

혼성 유전알고리즘을 이용한 단일기간 재고품목의 통합 생산-분배계획 해법

박양병^{*}

경희대학교 테크노공학대학 기계·산업시스템공학부

Integrated Production-Distribution Planning for Single-Period Inventory Products Using a Hybrid Genetic Algorithm

Yang-Byung Park

Mechanical and Industrial Systems Engineering, College of Advanced Technology, Kyung Hee University, Yongin, 449-701

Many firms are trying to optimize their production and distribution functions separately, but possible savings by this approach may be limited. Nowadays, it is more important to analyze these two functions simultaneously by trading off the costs associated with the whole. In this paper, I treat a production and distribution planning problem for single-period inventory products comprised of a single production facility and multiple customers, with the aim of optimally coordinating important and interrelated decisions of production sequencing and vehicle routing. Then, I propose a hybrid genetic algorithm incorporating several local optimization techniques, HGAP, for integrated production-distribution planning. Computational results on test problems show that HGAP is effective and generates substantial cost savings over Hurter and Buer's decoupled planning approach in which vehicle routing is first developed and a production sequence is consequently derived. Especially, HGAP performs better on the problems where customers are dispersed with multi-item demand than on the problems where customers are divided into several zones based on single-item demand.

Keywords: supply chain management, integrated production and distribution planning, hybrid genetic algorithm, single-period inventory products.

1. 서론

오늘날 기업이 직면하고 있는 경쟁환경의 특성은 구매, 생산, 배송(로지스틱스) 기능들에 있어 비용, 효율, 그리고 속도의 우위 달성으로 표현되고 있다. 최근에 기업들이 경쟁 우위를 달성하는 데 있어 공급사슬관리(SCM)의 중요성을 심각하게 인식하면서 이들 기능을 통합적으로 설계, 계획, 관리하는 새로운 접근방법의 연구에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이 접근방

법은 여러 다른 기능들의 의사결정문제를 하나의 통합된 모델로써 동시에 최적화 하는 방법이다.

실제 공급사슬의 모든 기능에 대한 의사결정문제를 완벽하게 통합하여 다룬다는 것은 현실적으로 지극히 어려운 일이며, 아직은 단지 이상일 뿐이다(Shapiro, 1999). 그래서 지난 10여 년 동안 이들 기능의 부분 통합에 대한 연구가 대신 활발히 진행되어 왔다(Mabert and Venkataraman, 1998). 기업에서 공급사슬의 기능들을 점진적으로 통합해 가는 과정에서 특히 생산-분

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00264-0) 지원으로 수행되었음.

^{*}연락처 : 박양병 교수, 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1 경희대학교 테크노공학대학 기계·산업시스템공학부,

Fax : 031-203-4004, e-mail : ybpark@khu.ac.kr

2003년 3월 접수, 2003년 6월 게재 승인.

배계획의 의사결정 통합이 강조되고 있으며, 최근 이에 대해 활발한 연구가 이루어지고 있다. 세계 최대 컨설팅업체 맥킨지는 최근 발표한 미국경제보고서에서 신경제의 원동력이 된 95~99년의 생산성 증가에 기여한 대표적인 경영혁신은 도소매 분야에서 생산과 분배 기능의 결합에 의한 물류혁명이라고 지적했다(손현덕, 2002).

지금까지의 통합 생산-분배계획에 관한 연구는 대부분의 경우 일반 재고품목을 대상으로 생산비, 재고비, 수송비 등으로 구성된 총비용의 최소화를 꾀하고 있다(Erenguc *et al.*, 2001, Sarmiento and Nagi, 1999, 정성원 외, 2001). 하지만, 일반 재고품목과 달리 재고가 허용되지 않는 일회용 제품, 즉 단일기간 재고품목(single-period inventory products)의 생산-분배계획에는 다른 접근방법이 필요하다. 단일기간 재고품목이란 생산된 제품이 재고로 유지되면 가치가 현저히 상실되거나 고객이 정한 시간보다 늦게 배달되면 고객에게 큰 경제적 손실을 야기하는 제품으로 정의된다. 일간지, 생활정보지(예: 가로수, 벚꽃신문), 부패성 식품(예: 빵, 식료품) 등이 첫 번째 부류에 속한다. 그리고 JIT(just-in-time) 공장을 운영하는 자동차 제작회사에게 공급되는 부품(예: 카 시트, 트랜스미션) 등이 두 번째 부류에 속한다. 단일기간 재고품목의 생산-분배계획은 일반 재고품목과 다음과 같은 차이점을 가진다. 첫째, 일반 재고품목의 경우는 생산과 분배가 재고라는 완충요소에 의해 연결되지만, 단일기간 재고품목의 경우는 생산과 분배가 직접 연결된다. 따라서 단일기간 재고품목의 경우는 생산과 분배 기능의 통합계획이 필수적이다. 둘째, 일반 재고품목의 경우는 재고비의 최소화를 추구하나, 단일기간 재고품목의 경우는 재고비 자체를 무시한다. 셋째, 일반 재고품목의 경우는 생산 로트 크기결정과 재고정책이 중요하나, 단일기간 재고품목의 경우는 제품생산순서와 차량경로의 결정이 중요하다.

단일기간 재고품목의 경우는 특히 생산과 분배 활동이 재고에 의한 완충 없이 서로 직접적으로 연결되기 때문에 통합 생산-분배계획에 따른 시너지 효과가 매우 클 것으로 예상됨에도 불구하고, 지금까지 단일기간 재고품목의 통합 생산-분배계획에 관한 연구는 미미한 실정이다. 발표된 관련 연구는 대부분 일간지의 인쇄-배송문제를 대상으로 하고 있다.

Hurter and Buer(1996)는 일간지 신문사에서 발행하는 7개 지역 조간신문의 인쇄순서와 각 구독지역 내에 산재해 있는 다수 보급소를 방문하는 차량의 경로를 순차적으로 수립하기 위한 절차적 방법을 개발하여 신문사의 운영에 실제로 적용하였다. Buer *et al.*(1999)은 일간지 신문사에서 총 배송비를 최소화하는 통합 생산-분배계획의 최적 수리모델을 구축하고, 터부서치와 시뮬레이티드 어닐링 탐색기법을 이용한 휴리스틱 해법을 개발하여 실제 자료를 이용한 계산실험을 통해 이들의 성능을 평가하였다. JIT 생산의 극단적 형태에 해당되는 일간지 인쇄-배송문제에 관한 개념과 해법은 중앙 집중된 단일 생산시설에서 생산과 배송 활동이 직접 연결되어 있는 단일기간 재고품목의 생산-분배계획 문제에 잘 적용될 수 있다.

본 논문에서는 단일 생산시설과 다수 고객으로 구성된 단일기간 재고품목의 공급사슬에서 생산비(가공비와 준비비), 수송비, 납기위반비, 차량비의 총합을 최소화하는 생산순서와 차량경로의 결정을 위한 단일기간 재고품목의 생산-분배계획 문제를 제기하고, 혼성 유전알고리즘(hybrid genetic algorithm)을 이용한 통합계획 해법의 개발을 소개한다. 그리고 계산실험을 통해, 개발한 해법의 성능을 Hurter and Buer(1996)의 순차적 분리계획 해법과 비교한다.

유전알고리즘(GA)은 복잡한 목적함수와 다양한 제약식을 갖는 NP-hard 문제에서 최적해에 대한 탐색기능이 매우 뛰어난 것으로, 이론적 및 실험적으로 증명되어 있다(Michalewicz, 1994). 혼성 유전알고리즘이란 일반 GA에서 연산에 의해 만들어진 해에 지역 최적화 기법을 추가로 적용하여 효과적인 진화를 보장하는 방법이다(Gen and Cheng, 1997).

생산순서결정 문제와 관련하여, Bierwirth and Mattfeld(1999)는 GA를 이용하여 여러 기계로 구성된 정적 및 동적 잡숍의 일정계획을 수립하는 방법을 개발하였다. Reeves(1995)는 흐름 생산 일정계획을 위한 GA 해법을 소개하였다. Wang and Uzsoy(2002)는 작업물의 동적 도착환경에서 최대 지연을 최소화하는 단일 배치 가공기계의 생산계획문제에 GA를 적용하였다. Li *et al.*(1998)은 단일 생산시설에서 총 지연을 최소화 하는 생산계획을 수립하기 위해 GA 접근방법을 제시하였다.

차량경로결정 문제에 GA를 적용한 연구는 그동안 많은 학자들에 의해 수행되었으며, 이에 대한 조사와 해법들의 성능 비교 실험이 Lai and Liu(2003), Braysy and Gendreau(2001) 등에 의해 정리되어 있다. Schmitt and Amini(1998)는 지금까지 외관원 방문문제(TSP)를 푸는 데 사용된 GA의 설계대안들을 계산시간과 해 품질의 관점에서 비교하는 실험을 수행하였다. 실험 결과는 생산순서나 차량경로의 결정과 같은 order-based 문제에 잘 적용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어, 제 2장에서 5종류 단일기간 재고품목의 생산-분배 활동 사례를 정리한다. 제 3장에서 본 논문에서 다룬 단일기간 재고품목의 생산-분배계획 문제를 정의하고, 이 문제를 통합적으로 풀기 위해 개발한 혼성 유전알고리즘 해법을 제 4장에서 상세히 설명한다. 제 5장에서 예제풀이를 통하여, 개발한 해법의 효과를 조사한다. 그리고 개발한 해법의 성능평가를 위해 분리계획 해법과 비교한 계산실험과 분석을 제 6장에서 기술하고, 마지막으로 제 7장에서 결론과 향후과제를 정리한다.

2. 단일기간 재고품목의 생산-분배 활동 사례

2.1 국외 일간지

북미의 경우 광역시의 일간지 구독시장은 카운티 또는 우편번호에 따라 여러 개의 소지역으로 나누어져 있다. 그래서 인

쇄공장에서는 매일 내용이 다른 지역 판을 순서에 따라 생산하여(인쇄, 끼움, 접음), 해당 소지역 내에 산재해 있는 다수의 보급소에 정해진 시간까지 배송을 완료한다.

한 예(Hurter and Buer, 1996)를 간략히 소개한다. 미국 중서부에 위치한 대도시와 주변 카운티를 구독시장으로 하는 한 일간지 신문사는 40×20km 지역 내의 독자를 서비스하기 위해 자체 인쇄공장에서 매일 새벽 1:30에 시작하여 시간 당 18,000부의 속도로 총 37,000부를 생산하고 있다. 전체 시장은 우편번호에 의해 7개의 지역판 구독지역으로 나누어져 있다. 순서에 따라 생산이 완료된 지역판은 곧바로 대략 3,400부 적재용량의 밴(van)에 선적되며, 선적시간은 대략 10~15분 정도 소요된다. 대부분의 경우, 한 밴에는 한 종류의 지역판만을 적재한다. 밴은 해당 지역 내에 산재해 있는 평균 37개의 보급소에 정해진 부수를 오전 4:30까지 배달 완료해야 한다. 이 시각은 각 보급소에서 자체적으로 운영하는 가정배달 차량이 모든 구독가정에 오전 6시까지 배달할 수 있도록 적절한 여유시간을 고려한 것이다.

2.2 국내 일간지

국내의 경우는 북미의 경우와 조금 다르다. 국내 D 신문사는 서울 충청로와 오금동, 안산, 대구, 광주, 제주시에 위치한 총 6개의 인쇄공장을 운영한다. 각 공장에서는 해당 지역의 수요를 위해 생산하며, 때로는 인근 지방의 지역 색선 면을 인쇄하여 끼워 넣기도 한다. 하지만 지역 색선의 비중은 극히 작아, 각 공장에서는 본사 편집부에서 CTS(computerized typesetting system)에 의해 전송되어 온 자료를 필름으로 출력하여 한 가지 품목만을 생산하는 것으로 간주하여도 무방하다. 공장에서의 인쇄 시작시각에 따라 5판(오후 6:30 인쇄시작; 가판용), 40판(오후 10:45 인쇄시작; 장거리 배송용), 41판(오후 11:30 인쇄시작), 45판(익일 오전 0:30 인쇄시작; 근거리 배송용)으로 구분된다.

생산이 끝난 제품은 포장 후 공장의 선적장에서 대기 중인 배송트럭에 지속적으로 선적되어 해당 지역 내에 산재해 있는 보급소로 보내진다. 오금동 공장의 경우, 배송트럭은 정해진 부수를 모든 보급소에 오전 4시까지 배달 완료하여야 한다. 이 시각은 각 보급소에서 지역 광고지를 끼워 넣고, 간혹 공장에서 뒤늦게 인쇄되어 보내진 지면을 추가로 끼워 넣고, 그리고 모든 구독가정에 오전 5:30까지 배달하는 데 필요한 여유시간을 고려한 것이다.

2.3 생활정보지(신문)

지역 생활정보지 K의 서울 독산동 인쇄공장은 월~금요일 동안 매일 서울, 인천, 경기, 충청지역에 위치한 총 19개의 지사별로 생활정보지를 생산하여 해당 지사로 배송한다. 각 지사에서는 자체적으로 오토바이를 이용하여 지역 내 거리의 보관함에 배포한다. 인쇄공장은 시간당 28,000부의 고속 운전기 2대

를 보유하고 있으며, 예외의 경우가 존재하나 매일 마감기사의 필름 및 판 제작이 끝난 지사의 순서에 따라 생산순서가 결정된다. 따라서 생산순서는 매일 달라질 수 있다. 생산은 오후 3시부터 시작되어 익일 오전 4시경에 완료되며, 운전기 준비시간은 지역 정보지의 종류에 따라 대략 15~30분 정도 그리고 인쇄시간은 부수에 따라 40~60분 정도 소요된다. 지사별로 인쇄매수는 다르지만, 평균 20,000부 정도이다.

19개 지사의 배송은 회사가 보유하고 있는 3.5톤, 5톤 크기의 총 4대의 트럭을 가지고 밤 10시부터 시작되는데, 한 대의 트럭은 한 지사의 정보지만을 적재한다. 배송을 마치고 일찍 돌아온 트럭은 아직 남아 있는 다른 지사의 배송을 위해 다시 출발할 수 있다. 배송은 생산이 완료된 지사의 순서에 따라 시행되며, 여러 지사의 정보지가 동시에 배송을 기다리는 경우는 거리가 먼 지사의 순서로 배송한다. 따라서 매일 생산순서에 따라 배송순서는 달라진다. 모든 지사로의 배송은 오전 5시까지 완료되어야 하고, 만일 불가능하다고 예상되는 경우는 오전 3~4시에 배송하청을 준다. 모든 지사는 거리배포를 오전 9시까지 완료한다.

2.4 제과류

D 도너츠의 생산공장은 수도권, 대전, 대구, 부산 등지에 생산시설을 갖추고 있으며, 생산된 모든 제품은 일일 유효기간을 고려하여 판매점포로 즉시 배송된다. 생산계획은 오후 5시까지 마감된 주문제품의 종류와 수량을 토대로 수립되며, 생산은 오후 9시부터 익일 오전 4시까지와 익일 오전 7시부터 정오 12시까지 두 차례 이루어진다. 제품의 종류는 크게 이스트류, 케익류, 베이커리류로 나누어지며, 이들은 토핑과 아이싱 방법에 따라 다시 여러 종류로 분류된다. 매일의 제품생산순서는 관행적으로 고정되어 있다.

제품은 두 차례 생산 직후 1톤, 2.5톤 크기의 트럭에 혼합 적재되어 각각 오전 5시와 오후 1시에 배송이 시작된다. 한 트럭의 루트에는 최대 1시간 30분 내에 배송을 완료할 수 있는 점포들을 포함하여 생산공장과 가까운 위치의 점포부터 차례로 방문한다. 배송을 마치고 일찍 돌아온 트럭은 아직 남아 있는 루트를 서비스하기 위해 다시 출발할 수 있다.

2.5 식료품

P 식품회사의 춘천 두부공장에서는 크기, 강도, 용도가 다른 여러 종류의 두부를 생산하고 있다. 이 회사는 두부 외에도 면, 콩나물, 생즙 등의 다양한 품목의 신선식품을 생산하는 종합 식품회사이다. 오후 7시까지 웹 상에서 마감된 주문에 따라 생산계획을 수립하여 오후 7:30부터 익일 오전 5:30까지 생산을 수행한다. 제품의 생산순서는 대체적으로 고정되어 있다. 최종 콩 배합을 위한 약 1시간 정도의 준비시간이 소요되며, 생산과정에서 제품별 준비시간은 크지 않다.

배송은 물류 전문업체에게 위탁하고 있다. 물류업체는 5톤, 8톤, 11톤 크기의 총 10대의 트럭을 이용하여 제품이 생산된 순서대로 곧바로 혼합 적재하여 주문 시 고객이 지정한 여러 물류센터로 오전 6시까지 배송을 완료한다. 물류센터에는 각 가맹점의 차량들이 집결하여 주문한 제품을 받아 해당 지역의 여러 판매점으로 배달한다.

3. 단일기간 재고품목의 생산-분배계획 문제

본 논문에서 다루는 단일기간 재고품목의 생산-분배계획 문제 (production-distribution planning problem for single-period inventory products: PDPSI)는 단일 생산시설과 다수 고객으로 구성된 2단계 공급체인에서 생산비, 수송비, 납기지연비, 차량비의 총합을 최소로 하는 생산순서와 차량경로를 계획하는 문제이다. 문제의 구축에 제 2장의 사례조사 내용을 참고하였다.

생산시설에서는 한 개의 생산라인을 이용하여 여러 종류의 제품을 순차적으로 생산한다. 한 제품의 생산은 총 수요량에 맞추어 일괄 생산되며, 준비시간은 직전 생산제품에 의존적이다. 고객 지역이 제품별로 분할되어 있는 단일제품 수요의 경우(문제형태 I)와 고객이 전 지역으로 분산되어 있는 다제품 수요의 경우(문제형태 II)가 존재한다. 예로서, 지역별 조간신문을 구역 내 다수의 보급소에 배송하는 문제가 첫 번째 형태에 그리고 아침에 만들어진 여러 종류의 빵이나 식품을 다수의 판매점에 배송하는 문제가 두 번째 형태에 속한다. 배송은 동일 크기의 차량을 이용하며, 모든 고객에 대해 공통의 희망납기 (soft time deadline)와 꼭 지켜야 하는 절대납기(hard time deadline)가 주어진다. 배송이 희망납기보다 늦어지는 경우는 물량과 지연시간에 비례한 납기지연비가 발생한다.

제품의 차량적재는 생산시설에서 해당 제품의 생산이 모두 완료된 후 가능하다. 차량에 혼재는 허용되며, 혼재의 경우에는 적재 제품들의 생산이 모두 완료될 때까지 차량의 출발시각이 늦어진다. 차량적재 및 하역시간은 물량에 비례한다. 생산된 제품은 특성상 재고로 유지될 수 없으며, 생산된 제품은 단일기간 내에 전량 고객에게 배송된다.

한 고객에 대해 동일 제품의 분리(split)배송은 불허하나, 제품별 분리배송은 허용한다. 제품별 분리배송은 만차(full truck-load)에 근접한 적재를 가능케 하여 차량 소요대수를 줄여주고, 일찍 생산된 제품들의 조기배송과 해당 고객의 나머지 배송물량에 대한 희망납기의 연기를 가능케 하여 납기지연을 줄여주는 효과를 기대할 수 있는 배송전략이다.

PDPSI의 선형 목적함수는 식 (1)과 같이 구성된다. 식에서 첫 번째 항은 생산시간에 비례한 생산비, 두 번째 항은 이동시간에 비례한 수송비, 세 번째 항은 납기지연시간과 물량에 비례한 납기지연비, 그리고 네 번째 항은 차량 소요대수에 비례한 차량비(차량 일일 운영비)를 나타낸다. C_1, C_2, C_3, C_4 는 각각 해당 목적의 비용환산인자(cost conversion factor)이다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & C_1 \sum_{h=1}^M P_h + C_2 \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{v=1}^R t_{ij} x_{ijv} \\ & + C_3 \sum_{v=1}^R \sum_{l \in \{v\}} q_{lv} \max(a_{lv} - D, 0) + C_4 \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^R x_{0jv} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 파라미터 M 은 제품 종류 수, N 은 고객지점 수, R 은 차량 소요대수, t_{ij} 는 지점 i 로부터 j 까지의 이동시간, D 는 희망납기, 지점번호 0은 공장 차고지(depot)를 의미한다. 그리고 변수 P_b 는 제품 b 의 생산시간(준비시간+가공시간), x_{ijv} 는 차량 v 가 지점 i 로부터 j 로 이동하면 1, 아니면 0, $\{v\}$ 는 차량 v 의 루트에 포함되어 있는 고객지점의 집합, q_{lv} 는 고객 l 에 차량 v 의 배송물량, a_{lv} 는 고객 l 에 차량 v 의 도착시각을 나타낸다.

4. 혼성 유전알고리즘을 이용한 PDPSI의 해법

PDPSI를 통합적으로 풀기 위해 GA와 지역 최적화 기법을 이용한 하이브리드 해법(a hybrid genetic algorithm for PDPSI: HGAP)을 개발하였다. HGAP은 필요할 때마다 수정(repair)작업을 실시하여 항상 해의 feasibility를 유지하면서 진화한다. 또 좋은 해가 진화과정에서 사라질 수 있는 가능성을 방지하기 위해 elitist 전략을 채택한다. 진화과정의 매 세대에서 모집단의 구성은 교차변이와 돌연변이에 의해 생성된 자손에 대해 지역 최적화 기법을 적용하여 얻어진 개체와 나머지는 이전 모집단에서 적합도가 높은 순서의 개체로써 이루어진다. HGAP을 설계요소별로 설명한다.

4.1 해의 표현(coding)과 해석(decoding)

한 개체는 지역 최적화 기법, 생산순서, 차량경로를 나타내는 3개 부분의 숫자 인자로써 구성된다. 첫 번째 부분은 생산순서와 차량경로의 개선을 위해 적용하는 지역 최적화 기법을 표현한다. 인자가 '1' 이면, 해당 개체의 생산순서 또는 차량경로에 이 인자의 위치에 해당하는 지역 최적화 기법의 적용을 의미한다. 총 6개의 지역 최적화 기법이 고려되기 때문에 6개의 이진수 인자로 이루어지며, 처음 2개 인자는 생산순서 그리고 나머지 4개 인자는 차량경로 개선을 위한 지역 최적화 기법에 해당된다. '1'의 인자 수는 생산순서와 차량경로에 대해 각각 한 개씩으로 제한된다. 인자에 할당된 지역 최적화 기법은 편의상 인자의 위치순으로 1~6의 번호가 주어진다.

두 번째 부분은 생산순서를 표현하며, 각 인자는 제품번호를 나타낸다. 따라서 인자 수는 제품의 종류 수와 같다. 한 제품의 생산 개시시각은 이전 제품들의 준비시간과 생산시간의 누적합에 의해 정해된다.

세 번째 부분은 차량의 고객 방문순서를 표현하며, 각 인자

는 고객번호와 주문제품에 따라 순차적으로 부여된 가상 지점 번호를 나타낸다. 예를 들어, 고객 1이 제품 1과 2를 그리고 고객 2가 제품 2를 주문하는 경우, 고객 1의 제품 1 주문은 1번, 고객 1의 제품 2 주문은 2번, 고객 2의 제품 2 주문은 3번이 된다. 단일제품 수요의 경우, 가상 지점번호는 고객번호와 항상 일치한다. 차량경로는 인자의 열거순서에 따르며, 공장 depot를 나타내는 번호 '0'으로써 루트를 구분한다(left-to-right scan procedure). 루트의 출발시각은 적재제품 중 가장 늦게 생산이 완료된 제품의 생산완료시각에 선적시간을 더하여 결정된다. 루트 시간은 지점간 이동시간과 지점에서의 하역시간을 더하여 결정된다.

필요한 경우, 진화과정에서 생성된 개체들의 세 번째 부문에 대해 수정작업을 실시한다. 한 루트 내에서 동일 고객의 인자가 2개 이상 건너뛰어 존재하는 경우, 맨처음의 인자 뒤에 나머지 인자들을 차례로 이전 삽입한다. 이에 따라 차량이 한 순회 동안 동일 고객을 중복해서 방문하지 않게 된다.

앞 설명에서의 예를 이용하여 $S=(100100211302)$ 의 해석은 다음과 같다. 생산순서와 차량경로 개선에 각각 1번과 4번 지역 최적화 기법이 적용되고, 생산순서는 제품 2-1, 첫 번째 루트는 0-고객 1(제품 1)-고객 2(제품 2)-0, 두 번째 루트는 0-고객 1(제품 2)-0 이다.

4.2 초기 모집단(initial population)

Schmitt and Amini(1998)의 실험결과, 좋은 개체와 임의의 생성된 개체로 구성된 초기 모집단은 GA의 효능(해의 품질과 탐색 시간)에 상당한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이에 근거하여, 초기해의 두 번째와 세 번째 부문의 인자구성에서 제품의 존 준비시간의 생산순서 결정문제와 단일 depot 차량경로 결정문제에 효과적인 휴리스틱 기법을 각각 적용한다.

먼저, 개체의 첫 번째 부문에서 처음 두 개 인자 중 임의로 한 인자에 '1'을, 다음 네 개 인자 중 임의로 한 인자에 '1'을 할당한다. 남은 네 개 인자에는 모두 '0'을 할당한다. 개체의 두 번째 부문은 stochastic insertion heuristic을 적용하여 생산순서 인자 값을 정한다. 즉, 임의로 시작 제품번호를 선택하고, 현재의 부분 생산순서에 모든 가능한 삽입품목과 그 위치를 준비시간 증가분의 크기에 따라 오름차순으로 순위(r)를 매긴 다음, 선정확률 $P(r) = k_1 k_2^{r-1}$, $0 < k_1, k_2 < 1$ 에 근거하여 삽입할 제품과 위치를 선정 시행하는 것이다. 이 과정을 모든 제품의 생산순서가 정해질 때까지 반복 수행한다.

개체의 세 번째 부문은 stochastic savings algorithm을 적용하여 차량경로 인자 값을 정한다. 즉, savings 목록(Clarke and Wright, 1964) 내의 결합대상 가상 지점번호 쌍을 savings 크기에 따라 내림차순으로 순위(r)를 매긴 다음, 선정확률 $P(r) = k_1 k_2^{r-1}$, $0 < k_1, k_2 < 1$ 에 근거하여 결합할 가상 지점번호 쌍을 선정 시행하는 것이다. 이 과정을 더 이상의 루트 결합이 실행 불가능할 때까지 반복 수행한다. 루트의 결합단계에서 항상 차량용량과 절

대납기의 제약조건을 확인하여야 한다.

이상의 방법을 반복 수행하여 초기 모집단의 10% 개체를 생성하고, 나머지 90% 개체는 다양한 해로써 탐색공간을 넓히기 위해 임의의 생성한다. 개체의 임의의 생성방법은 다음과 같다. 먼저, 개체의 첫 번째 부문에서 1~2번째와 3~6번째 인자의 임의의 위치에 각각 한 개씩의 '1'과 남은 네 개의 인자에 '0'을 할당한다. 그리고 두 번째와 세 번째 부문의 인자 값을 각각 임의의 가능한 비중복 숫자조합으로 정한 다음, 세 번째 부문에서 제약조건을 위반하기 직전의 feasible 루트 사이에 '0'을 삽입한다.

4.3 적합도 평가(fitness evaluation) 및 선별(selection)

PDPSI의 목적함수인 총 비용 식 (1)을 개체의 적합도 평가함수로 이용한다. 식에서 비용환산인자 $C_i(i=1,..,4)$ 의 주의 깊은 설정이 중요하다. 선별작업은 개체들의 수정 적합도에 근거한 roulette wheel 방법을 적용하여 이루어진다. 수정 적합도를 사용하는 이유는 모집단 내 개체들의 우열을 명확히 하여 상대적으로 좋은 개체들이 다음 세대에 선별될 확률을 높게 하기 위해서 이다. 개체 k 의 수정 적합도 $f_k = (f_{max} - f_k) / (f_{max} - f_{min})$ 에 의해 구해진다. 여기서 f_{max} 와 f_{min} 은 모집단에서 각각 최대와 최소 적합도를 나타낸다. 수정 적합도는 0.0과 1.0 사이의 값을 갖게 된다.

4.4 지역 최적화(local optimization)

지역 최적화를 위해 총 6가지 greedy 기법(Cordeau *et al.*, 2002)을 제공한다. 즉, 생산순서에 대해 or-opt 기법(#1), 생산순서에 대해 2-opt exchange 기법(#2), 각 루트에 대해 or-opt 기법(#3), 각 루트에 대해 2-opt exchange 기법(#4), 인접 루트 간에 대해 or-opt 기법(#5), 인접 루트 간에 대해 2-opt exchange 기법(#6). 지역 최적화 단계에서는 생산순서, 차량경로의 순서로 해당 기법이 각각 1회 반복씩 적용된다. 1번 또는 2번 기법의 적용에 의해 생산순서의 변경을 시도할 때, 변경에 따라 개체의 어느 한 루트에서 절대납기를 위반하면 변경 시도를 기각한다. 적합도 개선의 계산에 생산비와 납기 지연비의 증감을 모두 포함하여야 한다.

4.5 교차변이(crossover)

교차변이는 지역 최적화 기법 인자와 생산순서, 차량경로 인자에 대해 각각 다른 방법을 적용한다. 즉, 첫 번째 부문에 대해서 BX(biased crossover)를 2회 그리고 두, 세 번째 부문 중 한 부문을 선택하여 PMX(partially mapped crossover)(Michalewicz, 1994)를 1회 적용함으로써 두 개의 부모로부터 두 개의 자손을 생성한다. 세 번째 부문의 차량경로에 대해서는 두 부모에서 루트를 구분하는 '0'을 제거하고 교차변이를 실시한 다음, 생성된 자손에 대해 루트 구축과정을 통해 루트 사이에 다시 '0'을 삽

입한다. 생성된 자손들에 대해 필요한 경우 수정작업을 실시한다.

BX는 생산순서와 차량경로의 지역 최적화 기법에 대해 차례로 분리 적용되는데, 부모의 '1' 인자가 자손의 동일한 위치에 상속될 확률을 두 부모의 개선율에 근거하는 방법이다. 부모의 개선율은 자신의 적합도가 이전 세대에서 지역 최적화 기법의 적용에 의해 개선된 비율을 의미하며, 각 부모는 생산순서 기법에 의한 개선율과 차량경로 기법에 의한 개선율을 가진다. 부모 인자의 상속확률은 각 부모의 개선율에 비례 계산되며, 0.00과 0.99 사이의 두 개 난수를 발생하여 상속확률에 따라 두 자손에서 '1' 인자의 위치를 결정한다.

생산순서의 지역 최적화 기법에 대한 BX 교차변이 예로서, 두 부모 $P_1=(10.....)$, $P_2=(01.....)$, 두 부모의 생산순서 기법에 의한 개선율 $I_1=0.05$, $I_2=0.15$, 두 개 난수 $R_1=0.55$, $R_2=0.11$ 일 때, 두 부모의 상속확률은 각각 0.25와 0.75로 구해져 두 자손 $O_1=(01.....)$, $O_2=(10.....)$ 로 결정된다. 만일 두 부모의 개선율이 모두 0이면 부모와 상관없이 두 자손의 '1' 인자 위치를 임의로 결정한다. 일종의 돌연변이 효과를 기대하는 것이다. BX의 적용에 따라 진화과정에서 현재 해의 개선에 특히 효과가 높은 지역 최적화 기법이 반복해서 사용될 가능성이 높아진다.

PMX는 mapping을 적용하는 2점 교차변이 방법으로서, 좋은 schemata가 상속된 자손을 지속적으로 생성할 수 있는 효과를 기대할 수 있다. 원래 TSP를 위해 개발된 방법이지만, 다수 차량의 방문지점을 연속적으로 나타내는 HGAP의 개체 표현방법에 비추어 고유의 효과를 기대할 수 있다. 이러한 사실은 제 6장의 실험과정에서 입증되었다. 개체의 두 번째와 세 번째 부문 중 어느 부문에 대해 교차변이를 실시할 것인가는 각 부문에 속한 인자 수에 비례한 확률에 근거한다.

4.6 돌연변이(mutation)

전통적 돌연변이 방법을 적용하면, 뒤 이어 실시되는 지역 최적화 작업에서 원래의 개체로 원상 회복될 가능성이 존재하기 때문에, 임의 생성된 새로운 개체를 모집단에 추가하고 (random mutation) 개체에서 여러 루트에 분산되어 있는 동일 고객의 주문을 임의의 한 루트에 결합하는(merge mutation) 두 가지 방법을 이용하여 해의 다양화를 꾀한다. 생성된 자손들에 대해 필요한 경우 수정작업을 실시한다.

첫 번째 방법에서 개체의 모든 인자는 개체의 표현방법에 의거 차례로 임의 생성하여 만들어지며, 개체 수는 변동 임의 생성률(adaptive random generation rate) $P_r=P_r^0(f_{min}/f_{ave})$ 에 의해 결정된다. 즉, 매 세대에서 임의 생성 개체 수는 모집단 크기에 P_r 을 곱한 값으로 정해진다. 여기서 P_r^0 은 P_r 의 초기값, f_{ave} 는 모집단 개체의 평균 적합도를 의미한다. 이에 따라 f_{min}/f_{ave} 값이 1에 근사하면 현재의 모집단 개체들이 다양하지 못한 것으로 해석되어 P_r 은 초기값(즉, P_r 의 최대값)에 가까운 값을 갖게 되어 임의

생성 개체 수는 커진다. 반면에, f_{min}/f_{ave} 값이 0에 근사하면 현재의 모집단 개체들이 매우 다양한 것으로 해석되어 P_r 은 0에 가까운 값을 갖게 되어 임의 생성 개체 수는 작아진다. 이러한 변동 돌연변이는 GA의 적용에서 해의 조기수렴 방지와 효율적 탐색에 효과적이다.

두 번째 방법의 적용대상 개체는 결합률(merge rate) P_g 에 따라 선택된다. 개체가 선택되면, 여러 루트에 분산되어 있는 동일 고객(다수제품 주문고객)의 인자 중 임의의 하나를 선정하여 절대납기와 차량용량 관점에서 feasible한 경우 나머지 인자 중 임의의 하나를 선정된 인자의 뒤에 삽입한다. 만일 선택된 개체에 결합대상 인자가 존재하지 않으면, 결합 돌연변이는 취소된다. 이러한 결합은 한 고객의 다수제품 주문을 가능하면 한 차량에 혼재 배송함으로써 이동시간과 납기 지연의 감소 효과를 기대할 수 있게 해 준다.

5. 예제

HGAP을 적용하기 위해 고객이 전 지역으로 분산되어 있는 다 제품 수요 경우(문제형태 II)의 PDPSI 예제를 구축하였다. 예제는 50개 고객지점과 5종류 제품으로 구성하였다. depot의 위치는 (40,40), 고객지점의 x 와 y 좌표 값은 [5,85]의 일양분포에 따라 정하였다. 50개 고객지점 중 임의의 10개 지점은 3개 제품, 15개 지점은 2개 제품, 25개 지점은 단일제품을 주문하도록 하였으며, 각 제품의 주문량은 [10,43]의 일양분포에 따라 정하였다. 따라서 HGAP 적용에서 가상지점 수는 총 85개이다. 차량용량은 500으로 모두 동일하게, 절대납기는 160, 그리고 희망납기는 절대납기의 80%인 128로 설정하였다. 공장에서 제품별 생산시간은 단위당 [0.03,0.04]의 일양분포, 최초 생산준비시간은 [10,15]의 일양분포, 제품의존 생산준비시간은 [2,9]의 일양분포에 따라 정하였다. 제품 단위당 선적시간과 하역시간은 각각 0.02로 모든 제품에 대해 동일한 것으로 가정하였다. 지점간 이동시간은 직선거리의 반으로 계산한다.

HGAP의 적합도 함수에서 $C_1=10$, $C_2=1$, $C_3=0.01$, $C_4=50$ 으로 설정하였다. 이들 4개 비용환산 인자 값의 설정은 HGAP을 적용하여 구해진 최선해에서 생산비가 수송비와 차량비 합에 대략 1.3~1.7배에 해당되고, 수송비와 차량비가 비슷하게, 그리고 단위당 납기 지연비가 단위당 수송비의 0.01에 해당되도록 하는 원칙에 근거하였다. HGAP의 적용에서 모집단의 크기 (pop_size)는 60개, 초기 모집단 구성에서 $k_1=0.6$, $k_2=0.4$, 교차변이율(P_c)은 0.75, 임의생성률(P_r) 초기값은 0.05, 결합률(P_g)은 0.03으로 정하였다. 이들은 유전 파라미터 값의 변화에 대한 간단한 HGAP의 성능평가 계산실험을 통해 구한 값이다.

HGAP을 Visual Basic 6.0으로 프로그래밍 하였으며, 예제풀이는 IBM PC 호환 Pentium IV(256M RAM, 1.4GHz)에서 수행하였다. <그림 1>은 예제에 대한 HGAP의 적용에서 1000세대 진화과정 동안의 적합도 변화를 보여준다. 처음 500세대 동안

의 활발한 개선과정을 거친 후 간헐적인 작은 개선이 계속되면서 점차 해가 수렴하는 것을 알 수 있다. <그림 2>는 1000세대 진화 후 구해진 최선 해의 차량경로를 보여준다. 총 7대의 트럭이 소요됨을 알 수 있다. 시각적 혼란을 피하기 위해 depot와 고객지점 간의 연결은 모두 생략하였다.

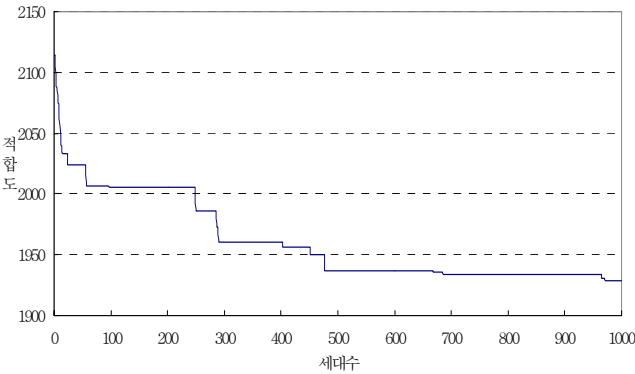


그림 1. 예제에서 HGAP의 1000세대 동안 적합도 개선과정.

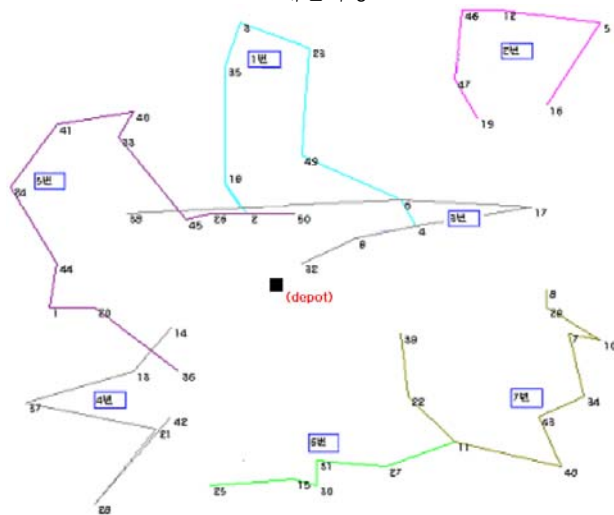


그림 2. 예제에서 HGAP의 차량경로 해 스케치.

예제에 대해 구해진 최선해의 비용과 관련 정보가 <표 1>에 요약 정리되어 있다. 최선해의 생산비와 분배비(수송비+납기지연비+차량비)는 각각 1007.0과 922.6으로 큰 차이가 없으며, 납기지연비는 분배비의 약 17.2%, 총비용의 약 8.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 예상한 바와 같이, HGAP의 계산에 30분 이상의 긴 시간이 소요되었다.

표 1. 예제에서 HGAP 해의 비용과 관련 정보

기법	생산비	수송비	납기지연비		차량비	총비용
	생산 시간	이동 시간	지연 시간	지연 물량	차량 댓수	
HGAP	1007.0	413.5	159.1		350	1929.6
	100.7	413.5	676.3	1253	7	

<표 2>와 <표 3>은 각각 생산순서와 차량경로 해를 관련 정보와 함께 상세히 보여준다. <표 2>에서 생산순서 해는 C-E-A-B-D이며, 5가지 제품의 생산량, 준비시간, 생산개시시각, 생산종료시각을 확인할 수 있다. 7개 루트의 차량경로, 공장 출발시각 및 최종고객 도착시각, 수송비, 납기지연비, 차량비 등이 <표 3>에 정리되어 있다. 차량경로에서 분리배송이 이루어지는 고객지점 번호는 진하게 표기되어 있다.

표 2. 예제에서 HGAP의 생산순서 해와 관련 정보

생산 순서	생산 제품	생산량	준비 시간	생산시작 시각	생산종료 시각	생산비
1	C	494	11	11.0	28.0	280.0
2	E	510	2	30.0	47.3	193.0
3	A	459	2	49.3	64.5	172.0
4	B	406	4	68.5	82.5	180.0
5	D	316	7	89.5	100.7	182.0
합		3345	26	-	-	1007.0

표 3. 예제에서 HGAP의 차량경로 해와 관련 정보

루트 번호	차량경로(배송제품)	공장 출발시각	최종고객 도착시각	수송비	납기 지연비	차량비	합
1	0-2(A,B)-18(A)-35(D)-3(A,D)-23(E)-49(B,E)-6(D,E)-4(D)-0	106.4	156.4	54.6	30.8	50	135.4
2	0-19(D)-47(C,D,E)-46(C)-12(D,E)-5(E)-16(A,C,D)-0	106.3	155.4	66.1	30.8	50	146.9
3	0-32(B)-9(C)-4(B)-17(A,E)-6(C)-38(D)-0	104.2	152.0	55.9	4.6	50	110.5
4	0-14(A,E)-13(A)-37(D,E)-21(A,E)-28(A,D,E)-42(B)-0	106.5	156.1	56.7	24.4	50	131.1
5	0-50(A)-26(A)-45(B,E)-33(A,B)-40(A)-41(A,C)-24(C)-44(A,B,C)-1(E)-20(E)-36(B)-0	90.5	152.5	64.0	16.3	50	130.3
6	0-25(B,C,E)-15(D)-30(A,C,D)-31(A,C,E)-27(A,E)-11(A,B)-22(E)-0	108.2	155.0	52.2	39.4	50	141.6
7	0-39(E)-22(B,C)-11(C)-48(B,C)-43(B)-34(B)-7(B,C)-10(B)-29(C)-8(C)-0	89.8	142.9	64.0	12.8	50	126.8
합				413.5	159.1	350	922.6

<표 3>에서 차량경로와 배송제품을 살펴보면, 4, 6, 11, 22번 고객에 분리 배송이 이루어짐을 알 수 있다. 예를 들어, 4번 고객의 주문제품 중 D는 1번 루트, B는 3번 루트에서 배송된다. 4번과 22번 고객의 경우는 각각 1번과 6번 루트의 차량용량 제약 때문에, 6번과 11번 고객의 경우는 앞서 생산된 제품을 차량에 우선 적재하는 과정에서 분리 배송이 발생한 것으로 보인다.

각 루트의 배송제품을 살펴보면, 루트 1번: ABDE, 2번: ACDE, 3번: ABCDE, 4번: ABDE, 5번: ABCE, 6번: ABCDE, 7번: BCE 이다. 5번, 7번 루트는 마지막 생산순서의 제품 D 이전에 생산된 제품만을 적재함으로써 일찍 공장을 출발할 수 있게 되어 다른 루트 보다 장시간 동안 더 많은 고객을 방문한 결과, 수송비는 많이 그리고 납기 지연비는 적게 발생했음을 알 수 있다. 반면에, 1번, 4번 루트는 맨 먼저 생산된 제품 C를 배송에 포함하고 있지 않다. 모든 제품을 적재하고서 가장 늦게 공장을 출발하는 6번 루트는 납기 지연비가 가장 크게 나타났다. 각 루트의 수송비는 공장에서 출발하여 다시 공장으 돌아올 때까지의 순수 이동시간을 근거로 계산된 값이다.

6. 계산실험

6.1 PDPSI의 분리 해법

PDPSI를 통합적으로 풀기 위해 개발한 HGAP의 성능을 평가하기 위해 배송과 생산활동을 분리하여 순차적으로 계획하는 Hurter and Buer(1996)의 알고리즘(H&B)을 비교 대상으로 선정하였다. H&B는 고객이 구독신문의 종류(지방판)에 따라 지역별로 나누어져 있는 단일제품 수요의 문제에서 절대납기를 지키면서 수송시간을 최소로 하는 차량경로와 생산순서를 순차적으로 결정하는 휴리스틱 기법이다.

H&B는 한 차량이 동일제품의 수요구역만을 서비스하도록 제한하기 때문에, 고객이 전 지역으로 분산되어 있는 다제품 수요의 PDPSI에 대해서도 적용을 위해 절차를 약간 수정 보완하였다. 하지만 H&B가 다제품 수요의 문제에서 제품별 분리 배송을 다룰 수 있도록 수정하는 것은 절차상 불가능하다. 따라서 H&B의 적용에서 차량의 혼재는 허용되나, HGAP과 달리 제품별 분리배송은 허용되지 않는다.

수정된 H&B를 단계별로 간단히 정리하면 다음과 같다.

단계 1: depot에서 가장 먼 거리의 고객부터 시작하여 가장 인접한 고객을 찾아 제약조건을 확인하면서 순차적으로 루트를 구축한다. 이 단계에서 단일제품 수요의 경우는 고객 구역별로 그리고 다제품 수요의 경우는 전 지역의 고객을 대상으로 루트 구축작업을 시행한다.

단계 2: 루트구축이 끝나면, 선적 및 하역시간, 지점간 이동시간을 고려하여 각 루트에서 마지막 방문고객의 임시 도착시각을 계산하여 내림차순으로 정리한다.

단계 3: 첫 번째 순서의 루트, 즉 가장 늦은 임시 도착시각의

루트에 포함된 제품 중에서 임의로 하나를 선택하여 첫 번째 생산제품으로 하고, 아직 생산순서가 정해져 있지 않은 루트 제품 중 직전 생산제품에 이은 가장 짧은 준비시간의 제품을 다음 순서의 생산제품으로 선택하는 과정을 반복한다.

단계 4: 두 번째, 세 번째 순서의 루트에서 아직 생산순서가 결정되지 않은 제품들에 대해 단계 3과 동일한 과정을 차례로 반복하면서 모든 제품의 생산순서를 완성한다. 단일제품 수요의 경우는 한 루트에 한 제품만이 존재한다.

단계 5: 생산순서가 결정되면, 루트별로 모든 선적제품들의 생산완료시각을 고려한 마지막 고객의 정확한 도착시각을 계산하여 루트의 절대납기 위반여부를 조사한다. 실행 불가능한 루트에서 절대납기를 위반한 고객들은 모아 이들의 기존 방문순서를 유지하면서 별도의 새로운 루트를 구축한다.

6.2 HGAP와 H&B의 성능비교

개발한 HGAP의 성능을 평가하기 위해 문제형태 I과 II의 PDPSI를 각각 10개씩 만들어, 해 품질과 계산시간의 관점에서 HGAP을 Hurter and Buer의 알고리즘(H&B)과 비교하는 실험을 수행하였다. H&B를 Visual Basic 6.0으로 프로그래밍 하였으며, 모든 계산실험은 IBM PC 호환 Pentium IV(256M RAM, 1.4GHz)에서 수행하였다

모든 실험문제에서 고객지점은 100개, 제품종류는 9가지이며 예제와 동일한 방법으로 depot와 고객들의 위치를 정하였다. 문제형태 I에서는 $x=[0,90]$, $y=[0,90]$ 의 전체 고객지역을 $x=30, 60$ 위치에서 수직방향으로 그리고 $y=30, 60$ 위치에서 수평방향으로 나누어, 총 9개의 동일한 크기의 정사각형 구역 각각에 한 가지씩의 주문제품을 할당하였다. 문제형태 II에서 100개 고객지점 중 임의의 20개 지점은 3가지 제품, 30개 지점은 2가지 제품, 50개 지점은 단일제품을 주문하는 것으로 설정하였다. 따라서 HGAP 적용에서 가상 지점 수는 문제형태 I의 경우 100개, 문제형태 II의 경우 170개이다.

고객지점에서 각 제품 주문량은 문제형태 I에서 [30,60]의 일양분포, 문제형태 II에서 [10,43]의 일양분포에 따라 정하였다. 이에 따라 두 문제형태에서 한 고객의 총 주문량은 평균 약 45개로 동일하게 된다. 두 문제형태에서 모두 고객의 희망납기와 절대납기는 각각 200과 250으로 설정하였다. 또한 차량용량은 500으로, 선적 및 하역시간은 모든 제품에 동일하게 각각 0.02로, 그리고 생산시간과 준비시간은 예제와 동일한 일양분포에 따라 정하였다. 지점 간 이동시간은 직선거리의 반으로 계산한다. 이와 같은 실험문제 설계로 인해, 문제형태 I과 II는 동일한 조건에서 단지 문제형태에 따라 주문제품의 지역분포와 고객의 주문제품 가지 수만 차이가 나기 때문에 문제형태 요인에 따른 HGAP의 성능비교가 가능하다.

HGAP의 적용에서 필요한 비용환산 인자와 유전 파라미터는 모두 예제에서와 동일한 값으로 설정하였다. 즉, $C_1=10$, $C_2=1$, $C_3=0.01$, $C_4=50$, $pop_size=60$, $k_1=0.6$, $k_2=0.4$, $P_c=0.75$, 초

기 $P_r=0.05$, $P_g=0.03$. 하지만 문제형태 I에서는 결합 돌연변이가 불필요하기 때문에 $P_g=0.0$ 으로 하고, 대신에 P_r 의 초기 값을 0.08로 증가하였다. 이들 유전 파라미터 값은 이들의 변화에 대한 간단한 HGAP의 성능평가 계산실험을 통해 구한 것이다. HGAP의 실행은 해의 개선이 0.1% 이내에서 30세대 동안 지속되거나 또는 200세대의 진화가 완료되는 시점 중 어느 한 조건이 먼저 충족될 때 종료하였다. 이러한 종료조건의 설정은 상대적으로 매우 긴 HGAP의 계산시간을 줄이기 위함이었다.

문제형태 I과 II의 실험문제에서 두 기법의 적용에 의해 구해진 해의 비용과 계산시간이 각각 <표 4>와 <표 5>에 정리되어 있다. 먼저, 문제형태 I에서 HGAP의 평균 비용감소율($H\&B$ 적용에 의한 총 비용-HGAP 적용에 의한 총 비용)/ $H\&B$ 적용에

의한 총 비용)은 15.8%로서, 항상 $H\&B$ 보다 더 좋은 해를 구한 것을 <표 4>로부터 알 수 있다. 이러한 결과는 항상 생산비, 수송비, 차량비의 절감과 함께 빈번히 납기지연비의 절감에 의해 얻어진다. HGAP의 해에서 납기지연비가 $H\&B$ 보다 더 큰 경우(문제 7, 9)는 HGAP이 해를 구하는 과정에서 수송비와 차량비를 줄이기 위해 차량에게 서비스 지역을 구분하지 않고 혼재케 함으로써 차량의 출발시각이 늦어져 희망납기 위반이 증가한 때문이라고 볼 수 있다. 문제형태 I의 모든 문제에서 HGAP의 해는 루트에 다른 구역의 고객지점을 포함한다.

특별히 10번 문제에서 HGAP의 비용감소율이 22.7%로서 크게 얻어진 이유는 문제에서 고객지점의 분포형태에 기인한 것으로 보인다. 문제형태 I의 10번 문제에서는 제품구역 간 경계

표 4. 문제형태 I에서 HGAP과 H&B의 성능비교 실험결과

문제번호	HGAP						H&B						비용 감소율 (%)
	생산비	수송비	납기 지연비	차량비	총비용	계산 시간	생산비	수송비	납기 지연비	차량비	총비용	계산 시간	
1	1854.0	559.7	182.1	500	3095.8	360.5	2014.0	772.7	188.3	700	3675.0	0.4	15.8%
2	1786.0	602.1	167.4	500	3055.5	792.4	1946.0	761.7	197.2	650	3555.1	0.1	14.1%
3	1845.0	581.0	218.7	500	3144.7	529.5	2005.0	766.6	256.3	700	3727.9	0.2	15.6%
4	1849.0	582.8	243.8	500	3175.6	278.3	2069.0	754.0	330.0	650	3803.0	0.3	16.5%
5	1750.0	559.2	52.8	450	2812.0	334.2	1860.0	729.3	79.6	600	3268.9	0.3	14.0%
6	1862.0	605.0	107.7	550	3124.7	598.2	1968.0	748.9	241.6	700	3658.5	0.3	14.6%
7	1808.0	547.4	202.3	500	3057.7	377.0	1985.0	747.4	171.1	750	3653.5	0.1	16.3%
8	1841.0	591.9	295.5	500	3228.4	366.3	2081.0	774.7	302.1	700	3857.8	0.1	16.3%
9	1859.0	555.1	200.3	500	3114.4	714.6	2009.0	768.0	87.6	700	3564.6	0.1	12.6%
10	1782.0	600.5	172.3	500	3054.8	219.7	2032.0	832.6	285.0	800	3949.6	0.2	22.7%
평균 (표준편차)	1823.7 (39.2)	578.5 (21.6)	184.3 (67.7)	500 (23.6)	3086.4 (111.6)	457.1 (191.9)	1996.9 (63.6)	765.6 (27.3)	213.9 (85.4)	695 (55.0)	3671.4 (188.6)	0.2 (0.1)	15.8% (2.7)

표 5. 문제형태 II에서 HGAP과 H&B의 성능비교 실험결과

문제번호	HGAP						H&B						비용 감소율 (%)
	생산비	수송비	납기 지연비	차량비	총비용	계산 시간	생산비	수송비	납기 지연비	차량비	총비용	계산 시간	
1	1774.0	529.2	451.2	500	3254.4	1500.0	1824.0	749.2	975.3	600	4148.5	0.4	21.6%
2	1738.0	632.1	381.1	550	3301.2	1654.2	1828.0	859.9	1028.1	750	4466.0	0.4	26.1%
3	1751.0	520.2	571.5	500	3342.7	1704.8	1861.0	777.3	972.7	650	4261.0	0.5	21.6%
4	1738.0	632.1	381.1	550	3301.2	1654.2	1912	724.8	926.1	650	4212.9	0.1	21.6%
5	1742.0	567.3	414.6	500	3223.9	972.5	1872.0	709.3	935.5	650	4166.8	0.3	22.6%
6	1765.0	533.3	658.4	500	3456.7	454.20	1875.0	885.6	1162.0	700	4622.6	0.3	25.2%
7	1713.0	540.9	349.5	500	3103.4	2650	1813.0	794.6	987.8	600	4195.4	0.3	26.0%
8	1730.0	580.9	514.0	500	3324.9	1263.5	1813.0	763.1	1012.2	650	4238.3	0.5	21.6%
9	1766.0	534.9	523.3	500	3324.2	1466.3	1866.0	802.1	934.4	700	4302.5	0.4	22.7%
10	1765.0	614.5	443.5	550	3373.1	2129.6	1935.0	775.7	1005.4	700	4416.1	0.3	23.6%
평균 (표준편차)	1748.2 (19.4)	568.5 (43.9)	468.8 (97.2)	515 (24.2)	3300.6 (94.0)	1516.7 (658.7)	1859.9 (41.5)	784.2 (55.1)	993.9 (68.5)	665 (47.4)	4303.0 (152.6)	0.3 (0.1)	23.3% (1.9%)

부근에 다른 문제와 비교하여 많은 고객지점이 몰려 있어 차량의 혼재에 의해 인접 구역 내 고객들을 루트에 많이 포함할 수 있게 됨으로써 차량비, 수송비, 납기지연비를 크게 줄인 결과이다. HGAP은 219~792초, H&B는 0.1~0.4초의 계산시간을 소요하여 HGAP이 보다 좋은 해를 얻기 위해 긴 계산시간을 필요로 했음을 알 수 있다.

<표 5>로부터, 문제형태 II에서 HGAP의 평균 비용감소율이 23.3%로서 항상 H&B보다 더 좋은 해를 구한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 항상 생산비, 수송비, 차량비의 절감과 함께 특히 납기지연비의 큰 절감에 의해 얻어진다. HGAP과 H&B 해의 총 비용에서 납기지연비가 차지하는 비중이 각각 14.2%와 23.1%로서 문제형태 I에서의 6.0%와 5.8%보다 더 크다. 그리고 HGAP 해에 의한 납기지연비 감소는 총 비용 감소의 52.4%로서 문제형태 I에서의 5.0%보다 훨씬 더 크다.

이러한 현상은 주문제품들이 전 지역에 고르게 분산되어 있는 문제형태 II의 특성과 H&B의 루트 구축과정에 기인한 것으로 보인다. 즉, 문제형태 II에서 H&B는 전 지역을 대상으로 인접 지점을 찾아 연결하면서 루트를 구축한다. 따라서 모든 루트에 거의 모든 종류의 제품이 포함되어 차량의 공장 출발시각이 항상 늦어지고, 이로 인해 납기지연 지점 수와 물량은 증가하게 된 것이다. 이러한 사실은 HGAP의 진화과정에서 납기지연의 개선이 중점적으로 모색될 수 있음을 의미하며, 결과적으로 H&B의 해와 비교하여 큰 폭의 납기지연비 감소가 가능하게 되어 HGAP의 평균 비용감소율이 문제형태 I에서의 약 1.5배로 높게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과에 근거하여, HGAP은 문제형태 I보다 문제형태 II에 대해 더 효과적이라고 말할 수 있다.

<표 4>와 <표 5>에서 문제형태에 따라 각 기법의 수송비와 차량비가 별로 큰 차이가 없는 것은 두 기법의 루트 구축에서 일반적으로 차량용량이 절대납기에 우선하여 제약조건으로 작용한 때문으로 보인다. 문제형태 II에서 HGAP은 454초~2130초, H&B는 0.1초~0.5초의 계산시간이 소요되었다. HGAP의 계산시간이 문제형태 I과 비교하여 크게 증가한 이유는 HGAP의 적용에서 가상 지점 수가 문제형태 I보다 1.7배 증가한 때문이다.

두 형태의 모든 실험문제에서 통합계획 해법인 HGAP이 분리계획 해법인 H&B보다 더 좋은 해를 구하게 된 이유는 GA의 효과 이외에 다음 세 가지로 정리될 수 있다. 첫째, HGAP은 생산순서와 차량경로를 통합하여 함께 다루기 때문에 생산순서에 따른 차량의 실제 출발시각이 고려된 좋은 해를 구할 수 있다. 둘째, HGAP은 생성된 생산순서 또는 차량경로 해의 개선에 특히 효과적인 지역 최적화 기법을 진화과정의 매 세대에서 선택적으로 적용할 수 있다. 셋째, HGAP은 항상 차량의 혼재와 제품별 분리 배송을 허용한다. 문제형태 I과 II에 대한 시행착오적 반복 계산실험 과정에서 HGAP의 해 품질, 계산시간, 진화에 따른 해의 수렴과정이 대상 문제에서 고객지점과 주문제품의 분포형태와 비용환산인자, 주문량, 납기 등의 설계 파

라미터 값에 크게 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.

7. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 단일 생산시설과 다수의 고객으로 구성된 단일기간 재고품목의 공급사슬에서 최적 생산순서와 차량경로의 결정을 목적으로 하는 단일기간 재고품목 생산-분배계획 문제를 제기하고, 혼성 유전알고리즘을 이용한 통합계획 해법(HGAP)의 개발을 소개하였다. 그리고 상세한 계산실험을 통하여 개발한 해법의 성능을 Hurter and Buer의 순차적 분리계획 해법(H&B)과 비교 평가하였다.

HGAP은 해에서 생산순서와 차량경로를 함께 permutation 형식으로 표현하며, 필요할 때마다 수정작업을 실시하여 항상 해의 feasibility를 유지하면서 진화한다. 진화과정의 매 세대에서 모집단의 구성은 교차변이와 돌연변이에 의해 생성된 자손에 대해 지역 최적화 기법을 선택적으로 적용하여 얻어진 개체와 나머지는 이전 모집단에서 적합도가 높은 순서의 개체로써 이루어진다. 교차변이에서 지역 최적화 기법에 대해서는 BX 방법을, 생산순서와 차량경로에 대해서는 PMX 방법을 변형 사용한다. 돌연변이에는 임의의 돌연변이와 결합 돌연변이 방법을 혼합 사용한다.

고객지역이 제품별로 분할되어 있는 단일제품 수요의 문제(문제형태 I)와 고객이 전 지역으로 분산되어 있는 다제품 수요의 문제(문제형태 II)에 대한 계산실험 결과, HGAP은 그 성능이 매우 효과적이며, 최대 200세대까지 진행된 HGAP의 비용감소율은 문제형태 I에서 평균 15.8%, 문제형태 II에서 평균 23.3%로 구해졌다. HGAP이 문제형태 I보다 II에 더 효과적인 이유는 주문제품들이 전 지역에 고르게 분산되어 있는 문제에서 HGAP에 의한 특히 큰 폭의 납기지연 개선이 가능하기 때문인 것으로 보인다. 계산실험에서 만일 HGAP의 진화를 최대 200세대에서 멈추지 않고 더 오래 진행하였다면, HGAP의 비용감소율은 훨씬 더 커졌을 것이다. 그러나 HGAP은 좋은 해를 구하기 위해 긴 계산시간을 필요로 하였다.

추후, 보다 다양한 형태의 PDPSI에 대한 HGAP의 성능평가 실험과 PDPSI의 주요 설계 파라미터 값의 변화에 대한 HGAP의 민감도 분석의 연구가 필요하다. 또한, HGAP의 계산시간을 줄일 수 있는 기술과 최적 유전 파라미터 값의 도출을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

손헌덕 (2002), *매일경제*, 2002. 1. 22.
 정성원, 장양자, 박진우 (2001), 유전알고리즘을 이용한 생산 및 배송 계획, *한국경영과학회지*, 26(4), 133-141.
 Bierwirth, C. and Mattfeld, D.C. (1999), Production Scheduling and Rescheduling with Genetic Algorithms, *Evolutionary Computation*, 7(1), 1-17.

- Braysy, O. and Gendreau, M. (2001), Genetic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, *SINTEF Report*, SINTEF Applied Mathematics, Research Council of Norway.
- Buer, M.G.V., Woodruff, D.L., and Olson, R.T. (1999), Solving the Medium Newspaper Production/Distribution Problem, *European Journal of Operational Research*, 115, 237-253.
- Clarke, G. and Wright, J. (1964), Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, 12, 568-581.
- Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.Y., and Semet, F. (2002), A Guide to Vehicle Routing Heuristics, *Journal of the Operational Research Society*, 53(5), 512-522.
- Erenguc, S.S., Simpson, N.C., and Vakharia, A.J. (2001), Integrated Production/Distribution Planning in Supply Chains: An Invited Review, *European Journal of Operational Research*, 115, 219-236.
- Gen, M. and Cheng, R. (1997), *Genetic Algorithms & Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc..
- Hurter, A.P. and Buer, M.G.V. (1996), The Newspaper Production/Distribution Problem, *Journal of Business Logistics*, 17(1), 85-107.
- Lai, K.K. and Liu, B. (2003), A Goal Programming Model for Vehicle Routing Problems with Soft Time Windows and Its Genetic Algorithm, *International Journal of Systems Science*, to appear in 2003.
- Li, Y., Ip, W.H., and Wang, D.W. (1998), Genetic Algorithm Approach to Earliness and Tardiness Production Scheduling and Planning Problem, *International Journal of Production Economics*, 54, 65-76.
- Mabert, V.A., and Venkataramanan (1998), Special Research Focus on Supply Chain Linkages: Challenges for Design and Management in the 21st Century, *Decision Sciences*, 29(3), 537-552.
- Michalewicz, Z. (1994), *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*, 2nd Edition, Springer-Verlag.
- Reeves, C.R. (1995), A Genetic Algorithm for Flowshop Sequencing, *Computers & Operations Research*, 22(1), 5-13.
- Sarmiento, A.M., and Nagi, R. (1999), A Review of Integrated Analysis of Production-Distribution Systems, *IIE Transactions*, 31, 1061-1074.
- Schmitt L.J. and Amini, M.M. (1998), Performance Characteristics of Alternative Genetic Algorithmic Approaches to TSP Using Path Representation: An Empirical Study, *European Journal of Operational Research*, 108, 551-570.
- Shapiro, J.F. (1999), Chap. 23: Bottom-Up vs. Top-Down Approaches to Supply Chain Modeling, *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Tayur, S., Geneshan, R., and Magazine, M. (eds), Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Wang, C. and Uzsoy, R. (2002), A Genetic Algorithm to Minimize Maximum Lateness on a Batch Processing Machine, *Computers & Operations Research*, 29, 1621-1640.



박 양 병

한양대학교 산업공학과 학사

Pennsylvania State University 산업공학과 석사

Oklahoma State University 산업공학과 박사

Northeastern University 산업 및 정보공학과 조
교수

VPI, UBC 객원교수

현재: 경희대학교 테크노공학대학 산업공학과
교수

관심분야: SCM, 물류, FMS/CIM, 컴퓨터시뮬레
이션