



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

재활용품 - 신품 통합관리 시스템의 최적운영을 위한 동적계획 방법론



2007년 2월

부경대학교 대학원

시스템경영공학과

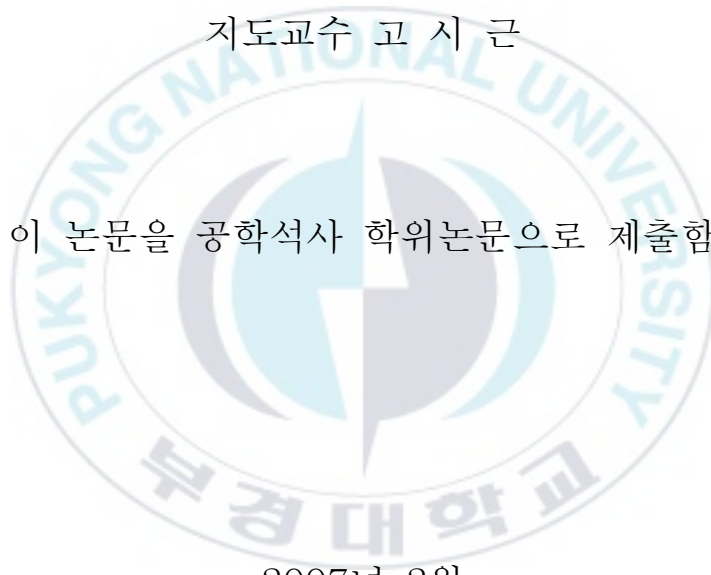
이 정 수

공학석사 학위논문

재활용품 - 신품 통합관리 시스템의 최적운영을 위한
동적계획 방법론

지도교수 고 시 근

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2007년 2월

부경대학교 대학원

시스템경영공학과

이 정 수

이정수의 공학석사 학위논문을 인준함

2006년 12월 22일



주심 공학박사 구 평 회 인

위원 공학박사 김 민 수 인

위원 공학박사 고 시 근 인

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 기존 연구 분석	4
1.3 연구 내용	7
2. Mixed Integer Linear Programming Model	8
2.1 부호설명	8
2.2 가정	10
2.3 수리모형	10
3. LINGO를 이용한 방법	13
3.1 LINGO로 해 찾기	13
3.2 LINGO 결과 분석	15
4. 복합유전알고리즘(Hybrid genetic algorithm)을 이용한 방법	16
4.1 유전알고리즘	16
4.2 표현방법(Representation)과 초기해 생성	17
4.2.1 방법1(실수로 표현)	17
4.2.2 방법2(이진수로 표현1)	18
4.2.3 방법3(이진수로 표현2)	19

4.3 목적함수와 적합도함수, 재생산(Reproduction) -----	20
4.4 유전연산자(Genetic Operator) -----	21
4.4.1 교차변이 -----	21
4.4.2 돌연변이 -----	22
4.5 Stopping-Rule -----	22
 5. 결과 분석 -----	 23
5.1 최적해 분석 -----	23
5.2 CPU-Time 분석 -----	28
5.3 결론 -----	28
 참고문헌 -----	 30
Abstract -----	33

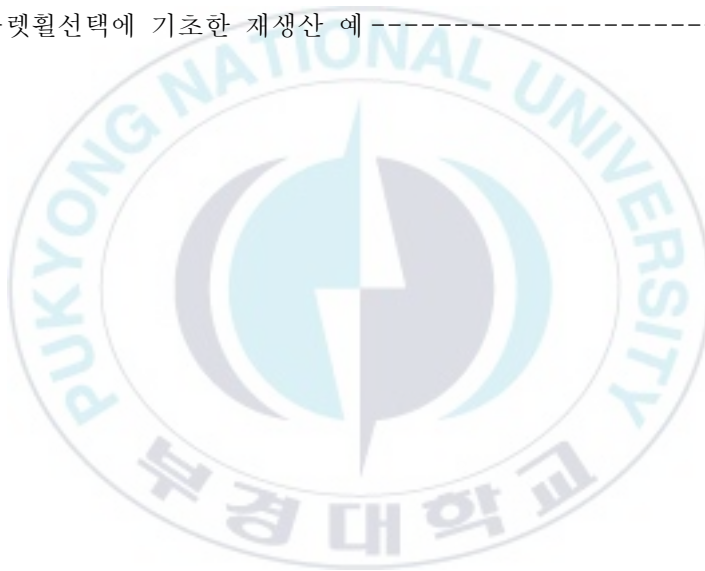
표 목차

[표 1] 룰렛휠선택에 기초한 재생산 예 -----	20
[표 2] 방법1 결과 분석 -----	24
[표 3] 방법2 결과 분석 -----	25
[표 4] 방법3 결과 분석 -----	26
[표 5] 평균 CPU-Time -----	28



그림 목차

[그림 1] 본 시스템의 기본 구조 -----	3
[그림 2] 시스템의 구조 -----	8
[그림 3] LINGO 입력창 -----	14
[그림 4] 예제의 결과 -----	15
[그림5] 롤렛휠선택에 기초한 재생산 예 -----	21



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

자원의 재활용은 현재 전 산업분야에 걸쳐 매우 큰 주목을 받고 있으며, 그 중요성은 환경에 대한 관심이 높아지는 현대사회의 추세에 발맞추어 시간이 흐를수록 더욱 커질 것으로 예상된다.

폐기물의 발생 실태를 살펴보면 총량은 1993년을 정점으로 해서 다시 증가하고 있다. 이는 생활폐기물은 1990년대에 들어 점진적으로 줄어들었으나 사업장폐기물이 매년 10%이상으로 증가하는 현상이 나타나고 있다는데 기인된다. 1인당 생활쓰레기 발생량을 보면 1994년에 1일 1.3kg이었으나, 1995년 쓰레기 종량제의 실시이후 1998년 1일 0.96kg으로 선진국 수준을 보이고 있다.

폐기물처리구조를 보면 매립처리비율이 크게 낮아지고 재활용이 크게 확대되는 한편 소각처리율도 점진적으로 증가하는 추세이다. 즉 1991년에는 생활폐기물 중 89.2%를 매립 처리하였고, 7.9%만을 재활용하였으나, 1998년에는 쓰레기종량제 실시 및 재활용정책 등으로 인하여 매립처리비율이 56.2%로 줄어들었으며, 재활용률이 34.9%로 증가하는 등 바람직한 폐기물처리구조로 변화하고 있다.

폐기물의 처리실태를 보면 생활폐기물의 수거 운반 및 처리업무는 자치단체가 담당하고 있으며, 자치단체 조례에 따라 업무의 일부를 민간에 위탁하여 수행하고 있다. 이러한 수집 운반체계와 병행하여 재활용품 분리수거체계가 별도로 운영되고 있는데, 수익성 높은 폐지 고철류 등은 민간업체가 주로 수거하며 폐플라스틱 등 경제성이 낮은 재활용품은 자치단체가 수거하여 보관장이나 집하선별장으로 운송하여 민간에 판매하거나 한국자원재생공사의 재활용시설로 운반하는 형태로 처리되고 있다.

폐기물의 재활용 현황을 보면 먼저 폐지는 쓰레기종량제로 인한 분

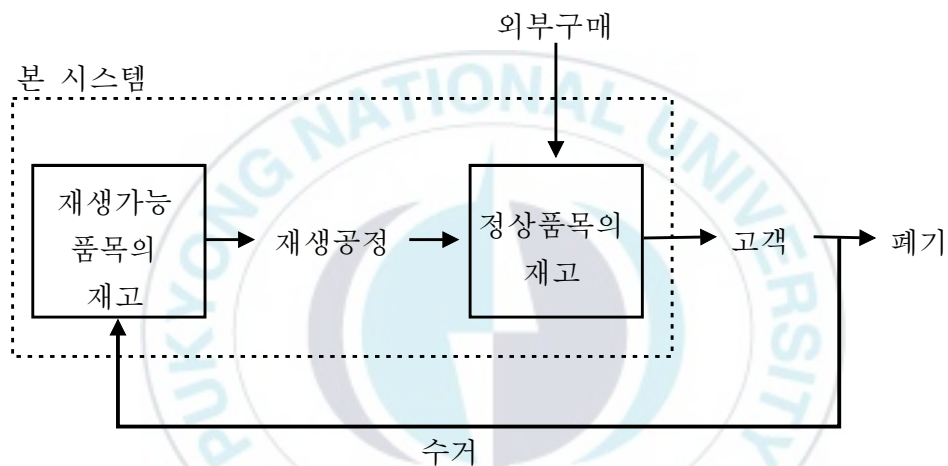
리수거제도 정착으로 회수량이 증가하여 폐지업체의 국내 폐지 사용율도 증가하고 있다. 페타이어는 타이어 제조업체를 중심으로 구성된 대한타이어공업협회가 전국 22개 수거업자를 통하여 회수하여 재활용업체에 납품하고 있다. 폐윤활유는 제조업체를 중심으로 구성된 한국윤활류공업협회가 23개 정제업체를 통해 회수 재활용하고 있다.

폐기물재활용의 촉진시책을 보면 원료상용에 있어 재활용가능 자원의 이용이 필요한 자원재활용업종에 종사하는 재활용지정 사업자중 일정규모이상의 중점관리대상사업자는 폐자원의 일정비율로 사용하게끔 하고 있다. 또한 재활용품제품의 소비확대를 촉진하기 위해 ‘자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률’ 제30조 및 ‘공공기관의 폐기물 재활용 촉진을 위한 지침(국무총리훈령 제264조; 92년 9월 제정, 국무총리훈령 제381조; 99년 3월 3차 개정)’에 의거 중앙행정기관, 지방자치단체, 정부투자기관, 출연 출자기관 특별법인 등 공공기관에 대해서는 환경부장관이 공고하는 재활용품을 우선적으로 구매 사용하도록 하고 있다. 한편 민간의 재활용품 소비확대를 위해 백화점에 10㎡이상의 재활용품전용매장을 설치하거나 유사일반매장에서 10개 품목이상 취급을 의무화하였다.

본 연구에서는 이러한 사회적 요구에 부응하기 위해 제품이나 자재의 재활용에 관련된 시스템의 운영 문제를 다루고자 한다. 본 연구에서 다루고자 하는 품목은 고객이 사용한 이후 수집되어 일정한 복원작업을 거치면 재활용이 가능해지는 품목이다. 이러한 품목의 예는 주로 생산시스템의 원료공급부서에서 많이 볼 수 있다. 대표적인 예로는 음료수나 주류 제품에 사용되는 병을 들 수 있다. 음료수나 주류를 담았던 병은 내용물이 소비된 후 고객으로부터 수집되어 세척 및 소독 공정을 거친 다음 재사용된다. 이 때 재사용되는 병은 신규 구입한 병과 품질 면에서 차이가 없다. 그 외에도 폐 금속이나 종이도 수집되어 일정한 공정을 거치면 새로운 제품의 생산을 위한 원료로 사용될 수 있다.

이러한 시스템의 구조를 그림으로 설명하면 [그림 1]과 같다. 우선 정상 품목(예를 들어 깨끗한 병, 정상적인 펄프 등)은 일정한 수요에 따라 고객에게 공급된다. 물론 여기서 고객은 일반적인 소비자보다는 음

료 생산 공정이나 종이 생산 공정과 같은 후속 공정인 경우가 많다. 최종 고객(실제 소비자)이 사용한 품목 중의 일부는 폐기되고 나머지는 재사용을 위해 수집되어 공급자에게 돌아간다. 수집된 재활용품은 주어진 절차에 따라 처리된 후 정상제품과 같이 취급되어 동일한 과정이 반복되는 것이다. 그런데 이 과정에서 사용된 품목의 일부는 수집되지 못하고 폐기되므로 수요를 충족시키기 위해서는 외부로부터 신품의 공급도 필요해진다.



[그림 1] 본 시스템의 기본 구조

본 연구의 목적은 이러한 시스템의 총운영비용을 최소화해주는 최적의 운영정책을 찾는 것이다. 이 운영정책에는 외부로부터 신규 구매하는 품목에 대한 주문정책 및 재생 공정의 운영정책이 포함되어야 한다. 즉, 본 연구에서는 시스템을 최적화하기 위한 신품 구매정책과 재생공정 운영정책을 동시에 결정하는 것을 목표로 한다.

그런데 이 과정에서 기존의 연구들은 재생용품의 수집률, 정상품의 수요량 등 모든 시스템 파라미터들이 고정되어 있는 상황을 다루고 있으나, 실제로는 이러한 시스템 파라미터들이 일정한 값을 유지하는 것은 비현실적이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 현실적 상황을 고려하여 시스템의 최

적 운영정책(즉, 신제품 구매정책과 재생공정 운영정책)을 결정하고자 한다. 즉, 기존 재활용 시스템의 이익구조를 개선할 뿐 아니라 장기적으로는 자원의 재활용 비율을 높여 환경문제의 해결에도 도움을 주고자 하는 것이 본 연구의 궁극적인 목표이다.

1.2 기존 연구 분석

여러 학자들이 본 연구와 관련된 재고모형을 연구하였으며, 관련연구에 대한 Survey 논문으로 Guide 등(1997), Fleischmann 등(1997), van der Lann 등(1999), Guide(2000) 등이 있다. 이 Survey 논문에 의하면 기존 연구들은 확정적 모형과 확률적 모형으로 분류될 수 있다.

가장 먼저 발표된 확정적 모형은 Schrady(1967)의 연구이다. 이 연구에서는 수요 및 회수율이 일정하고, 외부구매 및 재생공정의 리드타임은 고정되어 있는 시스템을 다루었다. 외부주문 및 재생공정에 대한 고정비용과 재생대상품목 및 정상품목에 대한 재고유지비용을 고려한 모형을 통해 로트크기를 고전적인 EOQ 형식으로 구하였다.

Nahmias and Rivera(1979)는 재생공정의 작업속도가 유한한 경우로 Schrady의 모형을 변형하였다. 또한 Mabini 등(1992)은 품질관련 제약조건과 다품목을 고려한 모형을 제시하였다.

Richter(1996a, b)도 약간 변형된 모형을 제안하였다. 이 모형에서는 수집된 재활용품이 재생공장으로 바로 가지 않고 한 장소에 모아진 다음 각 수집기간 말에 재생공정으로 이동한다. 이 수집기간은 재생공정의 재생작업주기와 일치한다. 이 재생작업주기는 재생배치 몇 개와 이어지는 외부주문 몇 개로 구성되어 있다. 이 경우 수집된 재활용품의 재생작업이 한 수집기간만큼 지연되므로 추가적인 재고유지비용이 발생하게 된다.

Teunter(2001)는 Schrady(1967)의 모형을 두 가지 방향으로 확장하였다. 한 가지는 정책의 일반화로서 한 주기 안에 P회의 신제품제조배

치와 R회의 재생배치가 포함되는 정책을 사용하였다. 두 번째는 앞선 연구들이 신품과 재생품을 동일한 품질로 간주하여 그 재고유지비용이 동일하다고 가정한데 반해 두 종류의 재고유지비용이 존재하는 상황을 분석하였다. Koh 등(2002)은 Nahmias and Rivera(1979)의 연구를 일반화하였다. 이 연구에서는 각 파라미터의 대소 관계에 따라 문제를 4가지 그룹으로 분류하고 각 그룹에 대해 단위시간당 총비용 모형을 개발한 다음 최적 해를 구하는 절차를 제시하였다. Teunter(2004)는 Koh 등(2002)의 연구가 갖는 문제점을 지적하고 그것을 해결한 새로운 모형을 제안하였다.

수요와 재할용품의 수집량이 확률적 프로세스를 따르는 확률적 모형도 확정적 모형과 마찬가지로 널리 연구되어 왔다. Cho와 Palar(1991)는 멀티 유닛 시스템을 위한 최적의 유지, 교체 모형을 연구하였다. Cohen 등(1980)은 수집되어 곧바로 재사용될 수 있는 제품에 대해 재생가능 품목의 재고와 정상 제품의 재고를 동시에 고려하는 시스템을 연구하였다. 그들은 주어진 기간 내에 만들어진 제품이 고정된 리드타임 후에 일정비율로 수집된다고 가정하였다. 이후 그들의 시스템은 Kelly와 Silver(1989)에 의해 수집되는 재할용품의 양이 일정하지 않은 시스템으로 변경되었다.

Cohen의 모델과는 대조적으로 Heyman(1977)은 재생가능 품목의 재고와 정상 제품의 재고를 별개로 다루는 시스템을 다루었다. Simpson(1978)은 일정 기간동안의 재생가능 품목의 재고 문제에 대한 최적해를 증명하였다. Muckstadt와 Isaac(1981)은 리드타임이 존재하는 재할용 설비의 계속적인 검토(review) 모델을 고려하였다. 그들의 연구에서 수요와 재생용품의 수집량은 포아송 분포를 가정하였다. 이후 van der Lann 등(1996a)은 더 일반적인 네 개의 제어 파라미터를 가진 모델을 제시하였고, 그들(1996b)은 재할용 가능 제품의 재고 모형에 대한 두개의 평균비용 근사값을 개발하였다. 이후 van der Lann 등(1997, 1999a, 1999b)은 PUSH와 PULL 처리 방법에 대한 다양한 생산/재생산 시스템을 연구하였다.

대부분의 확정적 모형은 재생가능 제품의 수집량과 수요를 고정된

값으로 가정했다. 그러나 일반적으로 이 가정은 비현실적이다. 예를 들면 음료 회사에서 병을 공급하는 부서는 새로운 병을 만드는 곳으로부터 구입하거나 사용되고 수집된 재활용 병을 어떤 처리과정을 거쳐 다시 사용하게 된다. 이러한 경우 그 부서는 재활용 병의 수집량과 음료 생산량을 예측한다. 따라서 이것은 확정적 모형을 가정할 수 있다. 그러나 그 양은 일정하지 못하다.

Richter와 Sombrutzki(2000)는 처음으로 이 문제를 다루었다. 그들은 문제를 풀기 위해 Wagner와 Whitin(1958)의 'the dynamic programming approach'를 확장한 'the reverse Wagner/Whitin model'를 사용하였다. 이후 Richter와 Weber(2001) 그리고 Richter와 Gobsch(2003)은 유사한 모형의 연구를 하였다. 그러나 그들의 연구는 'the dynamic programming approach'를 사용하기 위해 두 가지 가정을 사용하였다. 첫 번째 가정은 재생가능 제품의 수집량이 계획기간 초기에 전체 수요 이상의 양이 미리 수집되어 있고 더 이상 수집되지 않는 것이고, 두 번째 가정은 계획 기간 중 각 기간마다 재생가능 제품의 처리 공정과 정상 제품의 구입이 동시에 발생할 수 없다는 것이다.

이 연구는 위와 같은 까다로운 가정들을 제거하는 것이다. 이것은 재생가능 용품의 수집량과 정상 제품의 수요를 알고 있지만 고정된 것이 아니며, 더욱이 재생가능 용품의 수집량에 대한 제한이 없다는 것이다. 그리고 재생용품의 처리 공정과 정상제품의 구입이 동시에 발생 가능하다. 이러한 문제를 풀기 위해 'a mixed integer linear programming model'을 제안하고, LINGO 소프트웨어와 유전알고리즘을 사용한다.

1.3 연구 내용

본 연구는 재할용품과 신품의 통합관리 시스템의 최적운동을 위한 동적계획 방법론을 다루었다. 이 문제를 해결하기 위해 두 가지 방법을 제시하였고, 비교 분석하였다. 본 논문의 2절에서는 방법론에 관한 모형을 설계하고, 각 부호와 수식에 대한 설명을 하였다. 제 3절에서는 2절에서 다룬 모형의 문제를 LINGO 소프트웨어를 이용하여 최적해를 찾아보고, 예제를 통해 그 해의 우수성에 대해 알아보았다. 제 4절에서는 2절에서 다룬 모형의 문제를 LINGO가 아닌 복합유전알고리즘을 사용하여 해를 찾아보았다. 마지막으로 5절에서는 각 방법들을 비교 분석하여 결론을 제시하였다.

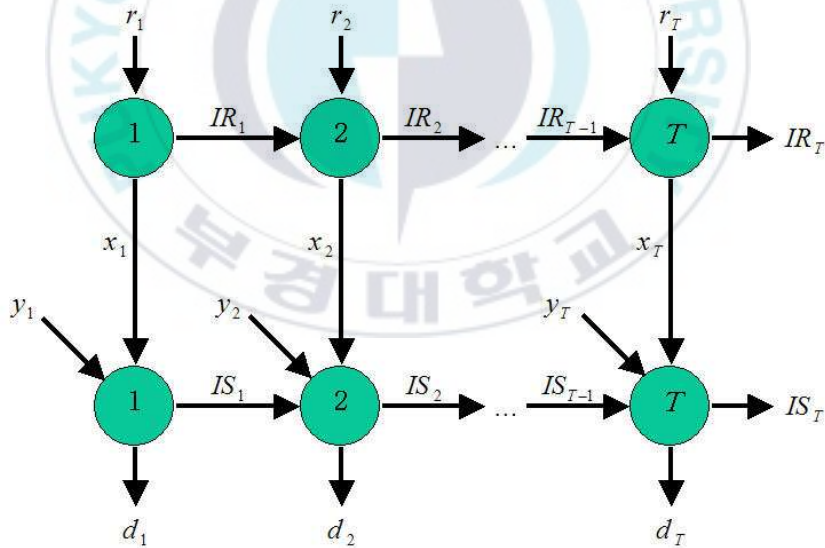


2. Mixed Integer Linear Programming Model

이 절에서는 재생가능 제품의 동적 로트 크기 문제를 풀기 위한 'mixed integer linear programming'을 소개한다.

2.1 부호설명

본 연구의 시스템은 [그림 2]와 같다. 이에 사용되는 부호는 다음과 같으며, 부호는 변수(variables)와 모수(parameters)로 나눌 수 있고, 그중 모수에는 다음과 같은 것들이 있다.



[그림 2] 시스템의 구조

- t : 시점
 T : 계획 기간($t = 1, 2, \dots, T$)
 r_t : 시점 t 에 수집된 재생가능 제품의 양
 C_{h1} : 재생가능 제품의 재고 유지비용
 C_{h2} : 정상제품의 재고 유지비용
 C_o : 정상제품의 주문 비용(고정비)
 C_s : 재생공정의 setup 비용
 C_p : 새로 주문한 제품의 추가 비용(=새로 구입한 제품의
 구입비용 - 수집 비용과 재생 비용의 합)
 d_t : 정상제품의 수요

변수에는 독립변수와 종속변수가 있으며, 그중 의사결정변수 (decision variables)인 독립변수들은 다음과 같다.

- x_t : 시점 t 에서의 재생 량
 y_t : 시점 t 에서의 새로 구입한 주문 량

독립변수의 값이 정해지면 그에 따라 값이 결정되는 종속변수들은 다음과 같다.

- IR_t : t 시점 말에서의 재생가능 제품의 재고 수준
 IS_t : t 시점 말에서의 정상제품의 재고 수준
 u_t : 만약 $x_t=0$ 이면 0, 아니면 1
 v_t : 만약 $y_t=0$ 이면 0, 아니면 1

2.2 가정

본 연구에서 모형을 개발하기 위해 사용된 가정에는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 모든 활동은 매 시점 초기에 발생한다. 즉, 제품의 구입뿐만 아니라 고객에게 배달되는 것도 초기에 발생하며, 시점 말에 재고가 있었다면 초기에도 그 재고가 나타난다.
- (2) 정상제품의 동적 수요는 알고 있다.
- (3) 고객으로부터 수집되는 재생가능 제품의 동적 수집량은 알고 있다.
- (4) 재생가능 제품의 계획 기간 초기량은 없다. (만약 실제 상황에서 계획 기간의 초기에 재고가 존재한다면, 이것은 재생가능 제품의 초기 수집량과의 합으로 나타낸다. 즉, r_1 .)
- (5) 정상제품의 계획 기간 초기 재고량은 없다. (비록 정상제품의 초기 재고가 있다 하더라도 초기 수요량에서 초기 재고량을 감소시킴으로서 이 가정은 유지시킬 수 있다.)
- (6) 모든 비용 모수는 고정되어 있고 알고 있다.
- (7) 정상제품의 구입 리드타임과 재생 공정의 setup타임은 알고 있으며 고정되어 있고 모형에서는 그 시간들을 고려하지 않는다.
- (8) 정상제품의 수요는 항상 만족되어야 한다.

2.3 수리모형

위와 같은 부호와 가정을 사용하여 계획 기간 동안 전체 비용을 최소화 하는 'mixed integer linear programming(MILP)'로 나타내고자 한다. 그 모형은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \{ C_s u_t + C_{h1} IR_t + C_o v_t + C_p y_t + C_{h2} IS_t \} \quad (1)$$

subject to

$$IR_{t-1} + r_t - x_t = IR_t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (2)$$

$$\text{where } IR_0 = 0,$$

$$IS_{t-1} + x_t + y_t - d_t = IS_t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (3)$$

$$\text{where } IS_0 = 0,$$

$$x_t \leq R u_t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (4)$$

$$\text{where } R = \sum_{t=1}^T r_t,$$

$$y_t \leq D v_t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (5)$$

$$\text{where } D = \sum_{t=1}^T d_t,$$

$$x_t, y_t, IR_t, IS_t \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad \text{and} \\ u_t, v_t = 0 \text{ or } 1.$$

수식 (1)은 계획 기간 동안 이 문제의 전체 비용을 최소화하기 위한 목적식이다. 여기에는 재생 공정의 setup 비용과 재생가능 제품의 재고 유지비용, 정상제품의 주문비용, 주문에 따른 추가 비용, 그리고 정상제품의 재고 유지비용이 포함되어 있다. 수식 (2)와 (3)은 각각 재생가능 제품의 재고와 정상제품의 재고량을 보존하는 수식이다. 수식 (4)에 의해 재생공정이 발생(즉, $x_t > 0$)할 때마다 setup 비용이 추가되어 진다(즉, $u_t = 1$). 이와 비슷하게 수식 (5)도 정상제품의 구매가 발생(즉, $y_t > 0$)할 때마다 주문비용이 추가되어 진다(즉, $v_t = 1$).

이전 연구(Richter and Sombrutzki, 2000, Richter and Weber, 2001 and Richter and Gobsch, 2003) 방법인 DP(Dynamic Programming)로 이 문제를 풀어 보려 하였으나 DP를 기본으로 하는 효율적인 접근 방법을 찾을 수가 없었다. 그래서 위에서 언급한

MILP(Mixed Integer Linear Programming) 모형을 고안하였다. 비록 이 시스템에는 $2T$ 개의 이진변수가 있지만 상용 최적화 소프트웨어 LINGO를 사용하여 최적해를 찾을 수 있었다. 또한 LINGO를 사용하지 않고서 해를 구하기 위하여 복합유전알고리즘을 이용하여 최적해에 가까운 해를 찾을 수 있었다.



3. LINGO를 이용한 방법

3.1 LINGO로 해 찾기

간단한 예제를 통해 위에서 제시한 MILP모형을 LINGO를 이용하여 풀어보았다. 예제는 다음과 같다.

$$T = 5, r = (43, 27, 33, 46, 19), d = (92, 79, 75, 112, 109), \\ C_s = 50, C_{h1} = 1, C_o = 40, C_p = 3, \text{ and } C_{h2} = 2.$$

이 자료를 바탕으로 LINGO로 해를 찾아보면 다음과 같은 해를 얻을 수 있다. 303번의 반복을 통해 해가 얻어지며 해를 찾는데 걸리는 시간은 1초 이하이다. 해는 다음과 같다.

$$x = (0, 70, 0, 79, 19), y = (101, 0, 75, 33, 90) \\ IR = (43, 0, 33, 0, 0), \text{ and } IS = (9, 0, 0, 0, 0).$$

위 예제를 풀기 위한 LINGO 입력창은 [그림 3]과 같다.

[그림 3] LINGO 입력창

```
MODEL:

SETS:
    PERIOD: REM_VOL, PUR_VOL, REP, SER,
            RET, DEM, R_SIGN, P_SIGN;
ENDSETS

DATA:
    PERIOD = 1..5;
    RET = 43, 27, 33, 46, 19;
    DEM = 92, 79, 75, 112, 109;
ENDDATA

MIN = @SUM(PERIOD(I): 40 * P_SIGN(I) + 50 * R_SIGN(I)
          + 3 * PUR_VOL(I) + 2 * SER(I) + 1 * REP(I)
        );

@FOR(PERIOD(I): REM_VOL(I) < 500 * R_SIGN(I));
@FOR(PERIOD(I): PUR_VOL(I) < 500 * P_SIGN(I));

@FOR(PERIOD(I): @BIN(P_SIGN(I)));
@FOR(PERIOD(I): @BIN(R_SIGN(I)));

REP(1) = RET(1) - REM_VOL(1);
SER(1) = PUR_VOL(1) + REM_VOL(1) - DEM(1);

@FOR(PERIOD(I) | I #GE# 2: REP(I - 1) +
    RET(I) - REM_VOL(I) = REP(I)
    );

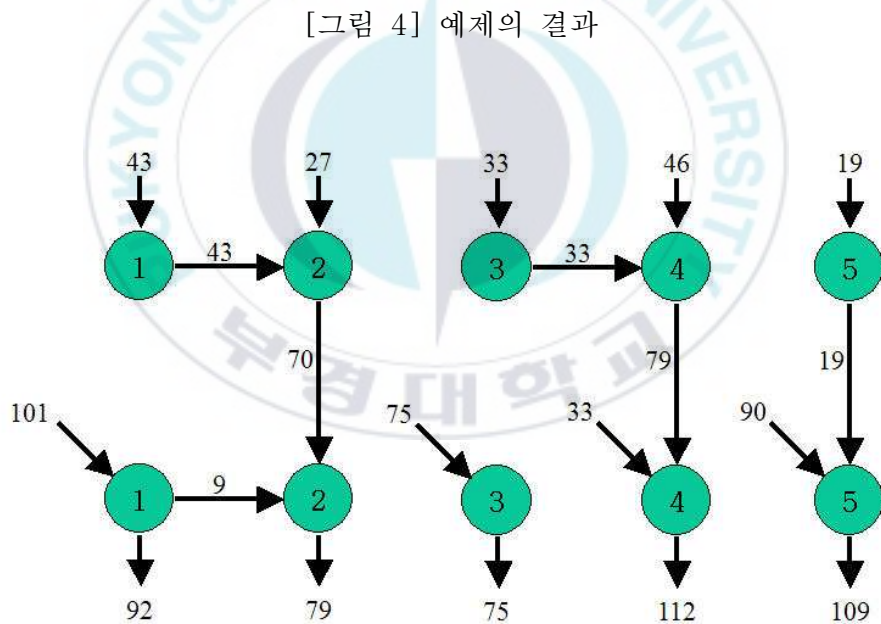
@FOR(PERIOD(I) | I #GE# 2: SER(I - 1) +
    REM_VOL(I) + PUR_VOL(I) - DEM(I) = SER(I)
    );

END
```

3.2 LINGO 결과 분석

LINGO로 풀어본 예제를 앞서 제시한 시스템의 구조로 나타내면 [그림 4]과 같다.

계획 기간 중 매 기간마다 재생가능 제품의 수집량이 틀린 경우이지만 최적해를 찾을 수 있었다. 또한 시점4, 5에서는 재생가능 제품에 대한 재생 공정과 정상제품의 구입이 동시에 발생함을 볼 수 있다. 이러한 해는 이전연구인 “the reverse Wagner/Whitin model”에서는 구할 수 없는 것이다.



4. 복합유전알고리즘(Hybrid genetic algorithm)을 이용한 방법

3절에서 LINGO를 이용하여 최적해를 찾아보았다. LINGO에서 얻은 결과를 보면 반복이 303번으로 문제를 푸는데 얼마나 복잡한가를 잘 보여준다. 위 예제는 계획 기간 $T=5$ 인 문제이지만 이보다 기간이 길어지는 경우 반복은 더 많아지게 된다. 만약 LINGO가 없다면 이 문제를 어떻게 풀 것인가? 이번 절에서는 LINGO를 사용하지 않고 해를 찾기 위해 복합유전알고리즘을 이용한 방법을 제시한다.

4.1 유전알고리즘

유전알고리즘은 Holland(1997)에 의해 연구되기 시작하여 많은 조합 최적화문제에 응용된 일종의 인공지능기법으로서, 자연의 진화과정을 모방하여 개발한 탐색알고리즘으로 최근에는 스케줄링 분야에 활발하게 응용되고 있다. 유전알고리즘을 적용하기 위해서는 대상문제의 특징에 맞는 알고리즘, 관련된 여러 조정변수들, 유전인자의 유전염색체(chromosome)의 표현방법, 적합도(fitness) 평가함수, 모집단의 초기화 방법, 염색체 선택전략 등을 결정해야 한다. 여기서는 우선 유전알고리즘의 절차를 기술하고 위의 여러 결정항목들을 본 문제의 특성에 부합되도록 수정된 내용을 소개한다.

4.2 표현방법(Representation)과 초기해 생성

유전알고리즘을 적용하기 위해서는 문제의 해가 개체표시자인 염색체로 적절하게 표현되어야 하며 이는 유전알고리즘의 탐색성과 확장성에 있어서 중대한 영향을 미친다. 최적해를 찾기 위해 우리가 구하고자 하는 결정변수는 두 가지다. 하나는 재생가능 제품의 기간별 처리량과 또 다른 하나는 정상제품의 구입량이다. 두 가지 결정 변수를 다 찾아야만 최적해를 알 수 있지만 재생가능 제품의 최적 처리량만 알면 정상제품의 구입량은 Wagner와 Whitin(1958)의 알고리즘을 적용해 찾을 수 있다. 그들의 연구는 재생가능 제품을 제외한 정상제품의 구입량만을 고려한 연구이다. 따라서 유전알고리즘을 이용하여 최적의 재생가능 제품의 기간별 처리량을 결정한 후 그 것을 수요에서 빼면 단순히 정상제품의 구입량만을 고려하는 문제로 바꿀 수 있다. 따라서 유전알고리즘과 Wagner와 Whitin(1958)의 알고리즘을 접목한 복합유전알고리즘으로 최적해를 찾을 수 있다.

유전알고리즘을 사용하기 위해 우선 염색체 표현 방법을 결정해야 한다. 이 논문에서는 총 3가지의 표현 방법을 제시하고, 각 방법의 결과를 LINGO의 최적해와 비교하여 분석한다.

4.2.1 방법1(실수로 표현)

앞서 언급한 바와 같이 재생가능 제품의 기간별 처리량에 대한 값만 찾으면 된다. 방법1의 절차는 다음과 같다.

단계1. 0과 1사이의 랜덤한 실수를 계획기간 수만큼 생성한다.

예) (0.021, 0.721, 0.231)

단계2. 생성된 값이 0.5 이하이면 처리량은 0, 아니면 그 값에 0.5를

빼고 2를 곱하여 준다.

예) $(0, 0.442, 0)$

단계3. 시점1에서부터 차례대로 재생가능 제품의 재고량에 단계2에서 구한 값을 곱하여 준다.

예) 수집 량이 $(10, 15, 20)$ 인 경우

$$(0) \times (10) = (0) \quad (1)$$

$$(0, 0.442) \times (10, 25) = (0, 11) \quad (2)$$

$$(0, 0.442, 0) \times (10, 25, 34) = (0, 11, 0) \quad (3)$$

단계3의 (2)에서 시점2에서의 재고량은 25가 되고, (3)의 시점3에서의 재고량은 시점2의 처리량을 제외한 34가 된다. 이렇게 구한 값을 수요에서 빼면 Wagner와 Whitin(1958)의 알고리즘을 적용하여 기간별 구입량과 재생 처리량을 구할 수 있다.

4.2.2 방법2(이진수로 표현1)

방법2의 절차는 다음과 같다.

단계1. 계획기간만큼 0과 1의 이진수를 랜덤하게 생성한다.

예) $(0, 1, 0, 0, 1)$

단계2. 단계1에서 생성된 수가 0이면 처리량은 0, 아니면 다음 1이 나오기 전까지의 수요 내에서 가진 재고량을 전부 재생처리한다.

예) 수요 $(35, 30, 45, 50, 40)$, 수집 량 $(15, 20, 20, 15, 15)$

재생처리량은 $(0, 35, 0, 0, 40)$

단계2에서 유전자 정보가 최초 1인 시점은 2고, 다음 1이 나온 시점은 5다. 시점2에서 가진 재고량은 35이고 그때의 수요는 30이므로 재

고량이 소요보다 더 크다. 다음 시점에서의 누적 수요량은 75로 시점2에서 가진 재고량보다 크므로 시점2에서의 처리량은 가지고 있는 전체 재고 35가 된다. 만약 가지고 있는 재고량이 다음 1이 나오는 시점 전까지의 누적 수요보다 크다면, 누적 수요만큼만 처리한다.

4.2.3 방법3(이진수로 표현2)

방법3의 절차는 다음과 같다.

단계1. 계획기간만큼 0과 1의 이진수를 랜덤하게 생성한다.

예) (0, 1, 0, 0, 1)

단계2. 단계1에서 생성된 수가 0이면 처리량은 0, 아니면 다음 1이 나오기 전까지의 수요 내에서 가진 재고량을 수요만큼만 처리한다.

예) 수요(35, 30, 45, 50, 40), 수집량(15, 20, 20, 15, 15)
재생처리량은 (0, 30, 0, 0, 40)

방법3은 방법2와 매우 비슷하다. 단지 가진 재고량을 어떻게 사용할 것인가가 다르다. 방법2는 가진 재고량을 남김없이 다 사용하는데 비해 방법3은 다음 처리를 위해 수요량만큼 처리하고 나머지는 재고로 남겨둔다. 만약 위 예제에서 시점2의 재고량이 시점2의 수요보다 적었다면 가진 재고량을 모두 처리해야 한다.

4.3 목적함수와 적합도함수, 재생산(Reproduction)

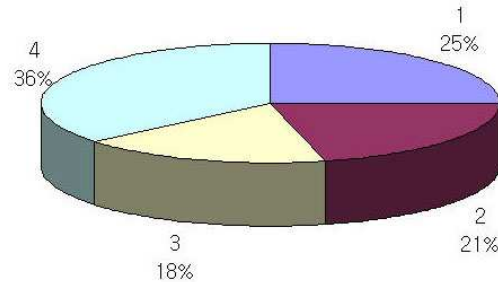
이 논문에서 다루고 있는 문제는 비용의 최소화 문제이다. 목적함수(즉, Z_i)는 2.3절의 수식(1)이고, 적합도함수(즉, F_i)는 목적함수로 계산된다. 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 표현해야 함으로 목적함수를 변형하여 사용한다. 이 논문에서 사용된 적합도함수는 목적함수의 역수로 계산한다.

$$F_i = \frac{1}{Z_i} \quad (6)$$

수식 (6)에서 얻어진 적합도를 바탕으로 재생산이 이루어진다. 이 논문에 사용된 방법은 사용자에게 폭넓게 인정되고 있는 방법인 룰렛휠선택(roulette wheel selection)을 사용하였다.

[표 1] 룰렛휠선택에 기초한 재생산 예

i	적합도	선택확률(%)
1	$\frac{1}{1000} = 0.00100$	25
2	$\frac{1}{1200} = 0.00083$	21
3	$\frac{1}{1400} = 0.00071$	18
4	$\frac{1}{700} = 0.00143$	36
합계	0.00397	100



[그림 5] 룰렛휠선택에 기초한 재생산 예

4.4 유전연산자(Genetic Operator)

유전연산자는 알고리즘의 성능에 결정적인 영향을 미치므로 문제의 특성을 감안하여 우수한 해를 효율적으로 탐색할 수 있도록 정의되어야 한다. 이러한 연산자는 크게 두 개의 부모개체로부터 자손개체를 생성하는 이원연산자(binary operator)인 교차변이와 하나의 부모개체로부터 생성되는 일원연산자(unary operator)인 돌연변이가 있다.

4.4.1 교차변이

본 연구에서 사용한 교차변이는 한 개의 교차점을 중심으로 두 부모의 염색체를 교환하는 것이다. 한 세대에서 각 부모개체마다 $[0, 1]$ 의 실수를 생성해서 그 수가 교차변이 확률보다 낮으면 그 부모개체를 선택하고 다음 두 번째 부모 개체가 선택되면 교차변이가 일어난다. 방법 3을 예로 들면 부모1의 염색체가 (0, 1, 0, 0, 1)이고, 부모2의 염색체가 (1, 1, 0, 0, 0)이라고 할 때 교차점이 3이면 자손1은 염색체가 (0, 1, 0, 0, 0)이고, 자손2는 (1, 1, 0, 0, 1)이 된다. 이 방법은 교차점을

랜덤하게 선별하여 부모의 염색체를 절반씩 그대로 물려받는 것이다.

4.4.2 돌연변이

이 연산자는 일반적으로 부모의 염색체에서 임의의 한 인자를 선택하여 그 유전인자의 특성을 임의로 바꾸어 자손을 생성하는 방법이다. 각 부모의 염색체마다 $[0, 1]$ 의 실수를 생성해서 돌연변이 확률보다 적은 경우 돌연변이를 발생시킨다. 이때 발생하는 돌연변이는 염색체 표현방법에 따라 다르게 적용한다. 방법1의 경우 돌연변이가 발생하면 염색체가 0.5이하인 경우 0.5를 더하여 주고, 0.5보다 큰 경우는 다시 랜덤한 실수를 생성한다. 방법2와 방법3은 염색체가 0일 때 1로 바꾸어 주고, 1일 때 0으로 바꾸어 준다.

4.5 Stopping-Rule

유전알고리즘을 사용할 때 전체 진행의 최대 세대수를 제한하여 사용한다. 예를 들면 총 세대수를 1000세대로 하고 그 사이에서 가장 좋은 해를 선택하게 된다. 그러나 이 논문에서는 그러한 방법을 사용하지 않고 일정 세대 동안 해가 좋아지지 않으면 자동으로 진행을 멈추는 stopping-rule을 적용하였다. 그 수는 50으로 정하여 적용하였으며 이 방법을 적용함으로써 전체 진행 시간을 크게 줄이고서도 좋은 해를 얻을 수 있었다.

5. 결과 분석

5.1 최적해 분석

이 절에서는 각 LINGO와 유전알고리즘의 결과를 비교해 본다. 아래 표들은 LINGO로 얻은 최적 값과의 백분율 오차를 분석한 것이다. 각 계획 기간별 문제는 $30 \leq r_t \leq 50$, $80 \leq d_t \leq 100$, $1 \leq C_{h1} \leq 5$, $1 \leq C_{h2} \leq 5$, $40 \leq C_o \leq 60$, $40 \leq C_s \leq 60$, $1 \leq C_p \leq 3$ 범위 내에서 랜덤하게 10개의 문제를 생성하여 각 문제 별로 10번씩 반복하여 실험한 결과이다.

오차는 $((GA\text{최적비용} - LINGO\text{최적비용}) / LINGO\text{최적비용}) \times 100$ 으로 계산되고 그 값들에 대한 평균 오차와 표준편차, 최소치, 그리고 최대치를 나타낸다.

[표 2] 방법1 결과 분석

Pro.	Period	5	10	15	20	25	30
1	Mean	1.65	3.00	3.55	3.99	4.23	5.83
	SD	0.84	1.46	1.15	0.90	0.80	1.44
	Min	0.45	0.94	2.29	1.93	3.25	3.14
	Max	2.81	5.30	5.40	4.83	6.03	7.60
2	Mean	1.48	3.40	4.07	3.40	5.85	7.18
	SD	0.73	1.45	1.38	1.31	1.69	1.98
	Min	0.33	1.60	2.32	1.86	3.89	4.24
	Max	2.75	5.89	6.55	5.72	8.42	10.14
3	Mean	1.54	4.17	4.34	4.22	6.17	6.33
	SD	1.45	1.36	1.35	1.80	1.89	1.50
	Min	0.13	1.33	2.27	2.42	3.72	4.51
	Max	4.61	6.01	7.24	8.74	10.06	8.77
4	Mean	2.71	3.01	3.10	4.02	5.22	6.81
	SD	1.49	1.03	0.73	1.37	1.09	2.58
	Min	0.95	1.53	1.81	2.59	3.40	4.33
	Max	5.07	4.55	3.81	7.34	7.19	13.10
5	Mean	2.92	3.45	3.61	5.46	5.83	6.05
	SD	1.92	1.37	0.93	0.70	1.99	2.06
	Min	0.26	1.69	2.01	4.25	3.13	3.63
	Max	6.79	6.14	5.10	6.32	8.41	9.69
6	Mean	1.80	2.24	4.75	4.21	5.09	6.09
	SD	0.80	0.87	1.79	0.73	1.24	1.52
	Min	0.66	0.64	3.12	3.42	3.52	3.91
	Max	3.54	3.13	9.39	5.67	7.00	8.62
7	Mean	1.93	2.00	4.27	4.68	5.44	6.59
	SD	1.03	0.63	2.12	1.34	1.95	1.95
	Min	0.26	0.90	1.85	2.96	3.78	4.20
	Max	3.70	2.91	9.06	7.72	10.06	10.84
8	Mean	2.10	3.25	4.37	5.40	5.02	5.36
	SD	1.60	0.61	1.03	1.14	1.70	1.18
	Min	0.70	2.15	3.05	3.95	3.26	3.72
	Max	5.90	4.07	6.79	8.22	8.21	7.48
9	Mean	2.53	2.53	3.57	4.12	4.72	6.12
	SD	1.26	0.85	0.82	1.27	1.34	1.66
	Min	1.01	0.97	2.17	2.45	2.76	3.15
	Max	5.25	4.01	5.24	6.79	7.23	8.42
10	Mean	1.63	2.59	5.06	3.95	5.40	5.86
	SD	0.97	0.99	1.39	1.76	1.32	1.71
	Min	0.49	1.47	2.95	2.11	3.48	3.51
	Max	3.45	4.20	7.27	7.91	8.23	9.13

[표 3] 방법2 결과 분석

Problem	Period	5	10	15	20	25	30
1	Mean	0.00	0.09	0.68	0.57	0.78	1.16
	SD	0.00	0.29	0.20	0.24	0.45	0.29
	Min	0.00	0.00	0.30	0.24	0.25	0.89
	Max	0.00	0.91	0.94	1.05	1.48	1.87
2	Mean	0.39	0.07	0.44	0.68	0.75	1.37
	SD	0.00	0.13	0.12	0.44	0.30	0.50
	Min	0.39	0.03	0.22	0.22	0.33	0.58
	Max	0.39	0.43	0.62	1.37	1.23	2.15
3	Mean	0.51	0.42	0.49	1.08	1.02	0.88
	SD	0.00	0.28	0.26	0.42	0.43	0.22
	Min	0.51	0.33	0.11	0.47	0.47	0.61
	Max	0.51	1.23	0.76	1.82	1.97	1.25
4	Mean	0.05	0.27	0.25	0.64	1.12	1.95
	SD	0.11	0.24	0.18	0.15	0.29	0.41
	Min	0.11	0.20	0.00	0.41	0.67	1.44
	Max	0.27	0.94	0.51	0.87	1.44	2.54
5	Mean	0.00	0.04	0.96	0.66	0.88	1.34
	SD	0.00	0.12	0.15	0.16	0.44	0.44
	Min	0.00	0.00	0.76	0.51	0.45	0.86
	Max	0.00	0.37	1.17	0.92	1.75	2.18
6	Mean	0.00	0.10	0.59	1.25	0.73	1.24
	SD	0.00	0.22	0.39	0.28	0.45	0.30
	Min	0.00	0.00	0.22	0.79	0.03	0.85
	Max	0.00	0.52	1.41	1.59	1.33	1.84
7	Mean	0.08	0.21	0.36	0.46	0.64	0.73
	SD	0.24	0.07	0.35	0.28	0.21	0.20
	Min	0.00	0.19	0.00	0.08	0.27	0.47
	Max	0.77	0.40	1.09	0.94	0.93	1.10
8	Mean	0.00	0.15	0.29	1.26	1.34	0.88
	SD	0.00	0.20	0.36	0.30	0.46	0.38
	Min	0.00	0.00	0.00	0.79	0.64	0.21
	Max	0.00	0.45	0.91	1.65	1.89	1.28
9	Mean	0.00	0.04	0.49	0.98	0.59	0.79
	SD	0.00	0.10	0.42	0.28	0.39	0.33
	Min	0.00	0.00	0.00	0.44	0.10	0.39
	Max	0.00	0.32	1.10	1.30	1.21	1.40
10	Mean	1.11	0.00	0.90	0.61	1.18	1.26
	SD	0.00	0.00	0.47	0.26	0.51	0.42
	Min	1.11	0.00	0.31	0.23	0.62	0.53
	Max	1.11	0.00	1.68	1.11	2.16	1.78

[표 4] 방법3 결과 분석

Problem	Period	5	10	15	20	25	30
1	Mean	4.63	4.27	1.97	1.93	2.33	2.69
	SD	0.08	0.85	0.56	0.46	0.45	0.37
	Min	4.60	3.25	0.76	1.10	1.88	2.17
	Max	4.86	5.53	2.63	2.45	3.41	3.49
2	Mean	1.44	2.25	2.34	2.48	2.41	2.79
	SD	0.00	0.44	0.49	0.38	0.40	0.29
	Min	1.44	1.56	1.63	1.99	1.87	2.39
	Max	1.44	3.09	3.24	3.15	3.15	3.29
3	Mean	2.04	2.85	2.38	2.89	2.31	2.84
	SD	0.78	0.78	0.73	0.47	0.42	0.28
	Min	1.67	1.86	1.27	1.99	1.76	2.45
	Max	3.52	4.45	3.45	3.47	3.01	3.34
4	Mean	4.12	1.42	2.52	2.15	2.51	3.56
	SD	0.64	0.64	0.33	0.58	0.50	0.44
	Min	3.92	0.78	1.85	1.20	1.73	2.85
	Max	5.95	2.80	2.89	3.19	3.49	4.32
5	Mean	6.33	3.73	1.98	2.26	2.63	2.44
	SD	0.00	1.10	0.47	0.41	0.41	0.55
	Min	6.33	2.33	0.82	1.35	1.84	1.89
	Max	6.33	5.16	2.55	2.72	3.17	3.34
6	Mean	4.42	2.04	2.60	2.41	2.12	2.79
	SD	0.47	0.35	0.29	0.49	0.51	0.33
	Min	4.19	1.61	2.28	1.44	1.36	2.22
	Max	5.31	2.61	2.99	3.05	3.09	3.34
7	Mean	4.59	1.89	2.10	1.87	1.97	2.59
	SD	0.00	0.25	0.65	0.79	0.37	0.53
	Min	4.59	1.67	0.87	0.83	1.12	1.88
	Max	4.59	2.32	2.98	3.05	2.36	3.51
8	Mean	2.26	2.33	2.55	2.54	2.95	2.59
	SD	0.32	0.44	0.67	0.52	0.56	0.48
	Min	2.16	1.63	1.38	1.83	2.04	2.06
	Max	3.17	3.01	3.61	3.43	3.75	3.53
9	Mean	1.58	1.36	3.07	2.13	2.25	3.18
	SD	0.67	0.57	0.68	0.48	0.50	0.57
	Min	1.27	0.71	1.86	1.24	1.71	2.55
	Max	2.85	2.69	4.25	2.65	3.11	4.37
10	Mean	3.41	2.68	4.05	1.66	2.18	3.22
	SD	0.24	0.80	0.56	0.69	0.60	0.44
	Min	3.26	1.67	3.13	0.68	1.45	2.53
	Max	3.76	3.70	4.70	2.49	3.19	3.83

[표 2]는 유전자를 실수로 표현한 방법1의 결과이다. 결과를 보면 유전자를 실수로 표현해도 LINGO와 같은 최적해를 찾는 경우가 극히 적은 것을 알 수 있다. 계획기간이 10이하인 경우는 최소값이 1%정도로 해가 꽤좋은 편이나 기간이 늘어날수록 해가 나빠진다. 방법1의 경우 10번 정도의 반복을 통해 가장 좋은 해를 선택한다 하더라도 그리 좋은 결과를 얻을 수 없음을 알 수 있다. 또한 해의 편차가 큰 편으로 반드시 여러 번의 반복을 해야만 어느 정도 괜찮은 해를 보장할 수 있다.

[표 3]은 유전자를 0과 1의 이진수로 표현한 방법2의 결과이다. 결과를 보면 계획기간이 30인 경우도 LINGO와 비교해서 아주 좋은 결과를 보여주고 있다. 평균 오차가 2% 미만이며, 편차또한 적어서 반복을 많이 하지 않아도 좋은 해를 찾을 수 있다. 또한 최소값이 0인 LINGO와 같은 최적해를 찾는 경우도 많은 것을 볼 수 있다. 계획기간 30인 경우도 최대값이 2% 내외로 만족할 만한 결과를 보여주고 있다. 만약 LINGO 없이 문제를 풀어야 할 경우 방법2를 사용해도 LINGO와 거의 같은 결과를 보장할 수 있다.

[표 4]는 방법3의 결과이다. 비록 해의 편차는 적으나 평균값이 대체적으로 방법2보다 높은 것을 볼 수 있다. 또한 LINGO와 같은 최적해를 찾은 경우도 없다. 그렇지만 방법1에 비해 대체적으로 좋은 결과를 보여주고 있다. 계획기간이 30인 경우도 평균값이 3% 내외로 결과가 꽤좋은 편이다.

이상의 결과를 볼 때 방법2가 가장 우수한 것으로 나타났다. 나머지 방법들 또한 꽤좋은 해를 보여주고 있으나 방법2에 비해서는 해의 우수성이 떨어진다. 방법2는 계획기간이 늘어나도 해의 우수성이 보장되고, 또한 해의 편차가 적어 반복을 많이 하지 않아도 좋은 해를 보장할 수 있다.

5.2 CPU-Time 분석

[표 5]는 각 방법들의 결과 도출 시간을 초단위로 나타낸 것이다. 각 방법의 테스트 환경은 AMD Athlon(tm)64 ×2 Dual Core Processor 4200+ CPU와 메모리 2기가의 컴퓨터에서 실험하였다.

LINGO는 계획 기간이 늘어남에 따라 급격히 시간이 늘어남을 볼 수 있다. 계획 기간이 30인 경우는 반복이 많아져서 최적해를 찾는데 상당히 많은 시간이 소요된다. 하지만 유전알고리즘을 이용한 방법들은 계획 기간이 늘어남에도 불구하고 시간의 증가는 크게 나타나지 않는다. 계획 기간을 30까지만 실험하였지만 만약 계획 기간을 늘리면 LINGO로 해를 찾는 것은 훨씬 더 많은 시간이 소요된다. 하지만 유전알고리즘은 짧은 시간 내에 좋은 해를 찾을 수 있다.

[표 5] 평균 CPU-Time

	5	10	15	20	25	30
LINGO	0.0	0.0	2.0	6.0	35.0	116.0
방법1	1.0	1.4	1.8	2.8	4.1	5.0
방법2	0.8	0.9	1.3	1.5	2.0	2.5
방법3	0.8	0.9	1.1	1.2	1.7	1.8

5.3 결론

본 연구는 재활용품과 신품에 대한 통합관리 시스템의 최적운영을 위한 동적계획 방법론을 제시하였다. 최적해 도출을 위해 MILP모형을 제시하고 LINGO 소프트웨어를 이용하였다. 또한 LINGO 소프트웨어를 사용하지 않고서 문제를 해결하기 위해 복합유전알고리즘을 개발하였다. 이 방법들을 제시함으로써 재활용품과 신품의 통합관리 시스템의

최적운영을 가능하게 할 수 있었다. 이는 재활용품과 신품을 동시에 고려하지 못한 이전 연구의 한계를 넘어서서 현실상황과 더욱 비슷한 문제를 해결할 수 있었다.



참 고 문 헌

- [1] Cho, D.I. and Parlar, M., 1991, A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research*, 51, 1-23.
- [2] Cohen, M.A., Pierskalla, W.P. and Nahmias, S., 1980, A dynamic inventory system with recycling. *Naval Research Logistics Quarterly*, 27, 289-296.
- [3] Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.A. and Van Wassenhove, L.N., 1997, Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103, 1-17.
- [4] Guide, V.D.R., 2000, Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18, 467-483.
- [5] Guide, V.D.R., Jayaraman, V. and Srivastava, R., 1997, Repairable inventory theory: Models and applications. *European Journal of Operational Research*, 102, 1-20.
- [6] Gungor, A. and Gupta, S.M., 1999, Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36, 811-853.
- [7] Heyman, D.P., 1977, Optimal disposal policies for a single-item inventory system with returns. *Naval Research Logistics Quarterly*, 24, 385-405.
- [8] Kelly, P. and Silver, E.A., 1989, Purchasing policy of new containers considering the random returns of previously issued containers. *IIE Transactions*, 21, 349-354.
- [9] Kim, J.S., Hur, S. and Shin, K.c. 1998, An algorithm to determine the spare inventory level for repairable-item inventory system with depot spares. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 24, 387-396.

- [10] Kim, J.S. and Shin, K.C. 1993, Algorithm to determine the optimal spare inventory level for repairable-item inventory system, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 19, 81-90.
- [11] Koh, S.G., Hwang, H., Sohn, K.I. and Ko, C.S., 2002, An optimal ordering and recovery policy for reusable items. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 59-73.
- [12] van der Laan, E., Dekker, R. and Salomon, M., 1996a, Product remanufacturing and disposal: A numerical comparison of alternative control strategies. *International Journal of Production Economics*, 45, 489-498.
- [13] van der Laan, E., Dekker, R., Salomon, M. and Ridder, A., 1996b, An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal. *International Journal of Production Economics*, 46, 339-350.
- [14] van der Laan, E. and Salomon, M., 1997, Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. *European Journal of Operational Research*, 102, 264-278.
- [15] van der Laan, E. and Salomon, M., 1999a, An investigation of lead-time effects in manufacturing / remanufacturing systems under simple PUSH and PULL control strategies. *European Journal of Operational Research*, 115, 195-214.
- [16] van der Laan, E., Salomon, M., Dekker, R. and Van Wassenhove, L., 1999b, Inventory control in hybrid systems with remanufacturing. *Management Science*, 45, 733-747.
- [17] Mabini, M.C., Pintelon, L.M. and Gelders, L.F., 1992, EOQ type formulation for controlling repairable inventories. *International Journal of Production Economics*, 28, 21-33.
- [18] Muchstadt, J.A. and Issac, M.H., 1981, An analysis of single item inventory systems with returns. *Naval Research Logistics Quarterly*, 28, 237-254.
- [19] Nahmias, N. and Rivera, H., 1979, A deterministic model for a repairable item inventory system with finite repair rate. *International Journal of Production Research*, 17, 215-221.

- [20] Orlicky, j., 1975, *Material requirements planning*, McGraw Hill, New York.
- [21] Richter, K., 1996a, The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers. *European Journal of Operational Research*, 95, 313-324.
- [22] Richter, K., 1996b, The extended EOQ repair and waste disposal model. *International Journal of Production Economics*, 45, 443-447.
- [23] Richter, K. and Sombrutzki, M., 2000, Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models. *European Journal of Operational Research*, 121, 304-315
- [24] Richter, K. and Weber, J., 2001, The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost. *International Journal of Production Economics*, 71, 447-456.
- [25] Richter, K. and Gobsch, B., 2003, The market-oriented dynamic product recovery model in the just-in-time framework, *International Journal of Production Economics*, 81-82, 369-374.
- [26] Schrady, D.A., 1967, A deterministic inventory model for repairable items. *Naval Research Logistics Quarterly*, 14, 391-398.
- [27] Simpson, V.P., 1978, Optimal solution structure for a repairable inventory problem. *Operations Research*, 26, 270-281.
- [28] Spengler, Th., Puchert, H., Penkuhn, T. and Rentz, O., 1997, Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97, 308-326.
- [29] Teunter, R.H., 2001, Economic order quantities for recoverable item inventory systems. *Naval Research Logistics*, 48, 484-495.
- [30] Teunter, R.H. (2004). Lot-sizing for inventory systems with product recovery. *Computers & Industrial Engineering*, 46, 431-441.
- [31] Thierry, M.C., Salomon, M., van Nunen, J. and Van Wassenhove, L., 1995, Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37, 114-135.

- [32] Wagner, H.W. and Whitin, T.H., 1958, Dynamic version of the economic lot size model, *Management Science*, 5, 88-96.



Dynamic scheduling for optimal management of an integrated
recycling – purchasing system

Jeong Soo Lee

Department of Systems Management & Engineering
Graduate School of Industry, Pukyong National University

Abstract

This paper deals with a two level dynamic lot sizing problem in which the dynamic demand can be satisfied by recycled products as well as newly purchased products. The model assumes that a proportion of the used products are collected from customers and later recovered for reuse. The recovered products are regarded as perfectly new ones. First, a mixed integer programming model is presented to obtain the economic recovery schedule for the recoverable items as well as the economic order schedule for newly procured products, simultaneously. Then, using LINGO software, the optimal solution for the mathematical model can be found. A numerical example is given to verify the model and its solution. Furthermore we developed a hybrid GA. And we compared the results of GA with LINGO optimal solutions.

감사의 글

벌써 2년이라는 시간이 훌쩍 지나버렸습니다. 제가 부경대 학생으로 지낸지도 거의 10년이 다 되어 갑니다. 그동안 많은 어려움도 있었고, 기쁨과 슬픔도 있었습니다. 아쉬운 점도 많고, 어리석었던 제 자신의 행동들도 생각납니다. 하지만 나쁜 기억은 모두 지우고, 즐거웠던 기억만 가지고 떠나려 합니다.

비록 학부 때 지도교수님은 아니셨지만 대학원 2년 동안 저를 이끌어 주셨던 고시근 교수님께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다. 저에게 많은 가르침을 주셨고, 국제 학회에서 발표를 할 수 있는 기회까지 주셔서 너무 감사했습니다. 저에게는 정말 잊지 못할 추억이 될 것입니다. 부족한 저를 2년 동안이나 보살피 주셔서 너무 감사드립니다. 그동안 교수님께 배웠던 가르침을 맘속 깊이 새기며 꼭 실천 하도록 노력하겠습니다. 언제나 바쁘게 지내시는 교수님. 항상 건강 조심하시고 하시는 일마다 좋은 결과 있으시길 빌겠습니다.

학부 때 지도교수님이셨던 김병남 교수님. 군대를 다녀온 후 처음 교수님께 경제성공학을 배웠던 기억이 아직도 눈에 선합니다. 교수님의 강의가 저에게 공부에 대한 흥미를 일깨워 주었습니다. 항상 재밌는 강의로 학생들과 즐겁게 생활하시길 바랍니다. 정말 뛰어난 기억력을 가지신 옥영석 교수님. 학생들의 사소한 부분 까지도 다 기억하시던 교수님을 잊지 못할 겁니다. 교수님의 부드러운 미소가 그리워질 겁니다. 너무나도 신사적이신 이운식 교수님. 처음 교수님께서서 학생들의 출석을 부르실 때 이정수씨 라고 하셨죠. 언제나 학생들을 존중해주시던 교수님. 처음 대학원 1년 동안 교수님께 많은 신세를 진 것 같습니다. 진심으로 감사드립니다. 대학을 다니면서도 실전 경험을 쌓게 해주신 구평희 교수님. 지난 시간을 되돌아보면 단지 머리로 하는 공부가 아닌 몸으로 익히는 진정한 공부를 가르쳐 주셨습니다. 진심으로 감사드립니다. 이미 사회에 진출해 있는 동기들로부터 가장 중요한 강의라고 불리시는 오수철 교수님. 교수님의 강의가 사회생활에서 가장 정말 많이 쓰인다고 합니다. 다들 좀더 열심히 하지 않은 것을 후회하고 있습니다. 저도 마찬가지입니다.

다. 실무에 도움이 되는 많은 강의를 해주셔서 진심으로 감사드립니다. 저희 98학번과 가장 친했던 김영진 교수님. 앞으로도 저희 동기들과 자주 찾아뵙도록 하겠습니다. 술 사주실거죠? 비록 강의는 대학원에서 한번 밖에 듣지 못했지만, 국제 학회에서 즐거운 시간을 같이 보내셨던 김민수 교수님. 교수님의 수줍은 미소를 절대 잊지 못할 겁니다. 강의는 듣지 못했지만 국제 학회 준비 때 많은 지도의 말씀을 해주셨던 박병무 교수님. 늘 건강하세요.

2년 동안 가장 오랜 시간을 같이 보냈던 대학원 식구들. 진아 누님, 철호형, 원일이형, 찬호형, 희영이, 유진이, 그리고 박사과정이신 황영제님, 박국제님. 평생 잊지 못할 추억을 간직하고 떠납니다. 같이 했던 시간이 길었던 만큼 정도 많이 들었습니다. 모두 몸 건강히 꼭 성공하시길 빌겠습니다. 감사합니다.

이정수 드림

