

재활용을 고려한 제조시스템의 생산계획* Production planning for recycle-oriented manufacturing system

이경근, 송수용, 류시욱, 윤상국
부산대학교 산업공학과

Abstract

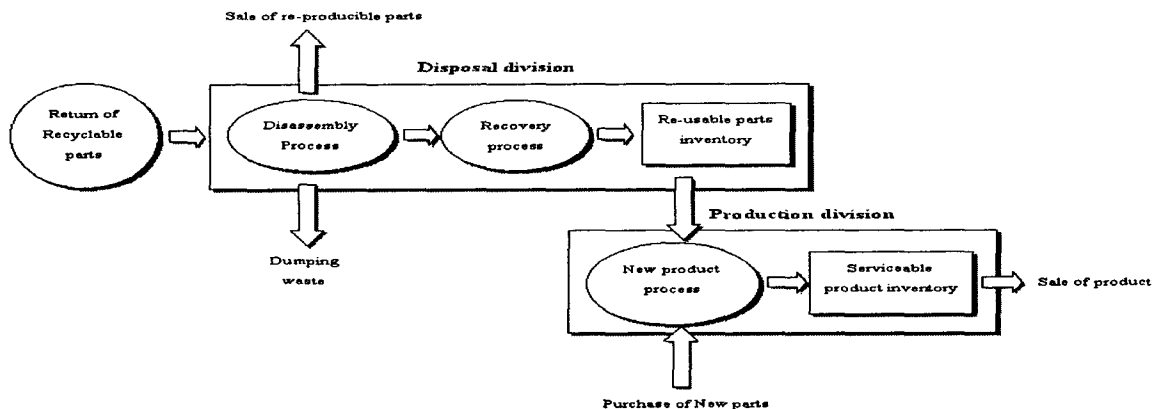
Recently, Manufacturers have recognized the importance of recycling because of the limitation of natural resources and new and proposed laws and legislations that assign responsibility to manufacturer for the ultimate disposal of their products and the environmental problems.

In this paper, products assembled recyclable parts and non-recyclable parts are collected after consumer usage and go into a plant. And the collected recyclable parts are disassembled through the disassembly process and have three attributes - re-usable attribute, re-manufacturing attribute and dumping attribute. In this situation, we deal with a production planning for recycle-oriented manufacturing system. The proposed model maximizing the profit in a system is formulated as a mixed-integer linear programming. And then a numerical example is used to evaluate the effectiveness of the proposed model

1. 서론

요즘, 많은 제조업자들은 제품을 수리하거나 복구하여 재사용할 수 있는 제품에 대해 많은 관심을 가지고 있다. 왜냐하면, 사용할 수 있는 천연 자원이 제한되어 있고 또한 환경 관련 법안들이 소비자들 사용 후 난 뒤의 제품의 궁극적인 처리까지 책임을 지우고 있기 때문이다. 그리고 무엇보다 사용되어진 제품을 회수하여 재사용하는 것이 이것을 폐기 처분하는 것 보다 훨씬 경제적이란 것 때문이다.

이 논문에서는 하나의 제품이 재활용 가능한 부품과 재활용이 가능하지 않은 부품이 조립되어 하나의 제품이 만들어지는 제조 시스템을 고려한다. 생산된 제품은 소비자에 의해 사용되어지고 나면 제품 중 재활용 가능한 부품은 재사용되어지기 위해 회사 내로 다시 회수되어진다. 회수된 부품은 분리공정을 거쳐 3 가지의 속성(재사용, 재생산, 폐기)으로 분리되며, 이 중 재사용할 수 있는 부품은 다음 생산기간 제품 생산에 사용된다. 그리고 또한 재사용 가능한 부품과 재생산 가능한 부품은 원자재공급자에게 팔 수 있다. 이러한 재활용 정책을 실시하고 있는 생산시스템에서 기업의 총이익을 극대화하는 생산계획을 혼합 정수 계획법을 이용하여 설립하고자 한다.



<그림 1> 재활용시스템의 생산 및 처리 부서

* 상기논문은 2000년도 두뇌한국 21 사업 핵심분야에 의해 지원되었음.

2. 재활용을 고려한 제조시스템의 수리모델 개발

2.1 가정

1. 회사는 M 개의 부품이 조립되어 하나의 제품이 만들어지는 제품을 생산하고 있다.
2. 제품 생산량은 정규 생산량과 잔업생산량의 합으로 이루어진다.
3. 제품 생산에 사용되어지는 부품은 재활용 가능한 것과 재활용이 가능하지 않은 것으로 속성이 나뉘어진다.
4. 회수되어진 부품은 재 사용가능한 것과 재 생산 가능한 것 그리고 폐기되는 것으로 나뉘어진다.
5. 각 생산기간마다 회수률은 상수로 주어진다.
6. 관련된 비용은 모두 상수로 주어진다.(부품구입비, 분리비용, 처리비용, 부품과 완제품에 대한 재고유지비용 등)
7. 원자재는 즉시로 도착한다.
8. 생산부서와 처리부서에 대한 리드타임은 알고 있다.
9. 생산부서와 처리부서에 대한 생산능력은 제한되어 있다.
10. 분리공정을 통해 나온 재사용 가능한 부품의 품질등급은 새로 구입한 부품과 동일한 것으로 간주한다.

2.2 제약식

하나의 제품은 M 개의 parts 로 이루어지며, 매 t 기간마다 생산량은 정규생산과 잔업생산의 합인 $P(t)$ 만큼 생산하며, 정규생산과 잔업생산은 각각 생산능력의 제약을 받는다. 그리고 부품 m 의 속성이 $n(n=1,2)$ 인 부품의 구입량은 $x_{mn}(t)$ 로 나타내며, $u_m(t)$ 는 재사용 가능한 부품 중 생산기간에 사용되어지는 부품의 수를 나타낸다. 여기서 R 은 재활용이 가능한 부품을 나타내며, \bar{R} 은 재활용이 가능하지 않은 부품을 나타낸다.

$$x_{mn}(t) + u_m(t) = P(t) \quad \text{for } m \in R, \forall t, n = 1 \quad (1)$$

$$x_{mn}(t) = P(t) \quad \text{for } m \in \bar{R}, \forall t, n = 2 \quad (2)$$

$$NP(t) + OP(t) = P(t), \forall t \quad (3)$$

$$C_1 \leq NP(t) \leq C_2 \quad (4)$$

$$OP(t) \leq C_3 \quad (5)$$

회수률 r_{th} 는 t-h 기에 생산된 제품의 양에 대해 t 기에 회수되어지는 비율을 나타낸다. t 기에 회수되어지는 양 $y(t)$ 는 다음과 같다. 여기서 H 는 소비자에 의해 사용되어지는 제품의 제일 긴 수명이 다.

$$y(t) = \sum_{h=1}^H r_{th} \cdot P(t-h) \quad (6)$$

제품이 소비자들에 의해 사용되어지고 난 뒤 재활용 가능한 부품이 회수되어지는 양 $R_m(t)$ 는 다음과 같다.

$$\sum_{h=1}^H r_{th} \cdot \{x_{m1}(t-h) + u_m(t-h)\} = R_m(t) \quad (7)$$

회수되어진 재활용 가능한 부품은 분리공정을 통해 재사용, 재생산, 폐기 중 하나의 속성을 가지게 된다.

$$R_m(t) = Z_{m1}(t) + Z_{m2}(t) + Z_{m3}(t) \quad m \in R, \forall t, l = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$v_m(t)$ 는 재사용할 수 있는 부품 중에서 회사 내로 들어오는 양을 나타낸다. $I_m(t)$ 는 재사용 가능한 부품의 재고를 나타내며, $PI(t)$ 는 완제품에 대한 재고를 나타낸다. 그러므로 재사용할 수 있는 부품과 완제품에 대한 재고식을 다음과 같다.

$$I_m(t+1) = v_m(t) + I_m(t) - u_m(t) \quad (9)$$

$$PI(t+1) = PI(t) + P(t) - D(t) \quad (10)$$

그리고 재사용 가능한 부품과 완제품은 또한 창고 계약을 가진다.

$$\sum_{m \in M} I_m(t) \leq C_4 \text{ (재사용가능한 부품)} \quad (11)$$

$$PI(t) \leq C_5 \text{ (완제품에 대한 제약)} \quad (12)$$

2.3 목적식

2.2 의 제약식 하에서 재활용을 고려한 제조 시스템에서의 목적은 기업의 이익을 최대로 하는 생산계획을 수립하는 것이다. $Cp(t)$ 는 새로운 부품 m 의 구입비용과 회수된 부품을 재사용하는데 드는 비용을 나타내며, $Pe(t)$ 는 각 t 기에 발생하는 고정비와 정규 생산 비용, 잔업생산비용을 나타낸다. $Cc(t)$ 는 판매된 제품을 회수하는데 발생하는 비용을 나타내며, $Dc(t)$ 는 회수된 재활용 가능한 부품을 분리하는 데 발생하는 비용을 나타내며, $Pd(t)$ 는 각 기간에 제품을 판매하면서 생기는 수익을 나타낸다. $Hc(t)$ 는 재사용 가능한 부품과 완제품에 대한 재고유지비이며, $Up(t)$ 는 재사용 가능한 부품과 재생산 가능한 부품을 원자재공급자에게 팔면서 생기는 이익을 나타낸다. $S(t)$ 는 폐기되는 부품에 대한 스크랩 비용을 나타낸다.

$$Cp(t) = \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{n=1}^2 c_{mn} x_{mn}(t) + d_m u_m(t) \right\} \quad (13)$$

$$Pe(t) = a_m(t) + c_1 \cdot NP(t) + c_2 \cdot OP(t) \quad (14)$$

$$Cc(t) = b_d \cdot y(t) \quad (15)$$

$$Dc(t) = R_m(t) \cdot c_d \quad (16)$$

$$Pd(t) = p \cdot D(t) \quad (17)$$

$$Hc(t) = h_1 \cdot I(t) + h_2 \cdot PI(t) \quad (18)$$

$$Up(t) = p_r \cdot s_m(t) + p_p \cdot \alpha_2 \cdot Z_{m2}(t) \quad (19)$$

$$S(t) = s \cdot (Z_{m3} + (1-\alpha_1) \cdot Z_{m1}(t) + (1-\alpha_2) \cdot Z_{m2}(t)) \quad (20)$$

여기서 $c_{mn}(t)$ 는 속성이 n 인 부품 m 을 구입할 때

의 비용이고, $d_m(t)$ 는 재 사용 가능한 부품을 이용하면서 발생하는 비용이다. $a_m(t)$ 는 각 기간마다 발생하는 고정비이며, c_1 는 정규생산에 발생하는 비용이고, c_2 는 잔업생산에 발생하는 비용이다. b_d 는 판매된 제품을 회수하려고 할 때 발생하는 비용이며, c_d 는 회수된 부품을 분리할 때 발생하는 비용이다. p 는 제품의 판매 가격이고, h_1 와 h_2 는 재사용 가능한 부품 및 완제품에 대한 재고 유지비이다. p_r, p_p 은 재 사용 가능한 부품 및 재생산 가능한 부품을 원자재 공급자에게 판매 하는 가격이며, s 는 스크랩 비용이다. α_1, α_2 는 재사용 및 재생산성공률을 나타낸다.

위의 수식 (13) ~ (20)을 이용하여 전체 목적식을 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Max } Z = \sum_{t=1}^T \{-Cp(t) - Pe(t) - Cc(t) - Dc(t) + Pd(t) - Hc(t) + Up(t) - S(t)\}$$

위의 정수계획법 문제를 LINGO 를 통해 실험을 수행하였다.

3. 수치예제 실험

지금까지 제시한 수리적 모델을 검증하기 위해 수치예제를 통해 분석해 보자. 생산기간 T는 10 기간으로 하고, 각 기간의 수요는 다음과 같다.

기간, t	수요, D(t)
1	10,000
2	13,000
3	14,000
4	17,000
5	13,000
6	10,000
7	8,000
8	7,000
9	12,000
10	15,000

<표 1> 각 기간에서의 수요

하나의 제품은 5 개의 부품으로 조립되는데 각 부품에 대한 비용 및 수익은 <표 3>과 같다.

	부품의 종류, m = 5				
	1	2	3	4	5
	재활용가능부품			재활용불가능부품	
구입비	10	12	13	8	7
재사용비	2	3	3		
재사용가능 부품판매수의	6	6	6		
재생산가능 부품판매수의	2	2	2		
폐기비용	1	1	1		

<표 3> 부품의 종류에 대한 비용 및 수익

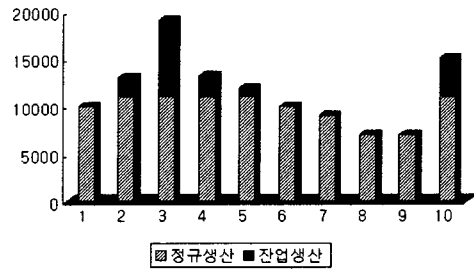
그리고 제품의 사용수명이 제일 긴 기간 H는 3(기

간)으로 하며, 회수율 r_{th} 는 다음과 같다.

기간, h	1	2	3
회수율, r_{th}	0.2	0.7	0.3

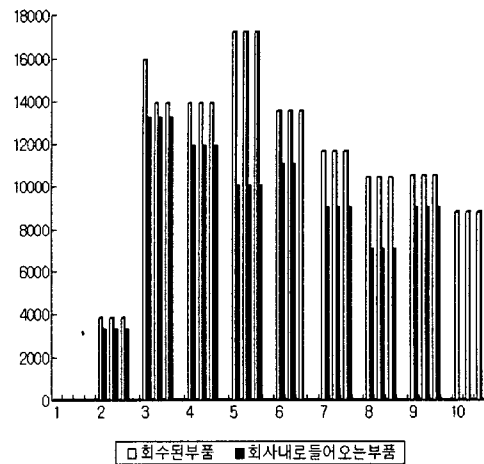
<표 2> 각 기간에서의 회수율

제시한 모델링에서 주어진 생산기간 동안 시스템의 이익을 최대로 하는 생산계획은 <그림 2> 와 같다. 여기서 정규생산에 대한 제약은 $7000 \leq NP(t) \leq 11000$ 으로 하였으며, 잔업생산에 대한 제약은 $OP(t) \leq 8000$ 으로 하였다.



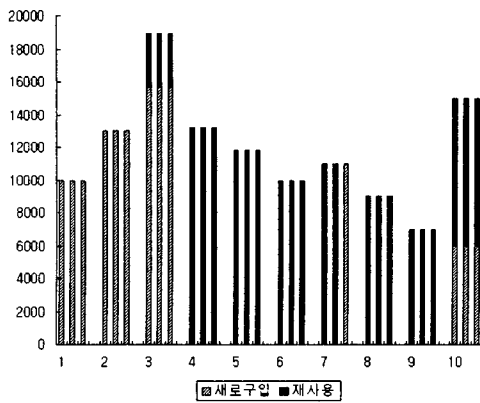
<그림 2> 생산기간에서의 정규 및 잔업생산량

<그림 3> 은 회수된 재활용이 가능한 부품 중 회사 내로 들어오는 부품의 수를 나타낸다.



<그림 3> 회수된 부품과 회사 내로 들어가는 부품

<그림 4>는 처음 제품이 소비자에 의해 사용되어 지는 제품의 수명이 제일 긴 기간이 지나고 나면 회사 내로 들어온 부품을 원자재공급자에게 파는 것보다 그것을 다음 생산기간에 사용하는 것이 더욱 이익인 것을 알 수 있다.



< 그림 4> 생산기간에 재사용 및 새로 구입하는 양

4. 결론

이 논문은 환경관련 법규나 자원의 한계로 인해 재활용의 중요성이 인식되고 있는 가운데 이런 재활용을 고려한 제조시스템의 생산계획에 대해 다루었다. 여기서는 재활용이 가능한 부품과 재활용이 불가능한 부품이 조립되어 하나의 제품이 만들어지는 제조시스템을 다루었으며, 재활용을 고려하는 생산시스템은 일반적인 시스템과 달리 고려해야 할 것이 많다. 이 논문은 이런 상황에서의 기본적인 이론적인 접근을 시도하였으며, 기초적인 연구로서의 역할이 기대된다.

참고문헌

[1] A.I.Barros, R.Dekker, V.Scholten, "A two-level network for recycling sand: A case study.", *European journal of Operation Research*, 110,199-214,1998.

[2] Askiner Gungor, Surendra M. Gupta, "Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery : A survey.", *Computer & Industrial Engineering*, 36, 811-853, 1999.

[3] Cortazar, Schwartz and Salinas, "Evaluating environmental investments: A real options approach.", *Management Science*, 44(8), 1059-1069, 1998.

[4] Edward A. Silver, David F.Pyke, Rein Peterson, *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, JOHN WILEY & SONS, Third Edition, 1998.

[5] Joseph Sarkis, "A methodological framework for evaluating environmentally conscious manufacturing programs.", *Computer & Industrial Engineering*, 36, 793-810, 1999.

[6] Joseph Sarkis, "Evaluating environmentally conscious business practices.", *European journal of Operation Research*, 107,159-174,1998.

[7] J. A. Muckstadt, M. H. Issac, "An analysis of single item inventory systems with returns.",

[8] M.Fleischmann et al., "Quantitative models for reverse logistics : A review .", *European Journal of Operational Research*, 103, 1-17, 1997.

[9] Robert B. Handfield, Steve V.Walton, Lisa K. Seegers, Steven A. Melnyk, "Green value chain practices in the furniture industry.", *Journal of Operations Management*, 15, 293-315, 1997.

[10] S.E. Daniel, D.C.Diakoulaki, C.P.Pappis, "Operations research and environmental planning.", *European journal of Operation Research*, 102,248-263,1997.

[11] Shin,W. S., Oh, H.J., "Management of Recycling-Oriented Manufacturing Components Based on an MCDM Model.", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 22(4), 589-605, 1996.

[12] Stephen C. Graves, "A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment.", *Management Science*, 31(10), 1247-1256, 1985.

[13] T.Hoshino, K.Yura and Hitomi, "Optimizaton analysis for recycle-oriented manufacturing system.", *International Journal of Production Research*, 33(8), 2068-2078, 1995.

[14] T.h.Spengler et al., "Environmental integrated production and recycling management.", *European Journal of Operational Research*, 97, 308-326, 1997.

[15] T.N.Goh, N.Varprasad, "A Statistical Methodology for the Analysis of the Life-Cycle of Reusable Containers.", *IIE Transactions*, 42-47, 1986.

[16] Van der Lann, Marc Salomon, "Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal.", *European journal of Operation Research*, 102,264-278,1997.

[17] Van der Lann, Salomon, Dekker and Van Wassenhove, "Inventory Control in Hybrid systems with Remanufacturing.", *Management Science*, 45(5), 733-747, 1999.

[18] V.D.R.Guide Jr., "Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system.", *International Journal of Production Economics*, 53, 101-116, 1997.

[19] W.H. Hausman, G.D.Scudder, "Priority scheduling rules for repairable inventory systems." *Management Science*, 28(11), 1215-1232, 1982.

[20] Y.Adachi et al., "Optimal inventory control policy subject to different selling prices of perishable commodities.", *International Journal of Production Economics*, 60-61, 389-394, 1999.