

일간지 생산-배송계획 문제를 위한 혼성유전알고리즘 해법

박양병, 홍성철

경희대학교 테크노공학대학 기계·산업시스템공학부

A Hybrid Genetic Algorithm for the Newspaper Production-Delivery Planning Problem

Yang-Byung Park, Sung-Chul Hong

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

Abstract

많은 기업들은 그들의 생산과 배송 기능을 분리하여 각각의 최적화를 꾀하고 있는데, 이러한 접근방법에 의해 이를 수 있는 절약은 제한적일 수밖에 없다. 최근의 공급사슬경영(SCM)에서는 이들 두 기능의 관련 비용을 총체적 관점에서 잘 조절하면서 동시에 통합 분석하는 것이 더 중요하다고 인식되고 있다. 본 논문에서는 일간지의 생산-배송계획 문제를 다룬다. 일간지는 재고로 유지될 수 없으며, 고객이 정한 시간보다 늦게 배송되면 큰 손실을 야기하는 일종의 단일기간 재고품목이다. 저자들은 일간지 생산-배송의 통합 계획을 위한 혼성유전알고리즘 해법을 개발하고, 예제를 이용하여 Hurter and Buer의 순차적 분리계획 해법과 성능을 비교한다. 계산실험 결과, 개발된 해법의 성능은 효과적인 것으로 나타난다.

1. 서론

지금까지의 통합 생산-배송계획에 관한 연구는 주로 일반 재고품목을 대상으로 생산비, 재고비,

품질비, 수송비, 차량비, 납기지연비 등으로 구성된 총비용의 최소화를 꾀하고 있다(Erenguc et al., 2001, Sarmiento and Nagi, 1999). 하지만, 일반 재고품목과 달리 재고가 허용되지 않는 일회용 제품, 즉 단일기간 재고품목(single-period inventory products)의 생산-배송계획에는 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, 부메성 식품 등이 이에 속한다.

지금까지 단일기간 재고품목의 통합 생산-배송계획에 관한 연구는 대부분 일간지의 생산-배송 문제를 대상으로 하고 있다. Hurter and Buer(1996)는 미국 중서부에 위치한 일간지 신문사에서 발행하는 7종류 지역 조간신문의 생산순서와 각 구독지역 내에 산재해 있는 다수의 보급소를 방문하는 차량의 경로를 순차적으로 수립하기 위한 방법을 개발하여 신문사의 운영에 실제로 적용하였다. Buer et al.(1999)은 일간지 신문사에서 총 배송비를 최소화하는 통합 생산-배송계획의 최적 수리모델을 구축하고, 터부서치와

시뮬레이션 어닐링 탐색기법을 이용한 휴리스틱 해법을 개발하여 실제 자료를 이용한 계산실험을 통해 이들의 성능을 평가하였다. IT 생산의 극단적 형태에 해당되는 일간지 인쇄-배송 문제에 관한 개념과 해법은 중앙 집중된 단일 생산시설에서 생산과 배송 활동이 직접 연결되어 있는 단일기간 재고품목의 생산-배송계획 문제에 잘 적용될 수 있다.

본 논문에서는 일간지 생산 및 배송활동에서 생산비(가공비와 준비비), 수송비, 납기위반비, 차량비의 총합을 최소화하는 생산순서와 차량경로를 통합적으로 계획하기 위해 혼성유전 알고리즘(hybrid genetic algorithm)을 이용한 해법의 개발을 소개한다. 그리고 예제를 이용한 계산실험을 통하여 혼성유전알고리즘 해법의 성능을 Hurter and Buer(1996)의 순차적 분리계획 해법과 비교한다.

2. 일간지 생산-배송계획 문제

일간지 인쇄공장에서 한 대의 고속 운전기를 이용하여 여러 종류의 제품(지역 판)을 순차적으로 생산(인쇄, 끼움, 접음)한다. 한 제품의 생산은 총 수요량에 맞추어 일괄 생산되며, 준비시간은 직전 생산제품에 의존적이다. 구독시장은 행정구역에 따라 여러 소 지역으로 나누어져 있어, 인쇄 공장에서는 매일 새벽 여러 종류의 지역 판을 순서에 따라 생산하여 해당 소 지역 내에 산재해 있는 다수의 보급소(고객)에 정해진 시간까지 배송을 완료한다. 모든 고객에 대해서는 공통의 희망납기(soft time deadline)와 꼭 지켜야 하는 절대납기(hard time deadline)가 주어진다. 배송이 희망납기 보다 늦어지는 경우는 물량과 지연시간에 비례한 납기지연비가 발생한다.

제품의 차량적재는 생산시설에서 해당 제품의 생산이 모두 완료된 후 가능하다. 차량에 혼재는 허용된다. 생산된 제품은 재고로 유지될 수 없으며,

생산된 제품은 기간 내에 전량 고객에게 배송된다. 분리(split) 배송은 불허한다.

문제의 목적함수는 식 (1)과 같이 구성된다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 생산비, 두 번째 항은 수송비, 세 번째 항은 납기지연비, 그리고 네 번째 항은 차량비를 나타낸다. C_1 , C_2 , C_3 , C_4 는 각각 해당 목적의 비용환산인자(cost conversion factor)이다.

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

여기서 파라미터 M 은 제품 종류 수, N 은 고객지점 수, R 은 차량소요대수, t_{ij} 는 지점 i 로부터 j 까지의 이동시간, D 는 희망납기, 지점번호 0은 인쇄공장을 의미한다. 그리고 변수 P_h 는 제품 h 의 생산시간, 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, g_{lv} 는 고객 l 에 차량 v 의 배송물량, a_{lv} 는 고객 l 에 차량 v 의 도착시각을 나타낸다.

3. 혼성유전알고리즘 해법의 개발

진화과정의 매 세대에서 모집단의 구성은 교차변이와 돌연변이에 의해 생성된 자손에 대해 지역최적화 기법을 적용하여 얻어진 개체와 나머지는 이전 모집단에서 적합도가 높은 순서의 개체로써 이루어진다.

• 해의 표현

한 개체는 지역최적화 기법, 생산순서, 차량경로를 나타내는 세 개 부분의 숫자 인자로써 구성된다. 첫 번째 부분은 생산순서와 차량경로의 개선을 위해 적용하는 지역최적화 기법을 표현한다. 인자가 '1'이면, 해당 개체의 생산순서 또는 차량경로에 이 인자의 위치에 해당하는 지역최적화 기법의 적용을 의미한다. '1'의 인자 수는 생산순서와 차량경로에 대해 각각 한 개씩으로 제한된다. 두 번째 부분은 생산순서를

표현하며, 각 인자는 제품번호를 나타낸다. 세 번째 부분은 차량의 고객 방문순서를 표현한다. 차량경로는 인자의 열거순서에 따르며, 공장을 나타내는 번호 '0'으로써 투트를 구분한다.

• 초기 모집단

초기해의 두 번째와 세 번째 부분의 인자 구성에 기존 휴리스틱 기법을 각각 적용하여 초기 모집단의 10% 개체를 생성한다. 먼저, 개체의 첫 번째 부분에서 생산순서와 차량경로에 해당되는 임의의 위치에 각각 '1'을 할당한다. 남은 네 개 인자에는 모두 '0'을 할당한다. 개체의 두 번째 부분은 stochastic insertion heuristic을 적용하여 생산순서 인자 값을 정한다. 즉, 임의로 시작 제품번호를 선택하고, 현재의 부분 생산순서에 모든 가능한 삽입 품목과 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. 개체의 세 번째 부분은 stochastic savings algorithm을 적용하여 차량경로 인자 값을 정한다. 즉, savings 목록(Clarke and Wright, 1964) 내의 결합 대상 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. 모집단의 나머지 90% 개체는 다양한 해로써 탐색 공간을 넓히기 위해 임의 생성한다.

• 적합도 평가 및 선별

총비용 식 (1)을 개체의 적합도 평가함수로 이용한다. 선별작업은 개체들의 수정 적합도에 근거한 roulette wheel 방법을 적용하여 이루어진다. 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.

• 지역최적화

지역최적화를 위해 총 6가지 greedy algorithm (Cordeau et al., 2002)을 제공한다. 즉, 생산순서에

대해 or-opt algorithm과 2-opt exchange algorithm, 각 투트에 대해 or-opt algorithm과 2-opt exchange algorithm, 인접 투트간에 대해 or-opt algorithm과 2-opt exchange algorithm. 지역최적화 단계에서는 생산순서, 차량경로의 순서로 해당 기법이 각각 1회 반복씩 적용된다.

• 교차변이

교차변이는 지역최적화 기법 인자, 생산순서와 차량경로 인자에 대해 각각 다른 방법을 적용한다. 즉, 첫 번째 부분에 대해서 BX(biased crossover)를 2회 그리고 두 번째와 세 번째 부분 중 한 부분을 선택하여 PMX(partially mapped crossover) (Michalewicz, 1994)를 1회 적용함으로써 두 개의 부모로부터 두 개의 자손을 생성한다. 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 지역최적화 기법의 적용에 의해 개선된 비율을 의미한다. 개체의 두 번째와 세 번째 부분 중 어느 부분에 대해 교차변이를 실시할 것인가는 각 부분에 속한 인자 수에 비례한 확률에 근거한다. 세 번째 부분의 차량경로에 대해서는 두 부모에서 모든 '0'을 제거하고 교차변이를 실시한 다음, 생성된 자손에 대해 투트구축 과정을 통해 투트사이에 다시 '0'을 삽입한다.

• 돌연변이

임의 생성된 새로운 개체를 모집단에 추가하는 방법을 이용하여 해의 다양화를 꾀한다. 개체의 모든 인자는 개체의 표현방법에 의거 차례로 임의 생성하여 만들어지며, 개체 수는 변동 임의생성을 $P_m = P_m^0 (f_{min} / f_{ave})$ 에 의해 결정된다. 여기서 P_m^0 은 P_m 의 초기값, f_{ave} 는 모집단 개체의 평균 적합도를 의미한다. 이러한 변동 돌연변이는 유전알고리즘의 적용에서 해의 조기수렴 방지와 효율적 탐색에 효과적이다(Reeves, 1995).

4. 계산실험

개발한 통합계획 해법의 성능을 평가하기 위해 100개의 고객지점과 9가지 지역판으로 구성된 예제를 구축하여 해의 총비용 관점에서 Hurter and Buer의 알고리즘(H&B 해법)(1996)과 비교하는 실험을 수행하였다. H&B 해법은 TSP 해법을 적용하여 절대납기를 지키면서 수송시간을 최소화하는 차량경로를 먼저 결정하고, 이를 토대로 제품의 생산순서를 순차적으로 결정하는 분리계획 휴리스틱 해법이다. 계산은 IBM PC 호환 Pentium IV(256MRAM, 1.4GHz)에서 수행하였다

공장의 위치는 (40,40), 고객지점의 x 와 y 좌표 값은 [5,85]의 일양분포에 따라 정하였다. 그리고 $x=[0,90]$, $y=[0,90]$ 의 전체 고객지역을 $x=30$, 60 위치에서 수직방향으로 그리고 $y=30$, 60 위치에서 수평방향으로 나누어, 총 9개의 동일한 크기의 정사각형 구역 각각에 한 가지씩의 제품을 할당하였다. 제품 주문량은 [30,60]의 일양분포에 따라 정하였다. 차량용량은 500, 희망납기와 절대납기는 200과 250으로 설정하였다. 공장에서 제품별 생산시간은 단위당 [0.03,0.04]의 일양분포, 최초 생산준비시간은 [10,15]의 일양분포, 제품 외준 생산준비시간은 [2,9]의 일양분포에 따라 정하였다. 제품단위당 공장에서의 선적시간과 고객지점에서의 하역시간은 각각 0.02로 모든 제품에 대해 동일한 것으로 가정하였다. 지점간 이동시간은 직선거리의 반으로 계산하였다.

혼성유전알고리즘 해법의 적합도 함수에서 $C_1=10$, $C_2=1$, $C_3=0.01$, $C_4=50$ 으로 설정하였다. 모집단 크기=60, 초기 모집단 구성에서 $k_1=0.6$, $k_2=0.4$, $P_c=0.75$, P_m 초기값=0.1. 해법은 Visual Basic 6.0으로 프로그래밍 하였다. 예제에 대한 혼성유전알고리즘 해법의 적용에서 적합도는 처음 500세대 동안의 활발한 개선과정을 거친 후 간헐적인 작은 개선이 계속되면서 점차 해가 수렴하였다. 1000세대 후에도 해의 개선은 지속되었다.

<표 1>과 <표 2>는 각각 혼성유전알고리즘 해법에 의해 구해진 생산순서와 차량경로 해를 보여준다. <표 1>에서 생산순서 해는 D-F-E-B-A-C-I-F-G이다. 루트별 차량경로, 공장 출발시각 및 최종고객 도착시각이 <표 2>에 정리되어 있다. H&B 해법에 의해 구해진 생산순서와 차량경로 해가 동일한 형식으로 <표 3>과 <표 4>에 정리되어 있다. H&B 해가 혼성유전알고리즘 해보다 4대의 차량을 더 많이 필요로 한다. 혼성유전 알고리즘의 루트 해는 혼재가 발생하고 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 2번 루트의 경우 A, B, D, E 제품이 함께 배송된다.

표 1. 혼성유전알고리즘의 생산순서 해

생산순서	생산제품	생산량	준비시간	생산 시작시각	생산 종료시각
1	D	462	11	11.0	26.8
2	F	705	2	28.8	54.7
3	E	827	3	57.7	83.8
4	B	450	4	87.8	101.0
5	A	175	2	103.0	109.4
6	C	448	2	111.4	126.4
7	I	591	2	128.4	147.2
8	F	371	5	152.2	165.4
9	G	498	3	168.4	187.9

표 2. 혼성유전알고리즘 해법의 차량경로 해

루트 번호	차량경로(배송제품)	공장 출발시각	최종고객 도착시각
1	0-9(F)-36(F)-82(F)-92(F)-30(F)-39(F)-1(F)-16(F)-31(F)-27(F)-0	64.3	123.1
2	0-75(E)-6(E)-88(B)-87(B)-46(B)-68(B)-50(B)-21(A)-63(A)-42(A)-12(D)-0	119.3	193.6
3	0-14(D)-41(G)-8(H)-57(H)-48(H)-29(E)-23(H)-0	193.8	243.1
4	0-54(G)-15(G)-20(G)-84(G)-22(G)-71(G)-34(G)-86(G)-47(G)-18(G)-76(G)-0	157.1	215.8
5	0-25(B)-64(B)-4(B)-3(B)-37(B)-60(F)-99(F)-33(E)-62(E)-24(E)-77(E)-0	111.0	178.6
6	0-38(E)-43(E)-70(E)-74(E)-79(E)-67(E)-78(E)-89(E)-80(G)-0	155.2	198.4
7	0-5(H)-95(H)-17(H)-83(H)-100(H)-51(H)-93(H)-90(E)-49(E)-0	196.0	243.3
8	0-53(B)-10(C)-35(C)-26(C)-2(C)-7(C)-45(C)-66(C)-97(C)-59(C)-0	136.1	194.0
9	0-85(E)-13(D)-91(D)-94(D)-65(A)-72(D)-40(D)-81(D)-52(D)-96(D)-0	118.7	162.6
10	0-98(F)-19(I)-69(F)-1(F)-58(I)-56(I)-44(I)-73(I)-55(I)-32(I)-28(I)-61(I)-0	175.2	238.3

표 3. H&B 해법의 생산순서 해

생산순서	생산제품	생산량	준비시간	생산 시작시간	생산 종료시간
1	I	371	11	11.0	24.2
2	B	450	5	29.2	42.4
3	H	498	5	47.4	66.9
4	F	705	2	68.9	94.8
5	D	462	7	101.8	117.6
6	C	448	4	121.6	136.6
7	G	591	2	138.6	157.4
8	E	827	8	165.4	191.5
9	A	175	7	198.5	204.9

표 4. H&B 해법의 차량경로 해

루트 번호	차량경로(배송제품)	공장 출발시간	최종고객 도착시간
1	0-21(A)-63(A)-65(A)-0	207.5	246.5
2	0-42(A)-0	205.6	216.6
3	0-37(B)-3(B)-4(B)-64(B)-53(B)-46(B)-88(B)-87(B)-68(B)-50(B)-0	51.4	120.8
4	0-26(C)-35(C)-10(C)-7(C)-66(C)-45(C)-97(C)-59(C)-2(C)-0	145.5	204.0
5	0-72(D)-40(D)-81(D)-94(D)-91(D)-13(D)-52(D)-96(D)-14(D)-12(D)-0	126.8	187.3
6	0-90(E)-49(E)-79(E)-74(E)-24(E)-62(E)-33(E)-75(E)-6(E)-0	200.2	247.5
7	0-38(E)-85(E)-43(E)-70(E)-78(E)-89(E)-67(E)-77(E)-0	198.1	235.3
8	0-25(E)-0	192.6	193.6
9	0-1(F)-69(F)-36(F)-98(F)-9(F)-82(F)-92(F)-99(F)-27(F)-60(F)-0	104.3	165.9
10	0-11(F)-16(F)-39(F)-30(F)-31(F)-0	99.3	132.0
11	0-22(G)-71(G)-34(G)-86(G)-47(G)-18(G)-84(G)-20(G)-15(G)-54(G)-76(G)-0	167.3	225.6
12	0-41(G)-80(G)-0	159.2	178.4
13	0-48(H)-57(H)-8(H)-29(H)-17(H)-95(H)-5(H)-93(H)-83(H)-100(H)-51(H)-23(H)-0	76.9	142.5
14	0-73(I)-44(I)-55(I)-28(I)-32(I)-19(I)-58(I)-56(I)-61(I)-0	31.6	101.3

예제에서 두 해법에 의해 구해진 최선해의 항목별 비용이 <표 5>에 요약 정리되어 있다. 모든 비용항목에서 혼성유전알고리즘 해가 H&B해 보다 더 적게 나타났다. 혼성유전알고리즘과 H&B 해의 총비용은 각각 3252.2와 3780.7이며, 혼성유전알고리즘 해법의 비용 감소율은 약 14%로 구해졌다. 예상한 바와 같이, 혼성유전알고리즘 해법에 의한 계산시간은 30분 이상이 소요되었다.

예제에서 혼성유전알고리즘 해법 H&B 해법보다 더 좋은 해를 구하게 된 이유는 유전알고리즘의 효과 이외에 다음 세 가지로 정리될 수 있다. 첫째,

혼성유전알고리즘 해법은 생산순서와 차량경로를 통합하여 함께 다루기 때문에 생산순서에 따른 차량의 실제 출발시간이 고려된 좋은 해를 구할 수 있다. 둘째, 혼성유전알고리즘 해법은 생성된 생산순서 또는 차량경로 해의 개선에 특히 효과적인 지역최적화 기법을 진화과정의 매 세대에서 선택적으로 적용할 수 있다. 셋째, 혼성유전알고리즘 해법은 항상 혼재를 허용한다

표 5. 예제에서 두 해법의 총비용 비교

기법	생산비		납기지연비		차량비	총비용	감소율
	생산 시간	이동 시간	지연 시간	지연 물량			
HGAP	1878.0	619.3	253.9	500	3252.2	14%	
	187.8	619.3	598.3	1276			
H&B	2049.0	743.2	288.5	700	3780.7		
	204.9	743.2	648.7	1400			

6. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 일간지 생산-배송의 통합계획을 위해 혼성유전알고리즘 해법의 개발을 소개하였다. 예제를 이용한 Hurter and Buer의 순차적 분리계획 해법과의 성능비교 실험결과, 개발된 해법은 그 성능이 매우 효과적이며, 최대 600세대 진화까지의 비용감소율은 약 15%로 구해졌다. 해법의 계산과정에서 만일 진화를 더 오래 진행하였다면, 비용감소율은 더 컸을 것이다. 그러나 개발된 해법은 좋은 해를 구하기 위해 매우 긴 계산시간을 필요로 하였다.

계산실험 과정에서 해법의 성능과 진화에 따른 해의 수렴과정이 일간지 생산-배송문제의 구성과 설계 파라미터 값에 크게 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 추후, 보다 다양한 형태의 문제에 대한 해법의 성능평가 실험과 함께 문제의 주요 설계 파라미터 값의 변화에 대한 해법의 민감도 분석이 필요하다. 또한, 해법의 계산시간을 줄일 수 있는 기술과 최적 유전 파라미터 값의 도출을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- 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.
- Hurter, A.P. and Buer, M.G.V. (1996), The Newspaper Production/Distribution Problem, *Journal of Business Logistics*, **17**(1), 85-107.
- 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.