

재생산과 재활용을 고려한 부품 주문량 결정

Optimal Order Quantity for Parts in Remanufacturing Environment

김주용, 김기범, 정봉주

연세대학교 산업시스템공학과

Abstract

한정된 자원과 환경보존에 대한 중요성으로 인해 회수물류에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 본 논문에서는 역 물류의 다양한 형태 중 부품을 재활용하는 재생산과 원자재의 재활용 프로세스가 포함된 역 물류 네트워크를 제안한다. 제안된 역 물류 네트워크에서 수명이 다한 제품은 제조업자에 의해 수거되어 분해된다. 분해된 부품들 중 재사용이 가능한 일부는 재생산 프로세스에 투입되고 나머지 부품들은 재활용 프로세스를 거쳐 원재료 공급업자에게 역으로 판매되거나 폐기된다. 재생산 프로세스에서는 분해 후 가공된 부품과 공급업자로부터 구매한 새 부품을 조립하여 제품을 생산한다.

본 논문에서는 제시된 역 물류 네트워크 상에서 수거, 저장, 분해, 폐기, 재가공 프로세스 비용을 산출하여 역 물류의 총 비용을 최소화 하는 부품의 재사용량 결정 모델을 제시한다. 마지막으로 수치실험을 통해 제안된 모델의 적합성과 실용성을 검증한다

1. 서론

전통적으로 생산자들은 생산된 제품이 최종 소비자들에 의해서 사용된 이후의 처리에 대하여 고려하지 않았다. 하지만 자원고갈 문제와 환경보존에 관한 중요성이 점차 증가함에 따라 수명이 다한 제품을 회수하여 재사용하기 위한 회수물류에 관한 관심이 높아지고 있다.

회수물류의 형태는 크게 재사용, 재활용과 재생산으로 구분된다. 본 논문에서는 재생산과 재활용이 포함된 회수물류 네트워크를 제안한다. 재생산은 이미 사용된 제품을 처리공정을 통하여 새로운 제품과 같은 상태로 회복시키는 것을 말한다. 재생산 공정에서 회수된 제품은 부품들로 분리된 후 처리공정을 거쳐 새 부품과 같은 상태가 된다. 처리 공정을 거친 부품

들은 재조립공정을 거쳐 새로운 제품으로 생산한다. 그리고 재활용은 제품에서 분리된 부품을 완전히 재가공하여 원재료로 사용하는 것을 의미한다. 기업은 제품의 재활용과 재생산을 통해서 소각이나 매립 등으로 사후 처리되는 폐기물의 양을 줄임으로써 환경에 미치는 피해를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 회수물류에서 재생산과 재활용을 고려한 부품 발주량 결정 모델을 제시한다.

2장에서는 관련된 기존 연구 현황에 대하여 언급하고, 3장에서는 재생산과 재활용을 고려한 역 물류 네트워크의 수학적 모델을 제시한다. 그리고 4장에서는 수치 예제 실험을 통해 제시된 모델의 적합성을 검증하고, 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구방향에 대하여 언급하였다.

2. 기존 연구 현황

회수물류, 재생산, 재활용 시스템에 관한 연구는 여러 분야에 걸쳐서 연구 되어 왔다. Fleischmann 등 (1997)은 회수물류에서 정량적인 모델에 대한 개요를 제시하였다. 이 논문에서는 회수물류의 최근 연구에 관하여 조사하였고 분배계획, 재고관리와 생산계획의 세 부분으로 나누었고, 향후 연구의 필요성에 관해서도 검토하였다.

재생산에 관한 이전 연구들은 생산계획/관리, 재고관리와 스케줄링 등과 같은 다양한 문제들에 관하여 연구가 활발하게 이루어졌다. Der Lann, E. 등(1997)은 생산, 재생산과 폐기공정을 고려한 확률적 재고시스템을 제안하였고, 생산, 재생산과 폐기 공정을 효과적으로 조정하기 위하여 푸시/풀 전략으로 확장시켰다. G.P. Kiesmuller(2003)는 생산과 재생산에 대하여 다른 리드타임과 재고를 고려한 확률적 생산/재생산 모델을 제시하였다. V. Jayaraman 등 (2003)은 역 분배에 관해 연구하였고, 역 분배 문제에 관한 수학적 모델과 해법을 제시하

였다.

그리고, Caruso, C 등(1993)은 수거, 운반, 소각, 혼합, 재활용과 폐기를 고려한 고체 폐기물 관리 시스템을 제안하였고, 폐기물 관리 시스템을 설계하는데 다중 목표 할당 모델과 휴리스틱이 사용되었다.

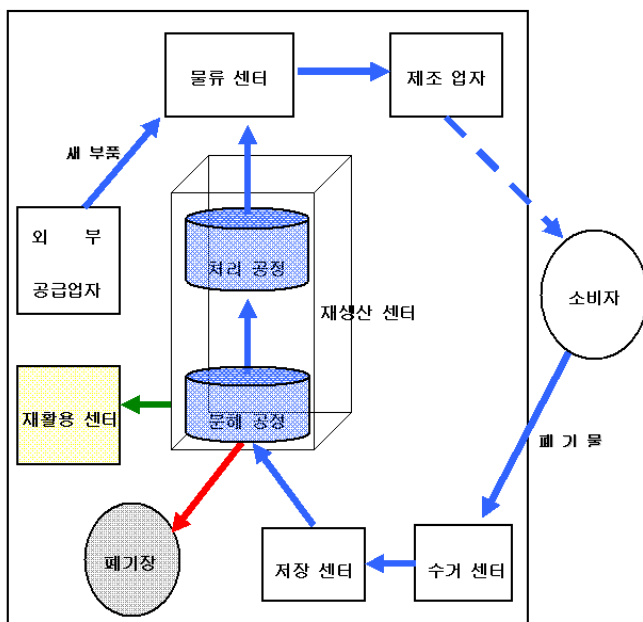
A. I. Barros(1998)는 모래재활용 문제에 관한 2단계 위치 선정 문제를 제안하였고 휴리스틱을 이용하여 문제를 해결하였다. Li-Hsing Shih(2001)는 전자제품의 재활용을 고려한 위치선정문제를 제안하였다.

한편, 회수물류에 관한 사례 연구에서는 Wendy K 등(2001)이 호주에 있는 제록스의 연구에 기반을 둔 제품 시스템에서 재생산을 통합함으로써 인해서 얻어지는 제품 라이프 사이클의 이익에 관한 정량화를 시도하였다. V. Daniel R. Guide Jr (2000)는 미국에 있는 재생산 회사의 생산 계획과 관리 활동에 관한 조사를 통해 재생산의 실행과 복잡한 특징들에 관한 향후 연구분야를 제안하였다.

본 연구에서는 기존 연구에서 다루지 않은 재생산 프로세스의 세부적인 공정 비용요소들과 재활용을 고려한 회수 네트워크 모델을 제안한다.

3. 회수 네트워크 모델

본 논문에서는 회수물류 환경에서 재생산과 재활용을 고려하여 부품 재 사용량을 결정하는 모델을 제안한다. 회수네트워크는 <그림 1>과 같이 수거 센터와 저장 센터, 분해 공정, 처리 공정, 폐기장, 재활용 센터, 물류 센터, 외부 부품 공급업자, 제조업자, 소비자, 폐기물



<그림 1. 회수 네트워크>

정상적인 물류시스템을 통하여 소비자에게 전달된 제품은 제품수명이 다하면 수거 센터로 회수된다. 회수된 제품은 저장 센터를 거쳐 재생산 센터에서 분해와 처리 공정을 거쳐 새 부품과 같은 상태가 된다. 분해 공정에서는 부품을 분리한 상태에서 처리공정으로 넘긴 후 나머지 부품은 재활용 센터에 판매되거나 폐기된다. 제조업자는 완성품을 조립하기 위하여 외부 공급업자로부터의 부품 공급과 재생산된 부품 공급의 두 가지 옵션을 가진다. 본 논문에서는 제시된 역물류 네트워크 상에서 수거, 저장, 분해, 폐기, 재 가공 프로세스 비용을 산출하여 회수 네트워크의 총 비용을 최소화 하는 부품 발주량 결정 모델을 제시한다. 모델의 전개를 위한 인덱스 및 기호는 다음과 같다.

인덱스

p : 제품, $p = \{1, \dots, P\}$

i : 부품, $i = \{1, \dots, I\}$

t : 시간, $t = \{1, \dots, T\}$

변수

R_{pt} : t 시간에 수거센터의 제품 p 에 대한 요구량

D_{it} : t 시간에 부품 i 에 대한 수요

$CPCCP_p$: 수거센터에서 제품 p 에 대한 수거 비용

$SHCP_p$: 저장센터에서 제품 p 에 대한 재고유지비용

$DSOC_p$: 분해공정에서 제품 p 에 대한 분해비용

PSC_i : 프로세스공정에서 부품 i 에 대한 셋업비용

POC_i : 프로세스공정에서 부품 i 에 대한 처리비용

$DISC_i$: 폐기장에서 부품 i 에 대한 폐기비용

RIS_i : 재활용 센터에 판매되는 부품 i 의 판매비용

$RDHC_i$: 물류센터에서 부품 i 에 대한 재고유지비용

$PUIC_i$: 외부 공급업자로부터 부품 i 에 대한 구매비

DST_p : 제품 p 한 유닛의 분해공정 셋업시간

POT_i : 부품 i 한 유닛의 프로세싱 시간

DOT_p : 제품 p 한 유닛의 분해시간

BOM_{pi} : 제품 p 에서 분해되어지는 부품 i 의 수

$CSCap$: 수거센터의 용량

$SSCap$: 저장센터의 용량

$RSCap$: 물류센터의 용량

$DACap$: 분해공정의 용량
 $PSCap$: 처리공정의 용량
 $PUBR_i$: 분해되어진 부품 i 의 재생산율의 상한값
 $RUBR_i$: 분해되어진 부품 i 의 재활용율의 상한값

결정변수

CPN_{pt} : t 기간에 수거센터에 수집된 제품 p 의 수
 SPN_{pt} : t 기간에 저장센터에 저장된 제품 p 의 수
 DSN_{pt} : t 기간에 분해된 제품 p 의 수
 $DISN_{it}$: t 기간에 폐기된 부품 i 의 수
 PSN_{it} : t 기간에 처리된 부품 i 의 수
 RIN_{it} : t 기간에 재활용센터에 판매된 부품 i 의 수
 $PUIN_{it}$: t 기간에 구매한 부품 i 의 수
 $RDIN_{it}$: t 기간에 물류센터의 부품 i 의 수
 DIM_{it} : t 기간에 분해된 부품 i 의 수
 $DIM_{it} = \sum_{p=1}^P BOM_{pi} DSN_{pt}$
 DSU_{pt} : t 기간에 제품 p 에 관한 분해공정이 일어나면 1, 아니면 0
 PSU_{pt} : t 기간에 부품 i 에 관한 프로세스공정이 일어나면 1, 아니면 0

$$DIM_{it} = PSN_{it} + DISN_{it} + RIN_{it} \quad , \forall i, t \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^P CPN_{pt} \leq CSCap \quad , \forall t \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^P SPN_{pt} \leq SSCap \quad , \forall t \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I RIN_{it} \leq RSCap \quad , \forall t \quad (9)$$

$$\sum_{p=1}^P (DST_p DSU_{pt} + DOT_p DSN_{pt}) \leq DACap \quad , \forall t \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I (PST_i PSU_{it} + POT_i PSN_{it}) \leq PSCap \quad , \forall t \quad (11)$$

$$PSN_{it} \leq M \cdot PSU_{it} \quad , \forall i, t \quad (12)$$

$$DSN_{pt} \leq M \cdot DSU_{pt} \quad , \forall p, t \quad (13)$$

$$PSN_{it} \leq PUBR_i DIM_{it} \quad , \forall i, t \quad (14)$$

$$RIN_{it} \leq RUBR_i DIM_{it} \quad , \forall i, t \quad (15)$$

$$DSU_{pt} \in \{0,1\} \quad , \forall i, t \quad (16)$$

$$PSU_{it} \in \{0,1\} \quad , \forall p, t \quad (17)$$

$$CPN_{pt}, SPN_{pt}, DSN_{pt} \geq 0 \quad , \forall p, t \quad (18)$$

$$PSN_{it}, DISN_{it}, RIN_{it}, RDIN_{it}, PUIN_{it} \geq 0 \quad , \forall i, t \quad (19)$$

목적함수(1)은 수거센터, 저장센터, 재생산 센터, 폐기장, 물류센터에서 생기는 비용과 부품구매와 재활용 센터에 대한 부품 판매로 생기는 이익을 고려한 총비용 함수이다. 제약식(2)는 분해되는 제품의 BOM 구조를 나타낸다. 제약식(3)–(6)은 수거센터, 저장센터, 물류센터와 분해공정에 대한 균형 방정식이며, 제약식(7)–(11)은 수거센터, 저장센터, 물류센터, 분해와 처리공정의 용량에 관한 제약조건이다. 제약식(12)–(13)은 분해공정과 처리공정의 셋업에 관한 제약이며, 제약식(14)–(15)는 분해된 부품의 재사용과 재활용 가능량에 관한 제약이다. 마지막으로 제약식(16)–(17)은 분해공정과 처리공정 셋업에 대한 이진 제약조건이며, 제약식(18)–(19)는 비음 조건이다.

회수네트워크 모델

Min

$$Z = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P (CPCC_p CPN_{pt} + SHC_p SPN_{pt} + DSSC_p DSU_{pt} + DSOC_p DSN_{pt}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (PST_i PSU_{it} + POT_i PSN_{it} + DISC_i DISN_{it} - RIS_i RIN_{it} + RDHC_i RDIN_{it} + PUIC_i PUIN_{it}) \quad (1)$$

s.t

$$DIM_{it} = \sum_{p=1}^P BOM_{pi} DSN_{pt} \quad , \forall i, t \quad (2)$$

$$CPN_{pt} = R_{pt} - SPN_{pt} \quad , \forall p, t \quad (3)$$

$$SPN_{pt} = SPN_{p,t-1} + CPN_{pt} - DSN_{pt} \quad , \forall p, t \quad (4)$$

$$RDIN_{it} = RDIN_{i,t-1} + PSN_{it} + PUIN_{it} - D_{it} \quad , \forall i, t \quad (5)$$

4. 수치예제

본 장에서는 제안된 회수 네트워크 모델의 각각의 구성요소 비용을 고려하여 실험 데이터를 구성하였다. 실험을 위해 상용 패키지인 OPL Studio 3.1을 사용하였고, 수치 예제에

사용된 데이터는 제품 3종류, 부품 5종류와 7기간으로 구성되어있다. 실험을 위한 입력 데이터는 아래 표와 같다.

<표1. t 기간에 부품 i 에 대한 수요>

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
i_1	870	560	730	990	810	710	810
i_2	810	680	510	430	660	630	740
i_3	710	670	830	680	690	882	720
i_4	880	720	670	760	820	680	600
i_5	630	700	830	720	750	730	600

<표2. 제품 p 에서분해되어지는 부품 i 의수>

	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5
p_1	3	5	2	4	3
p_2	2	1	3	3	4
p_3	3	2	2	4	4

입력 데이터로부터의 결과값은 아래와 같다.

<표3. t 기간에 재활용센터에 판매된 부품 i 의수>

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
i_1	96	165	159	138	151	133	144
i_2	160	110	221	92	252	112	240
i_3	64	110	138	92	101	88	96
i_4	128	220	218	184	202	177	192
i_5	96	220	197	184	151	169	144

<표4. t 기간에 처리된 부품 i 의수>

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
i_1	288	495	478	414	454	400	432
i_2	480	330	664	276	757	338	720
i_3	192	330	414	276	303	266	288
i_4	384	660	656	552	606	533	576
i_5	288	660	592	552	454	509	432

<표5. t 기간에 구매된 부품 i 의 수>

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
i_1	332	65	251	576	355	309	378
i_2	80	350	0	0	0	193	20
i_3	268	340	415	404	386	615	432
i_4	246	60	13	208	213	146	24
i_5	92	40	237	168	295	220	168

위 실험의 결과값은 재활용될 수 있는 부품의 판매로 인한 이익증가와 재생산을 통해서 구입하는 부품의 수가 감소하였음을 나타

낸다.

5. 결론

본 논문에서는 회수물류환경에서 재생산과 재활용을 고려하여 제품 생산관련 비용을 최소화 시킬 수 있는 수리모델을 제시하였고, 수치예제를 통하여 모델의 적합성 및 타당성을 검증하였다. 각 단계들간의 수송비를 고려하고 좀 더 현실적인 상황을 반영하여 재 생산 프로세스를 보완한다면 효율적인 시스템 이 개발될 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부 지정 인천대학교 동북아전자물류연구센터의 지원에 의한 것임.

6. 참고 문헌

1. A.I. Barros, R.Dekker, V. sholten.(1998). A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110,199-214
2. C. CarusoA. ColorniM. Paruccini(1993). The regional urban solid waste management system: A modeling approach. *European Journal of Operational Research*, 70, 16-30
3. Der Laan, E. and Salomon, M.(1997). Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. *European Journal of Operational Research*, 102,264-278
4. Fleischmann, M., Bloemhof-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 Operait ional Research*, 103,1-17
5. G.P. Kiesmuller(2003). A new approach for controlling a hybrid stochastic manufacturing/remanufacturing system with inventories and different leadtimes. *European Journal of Operational Research*, 147, 62-71
6. Li-Hising Shih.(2001). Reverse logistics system planning for recycling electrical appliance and computers in Taiwan. *Resource, Conservation and Recycling*, 32, 55-72
7. Vaidyanathan Jayaraman, Raymond A. Patterson and Erik Rolland(2003). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150, 128-149
8. V. Daniel R. Guide Jr (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs, *Journal of Operations Management*, 18 ,467-483
9. Wendy, K., Chris, R.(2001). Eco-efficiency gains from remanufacturing, A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia, *Journal of Cleaner Production*, 9, 75-81