면 재활용률만을 높인다는 것은 의미가 없다. 그렇기 때문에 비용 및 재활용률을 동시에 고려할 수 있어야 한다. 그리고 재활용 정책을 수행함에 있어 단순히 비용문제만을 함께 고려하여 재활용부품을 생산하는 것뿐만 아니라 특정부품

에 있어서는 다소 많은 비용을 초래한다고 해도 일정 기준치를 꼭 달성해야만 하는 부품이 있을 수 있다. 그래서 이 세 가지 목적을 다음과 같이 세 개의 목적식으로 나타내었다.

첫번째 목적식은 부품생산 및 제품조립비용을 최소화하기 위한 목적식으로써 각 단위비용은 다음과 같이 상수로 주어진다.

- $C_1$  : 제품조립비용
- $H_1$  : 제품재고비용
- $C_{2,n}$  : 원자재를 이용하여 부품을 생산하는 비용( $n=1,2,\dots,N$ )
- $C_{3,n}$  : 재활용부품을 재사용하는 비용( $n=1,2,\dots,N$ )
- $C_{4,n}$  : 재활용부품을 재가공하는 비용( $n=1,2,\dots,N$ )
- $H_{2,n}$  : 부품의 재고비용( $n=1,2,\dots,N$ )
- $H_{3,n}$  : 재사용 부품의 재고비용( $n=1,2,\dots,N$ )
- $H_{4,n}$  : 재가공 부품의 재고비용( $n=1,2,\dots,N$ )
- $R$  : 회수비용
- $Q$  : 회수제품 재고비용
- $B_n$  : 폐기비용 ( $n=1,2,\dots,N$ )
- $P_n$  : 제품분리 비용 ( $n=1,2,\dots,N$ )
- $SU_{1,n}$  : 재사용부품생산 준비비용 ( $n=1,2,\dots,N$ )
- $SU_{2,n}$  : 재가공부품생산 준비비용 ( $n=1,2,\dots,N$ )

두번째 목적식은 재활용률을 극대화하기 위한 목적식으로서 모든 부품종류  $n$ 에 대한

가중치  $\omega_n$ 는 의사결정자가 결정할 수 있다. 세번째 목적식은 특정 부품의 재활용률 기준치를 달성하기 위한 목적식이다.  $\omega'_n$ 는 의사결정자가 선택한 특정 부품에 대한 가중치이다. 이 값은 결정된 특정부품에 대해 1의 값을 갖는다.

즉, 재활용부품의 전략적인 관리를 위해 본 연구에서 개발된 수리모델은 의사결정에 필요한 생산계획 요소로서 생산비용의 최소화, 재활용부품 비율의 극대화, 그리고 특정부품의 재활용 비율의 기준치 달성화라는 세 가지 목적식으로 이루어지는 다목적식 수리모델이 되며, 재활용부품을 생산할 것인지를 결정하기 위한 0-1변수를 갖는 혼합정수계획법이 된다.

#### 4. 연속쌍대비교 방법(SPCM)과 입출력 소프트웨어

다목적식 문제를 다룰 때 가장 간단한 방법은 모든 목적식에 대해 적절한 가중치를 주어 하나의 단일목적식 문제를 푸는 것이다. 그러나 다목적식 문제에서의 최적절충해는 각 목적식에 대한 의사결정자의 선호도에 의존하게 되므로 이러한 방법은 여러 가지 문제점이 있다(Steuer[8]). 그래서 최근 의사결정자의 선호도 함수(모르는 경우가 대부분임)를 컴퓨터와 대화를 통해서 극대화시키는 대화형 MCDM방법이 관심을 끌고 있다.

본 연구에서는 제시된 수리모델을 해결할 수 있는 대화형 MCDM방법을 개발했다. 이 방법은 연속적으로 쌍대비교를 실시하여 최적절충해를 찾아 나가는 연속쌍대비교 방법(Successive Paired Comparison Method: SPCM)

으로서 golden section search를 이용하여 두 번째와 세번째 목적식의 구간을 각각 반복적으로 제거해 나가면서 새롭게 형성되는 두 개의 가능해 영역을 새로운 제약식으로 추가시켜 수리적으로는 단일 목적식 최적화 문제를 풀게 된다. 이때 각 반복마다 golden section search를 통해 얻어지는 두 개의 유효해를 가지고 의사결정자와 대화를 통한 쌍대비교를 반복적으로 실행한다. 이것은 Sadagopan & Ravindran[5]이 개발한 쌍대비교방법을 목적식이 3개인 경우로 일반화시킨 것이다. 이 방법은 목적식 함수가 지나치게 커지면 쌍대비교 횟수가 급격히 증가하여 비효율적이지만 목적식이 3개인 경우까지는 가장 효율적인 방법이 될 수 있다. 본 논문을 간략히 제시하기 위해서 알고리즘에 대한 설명을 생략하며 자세한 것은 Oh[4]를 참고하기 바란다.

생산시스템에서 재활용 문제를 다루는 실제 의사결정자는 SPCM방법에 대해서나 최적화 기법에 대해 그 의미를 잘 모르는 경우가 일반적일 것이다. 그리고 이 모델은 각 반복마다 단일 목적식 최적화 문제를 해결하기 때문에 의사결정자가 해를 얻기 위해서는 데이터의 입력 및 출력에 있어 여러 어려움이 존재할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 의사결정자가 SPCM방법이나 최적화기법에 대한 이해가 없더라도 데이터의 입력 및 출력을 손쉽게 할 수 있으며 또한 분석을 용이하게 할 수 있고 분석결과에 따라 의사결정자가 입력 변수를 다양하게 변경할 수 있도록 부품 재활용 문제를 다루기 위한 입출력 분석 소프트웨어를 개발하였다.

입출력 분석 소프트웨어는 클리퍼(CLIPPER)

를 이용한 그래픽 화면을 통해 총 생산주기 및 총 부품의 수를 비롯하여 그에 따라 필요한 각 결정변수들을 의사결정자가 입력하면 그 모델에 대해 단일목적식 최적화문제를 푸는 LINDO의 실행에 필요한 입력 파일을 자동으로 만들어 준다. 의사결정자는 각 목적식에 대해 단일 목적식 최적화뿐만 아니라

단순가중치 방법이나 SPCM방법을 선택할 수 있고 각각 그에 다른 결과를 볼 수 있다. 이때 LINDO의 실행과 의사결정자와의 대화를 위한 알고리즘은 C프로그래밍 언어를 이용하여 작성되었다. 각 방법에 의해 얻어진 결과는 다시 의사결정자가 쉽게 분석할 수 있도록 정리되어 각 생산주기 별로 그래픽 화면

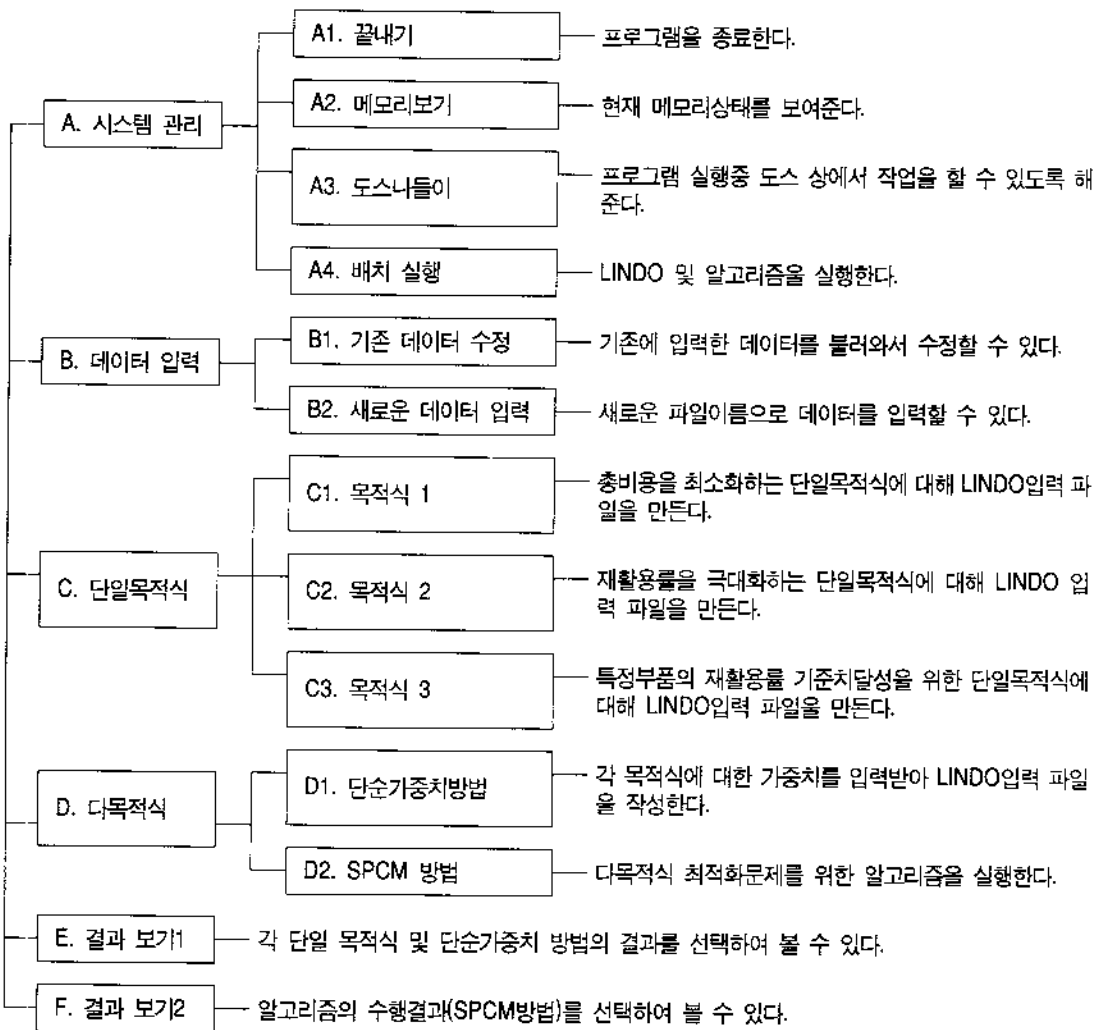


그림 2. 입출력 분석 소프트웨어의 기능



으로 제시되고 프린터 출력도 가능하다. 또한 모든 입력과 출력 결과는 파일로 저장되어 관리되므로 여러 가지 시나리오를 비교 분석하기에도 용이하다.

그림 2는 이 입출력 분석 소프트웨어의 기능들을 소개하고 있다. 이 소프트웨어는 배치파일을 이용하여 알고리즘과 LINDO를 실행할 수 있도록 되어있다. 그림 2에서 배치 실행은 각 단일목적식과 다목적식 최적화 문제를 풀기 위해 의사결정자가 선택한 사항에 따라 그에 필요한 작업을 수행한다. 그렇기 때문에 배치실행을 하기 이전에는 우선 데이터 입력 및 수정에서 파일을 선택한 후 의사결정자가 다루고자 하는 최적화대상을 선택하는 작업이 선행되어야 한다.

## 5. 수치실험을 이용한 모델 타당성 분석

여기에서는 개발된 수리모델의 타당성을 평가하기 위해 수치예제를 설정하여 실험문제에 대한 결과가 기대에 부합되는지를 평가하고, 다목적식 최적화 문제에 대해서 단순가중치 방법과 연속쌍대비교법(SPCM)을 비교 분석한다. 부품 재활용문제는 다목적식을 갖는 수리모델이므로 각각의 목적식에 대해 단순히 단일목적식 최적화문제를 풀어서 최적대안을 찾아낸다는 것은 한계가 있다. 물론 재활용률을 일정수준 이상으로 하고 특정 부품의 목표치를 달성하기 위한 조건을 비용을 최소화하는 목적식에서 제약식으로서 고려할 수도 있으나 합리적인 제약조건을 설정하기가 어렵다. 또한 각각의 목적식을 단순가중치를 주어 단일목적식 최적화문제를 푼다고 하더라도 그 비중에 따른 변화를 민감

하게 반영하기란 쉽지가 않다. 그러므로 하나 이상의 목적식을 고려하여 보다 효율적으로 최적절충해를 찾기 위해서는 다목적식 최적화문제로 다루어야만 한다.

다목적식 문제에서의 최적절충해는 각 목적식에 대한 의사결정자의 선호도에 의존하게 되며 일반적으로 의사결정자의 선호구조는 외형적으로 표시되기 어렵다. 특히, 본 연구에서 이용한 대화형방법에서는 의사결정자가 컴퓨터와 대화하는 형식으로 자신의 선호도를 직접 표시하게 된다. 이때, 실질적인 의사결정자를 이용해서 일관성있는 수치실험을 하는 것이 어려움으로, 여기에서는 실제 의사결정자를 대신할 수 있는 선호함수를 가정하여 의사결정자의 선호도를 반영할 수 있도록 해서 의사결정자의 선호도가 재활용 정책에 미치는 영향을 간접적으로 분석하였다. 이러한 분석방법은 대화형 다목적식 방법의 타당성 분석에 일반적으로 이용되어 왔다. (Shin & Ravindran[8])

우선 세 개의 목적식  $y_1, y_2, y_3$ 을 각각 ‘총비용 최소화’, ‘재활용률 극대화’, 그리고 ‘특정부품의 재활용률 기준치 달성’라고 가정하자. 이때 각 단일 목적식을 풀었을 때 얻어진 최적해를  $y_1^*, y_2^*, y_3^*$ 이라고 하고, 각 목적식 값의 범위  $R_1, R_2, R_3$ 를 이용하여 선호도함수를 다음과 같이 가정한다.

$$U(y) = -\omega_1 \left[ \frac{y_1 - y_1^*}{R_1} \right]^2 - \omega_2 \left[ \frac{y_2 - y_2^*}{R_2} \right]^2 - \omega_3 \left[ \frac{y_3 - y_3^*}{R_3} \right]^2$$

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 는 의사결정자의 선호를 쉽게 반영시키기 위한 가중치이다.

우선 수치예제를 설정하기 위해 총 생산주기를 5주기로 설정하고 생산할 부품의 수를

3개로 가정한다. 그리고 각 부품의 수명은 3 주기로 가정한다. 주기별 제품 수요와 제품 및 부품 생산능력, 제품재고 수준이 부록에 있는 표 1에 제시되어 있으며 표 2는 제품생산과 관련한 비용들을 제시하고 있다. 제품생산에 필요한 부품에는 재활용이 용이한 경우와 그렇지 않은 경우, 그리고 재활용이 용이하지 않으나 목표한 재활용률을 달성해야만 하는 경우가 있을 수 있다. 그렇기 때문에 각 부품과 관련한 비용 및 재활용 비율과 관련해서는 세 가지 부품에 대해 상반될 수 있는 상황을 설정하였다. 우선 부품1인 경우는 재사용 및 재활용 비용보다 원자재 생산비용이 비교적 높은 경우를 고려하였고 부품2는 반대로 재사용 및 재활용 비용이 원자재 생산비용보다 비교적 높고 폐기비용 또한 높은 경우를 고려하였다. 부품2는 세번째 목적식에 해당하는 특정부품의 기준치 달성에 해당하는 경우로서 재활용이 어렵고 그렇기 때문에 준비비용 또한 상당히 높게 설정하였다. 부품3은 재활용 비용과 원자재 생산비용이 비슷한 경우로 설정하였다. 부품별 재사용 비율 및 재가공 비율은 서로 상충되도록 설정하였는데 모델의 분석을 통해 초기설정과 반대의 경우와 각각의 비율이 비슷한 경우를 비교 분석하며, 재사용 비율 및 재가공 비율을 변화시킴으로써 그에 따른 변화를 분석하기로 한다.

각 부품에 따른 생산비용과 부품별 재고비용 및 폐기비용, 그리고 준비비용과 분리비용이 부록에 있는 표 3, 표 4, 표 5에 나타나 있다. 부록의 표 6은 분리된 각 부품이 재활용될 확률과 폐기될 확률이며 표 7은 분리된 부품이 생산에 투입됐을 때 재활용에 성공할

확률이다. 이 수치예제에서는 각 부품에 대한 가중치를 0.33으로 비슷하게 설정하였다. 이 가중치는 보다 중요도를 부가해야 하는 부품에 대해 의사결정자가 결정할 수 있다. 세번째 목적식에서 필요한 입력변수로서 특정부품은 부품2로 설정하고 달성하고자 하는 기준치를 0.15로 설정하였다.

다기준 및 다목적성을 갖는 수리모델인 경우는 각각의 목적들이 서로 상충되기 때문에 각 단일목적식만을 고려해서는 의사결정자가 원하는 대안을 찾을 수가 없다. 이때 각각의 목적식에 단순히 가중치를 이용하여 단일목적식 최적화를 통해서 최적해를 구하는 방법도 대안을 구하는 한 방법이다. 이러한 단순한 방법은 바람직하지 않다고 잘 알려져있지만(Steuer[9]), 이 방법과 앞에서 제시한 SPCM 방법을 비교하여 대화형방법의 상대적인 타당성을 부분적으로나마 조사해 본다. 이 수치실험을 위해서 임의의 의사결정자의 선호도를 네 가지 경우로 가정한다. 즉, 다음과 같은 가중치의 값을 이미 가정한 선호도 함수에 대입해서 의사결정자의 역할을 대신해서 선호도를 나타내도록 한 것이다. 이들 각각의 경우가 재활용 정책의 방향을 나름대로 표시하고 있음을 주의해서 볼 필요가 있다.

i) (목적1: 목적2: 목적3) - (3.3:3.3:3.4)

ii) (목적1: 목적2: 목적3) - (5 : 3 : 2)

iii) (목적1: 목적2: 목적3) - (2 : 5 : 3)

iv) (목적1: 목적2: 목적3) - (3 : 2 : 5)

단순가중치 방법은 (0.33:0.33:0.34), (0.5:0.3:0.2), (0.2:0.5:0.3), (0.3:0.2:0.5)와 같이 가중치를 주고 각 목적식이 동일한 범위를 갖도록 조정된 후 각 목적식에 가중치를 곱해서 합하여 단일목적식을 구성하여 최적화하

는 방법이다.

#### SPCM방법과 단순가중치 방법의 비교

먼저 기본 모델에 대해서 네 가지 형태의 의사결정자의 선호도에 따라 SPCM방법과 단순가중치 방법에 의해 얻어진 해를 비교한다. 다음 표 8은 네 가지 형태의 선호도에 따라 총 비용과 총 재활용률, 그리고 특정부품(부품2)의 재활용률 기준치(15%) 달성에 있어서 재활용부품 생산량의 미달성량을 나타내고 있다.

표 8. SPCM방법과 단순가중치 방법에 의한 결과 비교

선호도	기준	SPCM방법	단순가중치 방법
(3.3:3.3:3.4)	총 비용	85753	86065
	총 재활용률	0.18	0.18
	부품2의 기준치 미달성량	-24	-14
(5 : 3 : 2)	총 비용	85211	86065
	총 재활용률	0.16	0.18
	부품2의 기준치 미달성량	-34	-14
(2 : 5 : 3)	총 비용	87902	87948
	총 재활용률	0.19	0.19
	부품2의 기준치 미달성량	-1	0
(3 : 2 : 5)	총 비용	85794	87948
	총 재활용률	0.17	0.19
	부품2의 기준치 미달성량	-14	0

표 8에서 볼 수 있듯이 의사결정자의 선호도에 따라 단순가중치를 적용했을 경우의 해

와 SPCM방법에 의해 얻어진 해가 서로 다르게 나타나고 있는데 이는 최적절충해가 의사결정자의 선호도 형태에 따라 다르게 얻어질 수 있다는 것을 말해준다. 단순가중치방법이 특성상 다양한 의사결정자의 선호형태를 반영하는 데는 한계가 있는 반면에, SPCM 방법은 의사결정자의 선호도를 다양하게 반영할 수 있다는 점에서 다목적식 최적화문제의 해법으로서 더 적절하다고 할 수 있다. SPCM방법에 의한 결과에서 보여지는 특징으로는 비용에 있어서 의사결정자의 선호도에 따른 변화가 뚜렷이 나타나고 있으며, 특정부품(부품2)의 재활용률 기준치(15%)를 달성함에 있어서는 세 번째 목적식에 대한 가중치가 가장 높은 경우보다 두 번째 목적식에 대한 가중치가 가장 높은 경우가 훨씬 더 최적해에 가까운 해가 얻어짐을 볼 수 있다. 이는 어떠한 특정부품의 재활용 기준치를 달성하기 위해서는 이것이 전체적인 재활용률을 증가시키는 문제와 함께 고려되어야 한다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과를 통해 SPCM방법을 이용한 해법이 각 목적간의 절충정도를 보다 잘 반영할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 형태의 의사결정자의 선호도를 반영할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 재활용률이 재활용 정책에 미치는 영향

어떠한 제품을 구성하고 있는 부품들은 제품의 특성상 그 부품들이 간단한 처리만으로 재사용이 될 확률이 클 경우가 있을 수 있고, 반대로 다시 가공을 해야만 생산이 가능한 형태가 되는 확률이 클 경우도 있을 것이다. 이러한 재활용률의 상대적 비율을 변화시켰을 때 재활용 정책에 어떠한 영향을 미치는

지 분석하기 위해 여러 가지 상황을 고려하여 그에 따른 변화를 살펴보고자 한다. 직감적으로도 전체 재활용률은 이미 사용되었던 부품이 재사용 및 재가공될 수 있는 확률이 어느 정도인가에 따라 직접적인 영향을 받을 것이라는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 재활용률이 높다고 해서 무조건 많이 재활용하는 것은 아니다. 왜냐하면 비용요소도 재활용 생산에 영향을 미치기 때문이다. 그래서 부품의 재사용 비율과 재가공 비율을 상대적으로 변화시키고 또한 각각의 경우가 준비비용과 관련하여 그 상관관계가 재활용정책에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 수치예제에서 제시된 부품의 재사용 및 재가공 비율과 준비비용에 대해 표 5와 표 6의 값들을 각각 표 9와 표 11과 같이 변화시켜 보았다. 여러 가지 비용요소 중에서 준비비용만을 고려한 이유는 준비비용은 초기비용 성격이 크므로 정책적인 결정에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 기대되기 때문이다. 또한 다른 비용요소는 너무 다양해서 일일이 민감도를 분석하기가 어려울 뿐만 아니라 민감도 자체가 예제의 기본상수에 따라서 크게 차이

가 나므로 큰 의미를 부여할 수 없다. 또한, 모델을 살펴보면 비용요소들은 직감적으로 기대되는 형태로 영향을 미칠 수밖에 없으므로 비용에 대한 민감도 분석은 고려하지 않았다.

①부품의 재사용 비율이 재가공 비율보다 상대적으로 높은 경우

이 경우는 각 부품의 재사용 비율을 0.83, 0.80, 0.82로 재가공 비율에 비해 높게 설정하고 이와 함께 재사용 비율이 높을수록 준비비용이 클 때와 재사용 비율이 높을수록 준비비용이 적은 경우를 다음 표 9에서와 같이 설정하였다.

이와 같이 재사용 비율이 재가공 비율에 비해 상대적으로 클 때 각 경우에 대해 다양한 의사결정자의 선호도에 따라 총 비용과 재활용률, 부품2의 재활용률 기준치 미달성량, 이 세 가지를 기준으로 하여 SPCM방법에 의해 얻어진 결과를 표 10에서 비교하였다.

표 10에서 볼 수 있듯이 재사용 비율이 전체적으로 높은 경우에 있어서 큰 변화는 나

표 9. 재사용 비율이 높은 경우의 재활용률 및 준비 비용의 입력값

구분		CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		부품 1	부품 2	부품 3	부품 1	부품 2	부품 3	부품 1	부품 2	부품 3
재활용률	재사용 비율	0.83	0.80	0.82	0.83	0.80	0.82	0.83	0.80	0.82
	재가공 비율	0.13	0.10	0.12	0.13	0.10	0.12	0.13	0.10	0.12
준비 비용	재사용 준비비용	800	2000	900	800	2500	900	600	2000	800
	재가공 준비비용	600	2500	800	600	2000	800	800	2500	900

표 10. 부품의 재사용비율이 재가공비율보다 높은 경우

선호도	기 준	CASE 1	CASE 2	CASE 3
(3.3:3.3: 3.4)	총 비용	86761	87291	86971
	총 재활용률	0.18	0.18	0.18
	부품2의 기준치 미달성량	-15	-15	-15
(5 : 3 : 2)	총 비용	85356	85856	85256
	총 재활용률	0.16	0.16	0.16
	부품2의 기준치 미달성량	-44	-44	-44
(2 : 5 : 3)	총 비용	86823	86786	86823
	총 재활용률	0.18	0.17	0.18
	부품2의 기준치 미달성량	-14	-17	-14
(3 : 2 : 5)	총 비용	86385	87323	86285
	총 재활용률	0.17	0.18	0.17
	부품2의 기준치 미달성량	-14	-14	-14

표 12. 부품의 재가공비율이 상대적으로 높은 경우

선호도	기 준	CASE 1	CASE 2	CASE 3
(3.3:3.3: 3.4)	총 비용	85176	85176	84676
	총 재활용률	0.19	0.19	0.19
	부품2의 기준치 미달성량	-5	-5	-5
(5 : 3 : 2)	총 비용	83502	83802	83076
	총 재활용률	0.16	0.16	0.16
	부품2의 기준치 미달성량	-37	-37	-34
(2 : 5 : 3)	총 비용	85176	85176	84676
	총 재활용률	0.19	0.19	0.19
	부품2의 기준치 미달성량	-5	-5	-5
(3 : 2 : 5)	총 비용	85176	85176	84676
	총 재활용률	0.19	0.19	0.19
	부품2의 기준치 미달성량	-5	-5	-5

표 11. 재가공 비율이 높은 경우의 재활용률 및 준비 비용의 입력값

구 분		CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		부품 1	부품 2	부품 3	부품 1	부품 2	부품 3	부품 1	부품 2	부품 3
재활용률	재사용 비율	0.13	0.10	0.82	0.13	0.10	0.12	0.13	0.10	0.12
	재가공 비율	0.83	0.80	0.12	0.83	0.80	0.82	0.83	0.80	0.82
준비 비용	재사용 준비비용	800	2000	900	600	2000	800	800	2500	900
	재가공 준비비용	600	2500	800	800	2500	900	600	2000	800

타나지 않음을 알 수 있다. 그리고 CASE 2 와 같이 재사용 비율이 높고 준비비용 또한 클 때는 다른 경우보다 비용이 조금 높게 나타나는데 이는 당연한 결과라고 할 수 있으

며 전체적인 재활용률 또한 의사결정자의 선호도에 따라 거의 비슷한 수준을 보이고 있다. CASE 2는 세 번째 기준에 대해서 변화의 폭이 크지는 않지만 의사결정자의 선호도

에 따른 다양한 변화를 보이고 있는데 이러한 변화가 총 재활용률에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 총 비용과 특정부품의 재활용률 기준치 달성, 이 두 가지 기준이 의사결정자의 선호도에 보다 민감하게 영향받는다라는 것을 말해준다

## ② 부품의 재가공 비율이 재사용 비율보다 상대적으로 높은 경우

이 경우는 각 부품의 재가공 비율을 0.83, 0.80, 0.82로 재사용 비율에 비해 높게 설정하고 이와 함께 재가공 비율이 높을수록 준비비용이 클 때와 재가공 비율이 높을수록 준비비용이 적은 경우를 다음 표 11에서와 같이 설정하였다. 그리고 다양한 의사결정자의 선호도에 따라 총 비용과 재활용률, 부품 2의 재활용률 기준치 미달성량, 이 세 가지를 기준으로 하여 SPCM방법에 의해 얻어진 결과를 표 12에서 비교하였다. 재가공 비율이 상대적으로 클 때에는 표 12에서 볼 수 있듯이 각 경우의 차이를 거의 찾아볼 수가 없다. 총 비용이 전체적으로 재사용 비율이 상대적으로 큰 경우보다 적게 나타나고 있음을 볼 수 있는데 이는 부품의 재가공 생산비용이 재사용 생산비용 보다 적게 주어졌기 때문이라고 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 대화형 MCDM기법을 이용하여 일반적인 생산시스템에서 단위 생산주기에 필요한 재활용부품의 생산, 관리를 다목적식의 생산전략에 맞추어 결정하는 의사결정 모형을 개발하였다. 모델의 해법으로써

최적절충해를 의사결정자와의 대화를 통해서 찾아나가는 연속쌍대비교법(SPCM)을 개발하고 사용자의 편의를 위해서 입출력 분석 소프트웨어를 C 프로그래밍 언어와 클리퍼를 이용하여 개발하였다. 수치분석을 통해서 제시된 모델의 타당성을 검토하고 선호도 및 준비비용에 대한 민감도를 부분적으로 분석한 결과, 재활용 부품의 생산에 있어서 서로 상충되는 기준 및 목적을 동시에 고려하기 위해서는 다목적식 최적화 문제로 다루어야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 재활용률의 변화가 재활용 정책에 어떠한 영향을 미치는지를 알아본 결과 재사용 및 재가공 비율과 준비비용간에 변화가 총 재활용률에는 그다지 큰 영향을 미치지 못하고 있다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시된 모델이 실제 상황에서 어느 정도 재활용정책 결정에 기여를 할 수 있는지 사례연구를 통해서 심도있게 분석하는 것이 이러한 다목적식을 이용한 응용연구의 활성화에 중요한 추후 연구과제이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Hitomi, K., *Manufacturing Systems Engineering*, London : Taykor & Fransis, 1979.
- [2] Hoshino, T., K. Yura, and K. Hitomi, "optimization Analysis for Recycle-oriented Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, 23(8), 1995.
- [3] Leschine, T. M., H. Wallenius, and W. A. Verdini, "Interactive Multiobjective An-

- alysis and Assimilative Capacity-Based Ocean Disposal Decisions," European Journal of Operational Research, 56(2), 278-289, 1992.
- [4] Oh, Hyun-Joo, "Development of An Interactive MCDM Model for Optimal Production Planning of Recycle-Oriented Manufacturing Components," Unpublished Master's Thesis, Department of Industrial Engineering, Sung Kyun Kwan University, Korea, 1996
- [5] Sadagopan, S. and Ravindran, A., "Interactive Solution of Bi-Criteria Mathematical Programs," Naval Research Logistics Quarterly, 29(3), 443-459, 1982.
- [6] Shin, W. S., "A Bibliographical Classification of MCDM Applications by Industrial Engineering Fields," 대한 산업공학회/한국경영과학회 94춘계공동학술대회 발표논문집, 1994.
- [7] Shin, W. S. and A. Ravindran, "A Comparative Study of Interactive Tradeoff Cutting Plane Methods for MOMP," European Journal of Operational Research, 56, 380-393, 1992.
- [8] Stam, A. and M. Kuula, and H. Cesar, "Transboundary Air Pollution in Europe: An Interactive Multicriteria Tradeoff Analysis," European Journal of Operational Research, 56(2), 263-277, 1992.
- [9] Steuer, R. E. Multiple Criteria Optimization : Theory, Computation, and Application, John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [10] Vuk, D., B. Kozelj, and N. Mladineo, "Application of Multicriterional Analysis on the Selection of the Location for Disposal of Communal Waste," European Journal of Operational Research, 55(2), 211-217, 1991.

## 부 록

표 1. 주기별 제품수요, 제품수거율, 제품생산능력 및 재고수준, 부품생산능력

주기 ( $t$ )	제품수요량 ( $D_t$ )	제품수거율 ( $\beta_t$ )	제품생산능력 ( $u_t$ )	제품재고수준 ( $u_t'$ )	부품생산능력 ( $u_t''$ )
1	165	0.00	200	60	190
2	175	0.15	170	60	190
3	180	0.20	195	60	190
4	200	0.25	210	60	190
5	195	0.30	170	60	190

표 2. 제품생산 관련비용

	비용 (천원/1단위)
제품조립비용 ( $C_1$ )	35
제품재고비용 ( $H_1$ )	5
회수제품재고비용 ( $Q$ )	3
제품회수비용 ( $R$ )	6

표 3. 부품생산비용

부품종류 ( $n$ )	원자재 생산비용 ( $C_{2,n}$ )	재사용 비용 ( $C_{3,n}$ )	재가공 비용 ( $C_{4,n}$ )
1	30	10	5
2	6	20	15
3	19	6	4



표 4. 부품재고비용 및 폐기비용

부품종류 ( $n$ )	부품재고비용 ( $H_{2,n}$ )	재사용재고비용 ( $H_{3,n}$ )	재가공재고비용 ( $H_{4,n}$ )	부품폐기비용 ( $B_n$ )
1	4	4	4	4
2	2	2	2	12
3	3	3	3	5

표 5. 부품 준비비용 및 분리비용

부품종류 ( $n$ )	재사용 준비비용 ( $SU_{1,n}$ )	재가공 준비비용 ( $SU_{2,n}$ )	분리비용 ( $P_n$ )
1	800	600	3
2	2000	2500	8
3	900	800	2

표 6. 부품 재활용비율

부품종류 ( $n$ )	재생비율 ( $\alpha_m$ )	재가공비율 ( $\alpha_m$ )	폐기비율 ( $\alpha_m$ )
1	0.6	0.36	0.04
2	0.25	0.65	0.10
3	0.28	0.66	0.06

표 7. 재사용 성공비율 및 재가공 성공비율

부품종류 ( $n$ )	재사용 성공비율 ( $\delta_{1,n}$ )	재가공 성공비율 ( $\delta_{2,n}$ )
1	0.96	0.95
2	0.75	0.85
3	0.78	0.90