

# 서비스시간대 제약이 존재하는 2기준 차량경로문제 해법에 관한 연구

홍성철\* · 박양병\*

## A Solution of the Bicriteria Vehicle Routing Problems with Time Window Constraints

Sung-Chul Hong · Yang-Byung Park

### 〈Abstract〉

This paper is concerned with the bicriteria vehicle routing problems with time window constraints(BVRPTW). The BVRPTW is to determine the most favorable vehicle routes that minimize the total vehicle travel time and the total customer wait time which are, more often than not, conflicting. We construct a linear goal programming (GP) model for the BVRPTW and propose a heuristic algorithm to relieve a computational burden inherent to the application of the GP model. The heuristic algorithm consists of a parallel insertion method for clustering and a sequential linear goal programming procedure for routing.

The results of computational experiments showed that the proposed algorithm finds successfully more favorable solutions than the Potvin an Rousseau's method that is known as a very good heuristic for the VRPs with time window constraints, through the change of target values and the decision maker's goal priority structure.

### 1. 서 론

기업의 물류활동중 수.배송은 서비스를 요구하는 고객들에 대한 차량의 경로를 최적으로 계획하는 일이 추가 된다. 차량 경로문제(vehicle routing problem : VRP)는 중앙차고지에서 출발한 여러대의 차량들이 지리적으로 여러곳에 산재해 있는 모든 고객들을 방문하여 정해진 양의 서비스(배달 및 수거)를 마치고 정해진 시간내에 중앙차고지로 다시 돌아오는 데 소요되는 최단시간(거리)의 경로를 결정하는 문제이다.

최근 업체간의 심화된 경쟁으로 인해 차량에 의한 수.배송 활동에서 고객에 대한 서비스 수준의 향상은 이미 매우 중요한 문제로서 인식되어 왔다. 이에 따라 차량경로문제에 고객이 요구하는 서비스시간대를 추가로 반영되는 연구가 수행되기 시작한 것이다. 일반적으로 서비스시간대가 존재하는 차량

경로문제에서는 고객이 결정하는 서비스허용 시간대가 제약조건으로 존재한다. 이 제약은 고객들이 수.배송 주문시 서비스를 허용하는 가장 빠른 시각과 가장 늦은 시각을 지정한다는 사실에 근거한 것이다. 연구결과, 고객의 서비스시간대 요구에 대한 만족은 전체 물류성과에 크게 영향을 미치는 것으로 나타나 있다[1].

서비스시간대 제약이 존재하는 VRP에 대한 연구는 그동안 많은 학자들에 의해 다양하고 심도있게 수행되어 왔다. Solomon[14]은 기존의 VRP를 위한 순차접근방법의 발전적기법들을 서비스시간대 제약이 존재하는 VRP에 맞도록 수정.보완하였고, Solomon and Desrosiers[15]은 서비스시간대 제약을 고려하는 여러 종류의 VRP에 대한 기존의 해법들과 이들의 계산능력을 비교.정리한 결과 삽입기법(insertion heuristics)이 가장 우수함을 나타냈다. Potvin and Rousseau[10]와 Russell

\* 경희대학교 공과대학 산업공학과

[11]은 실험을 통하여 삽입기법의 적용에 있어서 병렬접근방법(parallel approach)이 순차접근방법(sequential approach)보다 더 우수함을 확인하였다. 이외에도 column generation에 의한 해법[3],  $k$ -interchange를 바탕으로 한 local search기법[12] 등 여러 해법에 대한 연구들이 다양하게 진행되어 왔다.

서비스시간대 존재하는 VRP에서 차량이 고객에게 정해진 서비스시간대 하한이후에 도착할 때, 이로 인해 발생하는 서비스지연을 실제 여러 상황에서 고객대기시간으로 간주할 수 있다. 예를 들어, 부품 및 자재의 납품, 대리점에서 상품배달, 방문 A/S 등에서 사전에 고객이 요구한 하한시각보다 늦게 서비스차량이 도착하면 고객대기시간이 발생하게 된다. 왜냐하면 고객은 서비스시간대의 하한시각부터 서비스를 받을 준비를 마치고 기다리기 시작하기 때문이다. 이러한 고객대기시간을 단축시킴으로써 고객에게 서비스에 대한 신뢰감과 만족을 증가시킬 수 있을 것이다. 따라서 차량운행비용절감 측면에서의 총차량이동시간 최소화와 함께 고객서비스수준향상 측면에서의 총고객대기시간 최소화를 동시에 다루는 다목적환경에서의 VRP를 고려할 수 있다.

다목적환경에서의 VRP는 Park and Koelling[9]에 의해서 처음 제시된 이래로 그동안 여러 학자들에 의해 다루어져 왔다. 주요 연구로서 통학버스의 다목적 경로문제[2], 산업폐기물 수거차량의 다목적 경로문제[7] 등이 있다. 그러나 본 논문에서 다루고자 하는 서비스시간대 제약이 존재하는 2기준 차량경로문제에 대한 연구는 아직까지 문헌에서 찾아 볼 수 없었다.

본 논문에서는 차량운행비용 절감측면에서의 총차량이동시간 최소화 및 고객서비스수준 향상측면에서의 총고객대기시간 최소화의 두가지 상충하는 목적함수를 설정하여 이들을 함께 성취하고자 하는 서비스시간대 제약이 존재하는 2기준 차량경로문제(bicriteria vehicle routing problems with time window constraints: BVRPTW)를 다룬다. 먼저, BVRPTW를 위한 선형goal programming(GP)모형을 구축하고 이 모형을 적용하여 간단한 예제의 해를 구한다. 그리고 병렬삽입절차와 선형 GP모형을 토대로 2단계 발견적해법을 제안한다. 끝으로, 기존의 VRP 문헌에 소개되어 있는 실험문제들을 이용하여 제안된 발견적해법의 성능평가를 수행한다.

## 2. 서비스시간대와 고객대기시간

BVRPTW에서 서비스시간대는 서비스허용시각의 하한과 상한으로 주어지게 되는데, 이것을 고객의 측면에서 바라보면 고

객이 서비스받기를 희망하는 가장 빠른 시각(서비스시간대의 하한)과 이 시각이 지연될 수 있는 시각의 상한(서비스시간대의 상한)으로 해석할 수 있다. 단, 서비스시간대 상한이후의 서비스는 절대 불허한다. 이러한 서비스시간대를 가정할 때, 다음의 두가지 경우에 각각 차량대기시간과 고객대기시간이 발생할 수 있다.

첫째, 차량이 고객 위치에 서비스시간대의 하한 이전에 도착하면 차량도착시각으로부터 서비스시간대의 하한시각까지 그 시간만큼 차량대기시간이 발생한다. 이때 고객대기시간은 존재하지 않는다. BVRPTW에서 차량대기시간은 단지 차량의 차고지 귀환시각 계산에만 반영된다.

둘째, 차량이 고객의 위치에 서비스시간대 내에 도착하면 차량은 고객에게 도착하자마자 서비스를 제공할 수 있으므로 차량대기시간은 존재하지 않는다. 하지만 서비스시간대의 하한 시각부터 차량도착시각까지의 시간만큼 고객대기시간이 발생하게 된다.

BVRPTW에서는 차량이동시간과 함께 이러한 고객대기시간을 감소시킴으로써 고객에 대한 서비스수준을 향상시킨다는 것을 기본 가정으로 하고 있다.

## 3. BVRPTW 최적 해법

### 3.1 선형 GP모형

BVRPTW는 총차량이동시간 최소화 및 총고객대기시간 최소화의 두가지 목적함수로 구성된 목표달성벡터( $\bar{A}$ )를 최소화하는 정수 선형 GP모형으로 수식화될 수 있다. 이 선형 GP모형은 Malandraki and Daskin[8]의 VRP 수리모형을 기초로 발전시킨 것이다.

제안된 GP모형에서 차고지는 다음과 같이 확장된다.  $NV$ 대 차량의 귀환차고지를 의미하는  $NV$ 개의 가상지점이 추가된다. 이 가상지점들은 마지막 고객번호  $N$  다음부터  $N+1, \dots, N+NV$ 의 서로 다른 기호로써 표현되나 실제로는 출발차고지(지점번호=1)와 모두 위치가 동일하다. 이 방법은 0-1 변수의 수를 감소시켜 주기 때문에 선형 GP모형의 크기를 크게 줄일 수 있는 효과가 있다.

고객지점에서 물품의 수거를 가정하며 구축된 GP모형에서 사용된 상수와 결정변수는 다음과 같다.

● 상수

$N$  = 차고지를 포함한 고객지점들의 수(차고지 지점번호 = 1)

$NV$  = 차량수

$Q$  = 차량의 용량

$R$  = 차량의 차고지 귀환허용시간

$c_i$  = 지점  $i$  에서의 수거량 ( $c_i = 0$  for  $i = 1, N+1, \dots, N+NV$ )

$s_i$  = 지점  $i$  에서의 서비스소요시간

( $s_i = 0$  for  $i = 1, N+1, \dots, N+NV$ )

$t_{ij}$  = 지점  $i$  에서 지점  $j$  까지 이동시간

$E_i$  = 지점  $i$  의 서비스시간대 하한 ( $E_i=0$ )

$L_i$  = 지점  $i$  의 서비스시간대 상한 ( $L_i=0$ )

$TT$  = 총차량이동시간의 목표값

$B_p, B_s$  = 임의의 매우 큰 값

● 결정변수

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{만일 구간 } (i,j) \text{가 차량경로에 포함되면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

$a_i$  = 차량이 지점  $i$  에 도착한 시각 ( $a_i = 0$ )

$q_i$  = 지점  $i$  까지의 차량경로에서 적재된 양 ( $q_i = 0$ )

$n_{li}$  = 제약식  $(l)$  의 음편차(negative deviations) ( $l = 2, \dots, 11$ )

$p_{li}$  = 제약식  $(l)$  의 양편차(positive deviations) ( $l = 2, \dots, 11$ )

구축된 BVRPTW 선형 GP모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } \bar{A} = & \left\{ \left[ \sum_{j=2}^{N+NV} (n_{(2)j} + p_{(2)j}) + \sum_{i=2}^N (n_{(1)i} + p_{(1)i}) \right] \right. \\ & + (n_{(3)} + p_{(3)}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^{N+NV} n_{(9)ij} + \sum_{j=2}^N p_{(9)j} + \sum_{j=N+1}^{N+NV} p_{(7)j} \\ & \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^{N+NV} n_{(8)ij} + \sum_{j=N+1}^{N+NV} p_{(8)j} \right\}, P_{(10)}, \sum_{i=1}^N p_{(11)i} \end{aligned} \quad (1)$$

subject to :

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N x_{ij} + n_{(2)j} - p_{(2)j} = 1, \quad j = 2, \dots, N+NV \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{j=2 \\ i \neq j}}^{N+NV} x_{ij} + n_{(3)i} - p_{(3)i} = 1, \quad i = 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{j=2}^N x_{ij} + n_{(4)i} - p_{(4)i} = NV \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_j - a_i - n_{(1)ij} - B_i x_{ij} + n_{(5)ij} - p_{(5)ij} &= t_{ij} + s_i - B_i, \\ i &= 1, \dots, N; \\ j &= 2, \dots, N+NV; i \neq j \end{aligned} \quad (5)$$

$$a_j + n_{(6)j} - p_{(6)j} = L_j, \quad j=2, \dots, N \quad (6)$$

$$a_j + n_{(7)j} - p_{(7)j} = R, \quad j=N+1, \dots, N+NV \quad (7)$$

$$q_j - q_i - B_s x_{ij} + n_{(8)ij} - p_{(8)ij} = c_j - B_s, \quad \begin{matrix} i=1, \dots, N; \\ j=2, \dots, N+NV; i \neq j \end{matrix} \quad (8)$$

$$q_j + n_{(9)j} - p_{(9)j} = Q, \quad j=N+1, \dots, N+NV \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^{N+NV} t_{ij} x_{ij} + n_{(10)} - p_{(10)} = TT \quad (10)$$

$$a_i + n_{(11)i} - p_{(11)i} = E_i, \quad i=1, \dots, N \quad (11)$$

$$a_i, q_i \geq 0, \quad i=1, \dots, N+NV \quad (12)$$

GP 모형에서 식 (2)~(9)는 BVRPTW를 정의하기 위한 시스템 제약식들이고 식 (10)과 (11)은 목표제약식들이다. 목표 달성벡터 (1)에서는 분석자에 의해 사전에 주어진 우선순위로 이들 제약식들의 음편차 또는 양편차 변수만을 최소화하거나 음편차와 양편차 변수를 함께 최소화하여 각 목적들을 최소화한다. 첫번째 우선순위는 9개의 시스템 제약식들에게 주어진다. 그리고 두번째와 세번째 우선순위로서 총차량이동시간 최소화 목적과 총고객대기시간 최소화 목적을 고려한다. 이 두 목적의 우선순위는 분석자의 선호에 따라 바뀌어질 수 있다.

식 (2)~(4)는  $NV$ 대의 차량이 각 고객에 대하여 1회의 방문을 하도록 제한하며, 식 (5)는 지점  $i$ 에서의 차량대기시간 및 서비스소요시간과 지점  $i$ 에서 지점  $j$ 까지의 차량이동시간을 반영하여 지점  $j$ 에서의 차량도착시각을 계산하기 위한 것이다[4].  $p_{(5)ij}$ 의 값은  $x_{ij} = 0$ 인 경우에 요구되어진다. 식 (6)은 지점  $j$ 에서 차량의 도착시각이 서비스시간대의 상한 이전에 이루어지도록 제한하며, 목표제약식 (11)과 함께 서비스시간대를 정의하게 된다. 식 (7)은 차량의 귀환시간에 대한 제약식이며, 식 (8)은 지점  $j$ 에서 차량이 출발할 때의 차량적재량을 계산한다. 식 (9)는 차량의 적재량이 차량용량을 초과하지 않도록 제한한다. 식 (5)와 식 (8)은 불법부분경로(illegal subtours)의 생성

을 막아주는 역할(즉, 외판원문제의 불법부분경로 제거 제약식의 일반화)도 수행한다[8]. BVRPTW에서 다루는 두가지 목적은 식 (10)과 식 (11)에 의해 제약을 받는다. 식 (10)은 총 차량이동시간이 목표값  $TT$ 이내에 유지되도록 제한하며 식 (11)은 지점  $i$ 에서의 차량대기시간,  $n_{(i)}$ 과 고객대기시간,  $p_{(i)}$ 을 계산한다. 만일 각 지점에서의 차량대기시간을 포함한 총차량이동시간을 최소화하려면 식 (10)의  $\sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^{N+NV} t_{ij}x_{ij}$ 을  $\sum_{i=N+1}^i a_i$ 으로 교체하면 된다.

3.2 적용예

이용가능한 차량의 수가 한대이고 고객수는 차고지를 포함하여 9인 간단한 예제에 대해 선형 GP모형을 구축하여 해를 구하여 보았다. 지점간의 차량이동시간은 지점간의 직선거리와 같다고 가정하였으며 <표 1>에 예제의 요약 및 입력자료가 정리되어 있다. 구축된 GP모형은 IBM 호환 PC/586에서 LINDO[13]를 이용하여 실행 되었다.

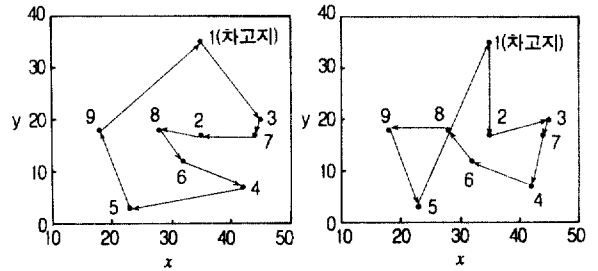
<그림 1>에 두 목적의 우선순위에 따른 두가지의 해를 정리하였다. (b)의 해는 총차량이동시간의 관점에서 (a)보다 5.3단위시간이 길지만, 총고객대기시간의 관점에서는 141.9단위시간이 단축되는 것을 알 수 있다. 본 BVRPTW의 선형GP모형에서는 분석자의 주관적 판단에 따른 두 목적의 우선순위와

<표 1> 예제의 요약 및 입력자료

고객수	차량용량	귀환시간	서비스 소요시간	서비스시간대 평균 길이
8	200	230	10	55.4

고객지점 번호(i)	고객지점 위치		수거량 (c <sub>i</sub> )	서비스시간대의 하한 (E <sub>i</sub> )	서비스시간대의 상한 (L <sub>i</sub> )
	x <sub>i</sub>	y <sub>i</sub>			
1(차고지)	35	35	-	-	-
2	35	17	7	22	87
3	45	20	11	37	96
4	42	7	5	72	131
5	23	3	7	111	162
6	32	12	7	77	134
7	44	17	9	56	109
8	28	18	26	79	116
9	18	18	17	123	195

목표값의 조정을 통해서 다양한 해를 구할 수 있다. <그림 1>에서 번호는 고객지점의 번호를 나타내고 있다.



(a) 총차량이동시간 최소화 우선 [총차량이동시간114.9, 총고객대기시간268.5]  
 (b) 총고객대기시간 최소화 우선 [총차량이동시간120.2, 총고객대기시간126.6]

<그림 1> 선형GP 모형의 적용 해

제한된 GP모형은 비록 선형모형이지만, NP-hard 문제에 속하여 고객지점의 수가 늘어나면 계산시간이 크게 증가되어 해를 구하기에 극히 비효율적이 된다. 이에 따라, 본 연구에서는 새로운 두단계로 구성된 발견적기법을 개발하였다.

4. 발견적해법

개발된 발견적해법은 두단계로 구성되어 있다. 첫번째 단계에서는 목적의 주어진 우선순위를 토대로 병렬삽입절차(parallel insertion procedure)를 적용하여 전체 고객들을 여러 그룹으로 나눈다(clustering 단계). 두번째 단계에서는 각 그룹에 대해 Sequential Linear GP(SLGP) 과정[5,6]을 적용하여 차량의 경로를 결정한다(routing 단계). 따라서 필요한 차량의 대수는 첫번째 단계에서 얻어진 그룹수로 결정된다. 두단계의 구체적인 내용은 다음과 같다.

4.1 clustering 단계

단계 1: 초기 그룹(차량)의 수와 각 그룹에 대한 seed고객을 결정한다.

- 1) 모든 고객들 중 서로 시간상 가장 멀리 떨어져 있는 두 고객을 seed고객으로 선정한다.
- 2) 이들과 서비스시간대 제약으로 인하여 동일한 그룹에 포함될 수 없는 고객들을 추가로 seed고객으로 지정한다. 결정된 seed고객수가 바로 초기 그룹수 R이 된다.

단계 2: seed고객들을 각각 중앙차고지와 연결하여 각 그룹

에 대하여 임시경로를 구축한다.

단계 3: 그룹  $r$  ( $r=1, \dots, R$ )의 임시경로  $(i, j)$  사이에 아직 어는 그룹에도 포함되어 있지 않은 고객들중 차량용량, 서비스 시간대, 차량귀환시간 등의 관점에서 삽입이 가능한 모든 고객  $x$  ( $x=1, \dots, X$ )에 대해 식 (13)과 (14)를 계산한다. 식 (13)과 (14)는 현재 임시경로  $r$ 의  $(i, j)$  사이에 고객  $x$ 를 삽입함으로써 발생하는 차량이동시간과 고객대기시간의 증가량을 각각 의미한다. 식 (14)에서  $PF_k$ 는 고객  $x$ 의 삽입에 따른 후속경로상 고객  $k$ 의 대기시간 증가분을 의미한다.

$$C_{1r}(i, x, j) = t_{ix} + t_{xj} - t_{ij} \tag{13}$$

$$C_{2r}(i, x, j) = cw_x + \sum_{k \in S} PF_k \tag{14}$$

$$PF_k = \begin{cases} b'_k - b_k, & k = j \\ \text{Max}\{PF_{k-}, -vw_k\}, & 0; k \in S, k \neq j \end{cases}$$

여기서  $t_{ij}$  = 고객  $i$ 와 고객  $j$ 사이의 차량이동시간  
 $cw_x$  = 임시경로에 삽입된 고객  $x$ 의 대기시간  
 $b'_k$  = 고객  $x$ 의 삽입후 고객  $k$ 의 서비스 시작시각  
 $b_k$  = 고객  $x$ 의 삽입전 고객  $k$ 의 서비스 시작시각  
 $vw_k$  = 고객  $x$ 의 삽입전 고객  $k$ 에서의 차량대기시간  
 $S$  = 임시경로에서 고객  $j$ 를 포함한 후속경로상의 고객집합

단계 4: 삽입대상 고객  $x$ 의 최선의 삽입위치는 식 (15)를 최소화함으로써 결정된다. 즉,  $r^*(i, j) = \text{Min}_{r(i, j)} C_r(i, x, j)$ . 식 (15)에서  $a$ 는 두가지 목적에 대한 분석자의 선호에 근거하여 결정된다.  $C_r(i, x, j)$ 는 현재의 임시경로상 인접한 두지점  $i$ 와  $j$  사이에 고객  $x$ 를 삽입함에 따른 벌칙값(penalty function)으로 간주될 수 있다.

$$C_r(i, x, j) = a \cdot c_{1r}(i, x, j) + (1 - a) \cdot c_{2r}(i, x, j), 0 \leq a \leq 1 \tag{15}$$

단계 5: 식 (15)에 의하여 구해진 삽입대상 고객들의 최선 및 차선의  $C_r(i, x, j)$  값을 각각  $p(x)$ 와  $p'(x)$ 라 하여 식 (16)을 계산한 다음, 그중에서 가장 큰  $A(x)$  값을 갖는 고객  $x^*$ 를 선택하여 최선의 삽입그룹과 위치에 삽입한다. 차선의 삽입위치가 존재하지 않는 경우  $p'(x)=0$ 으로 한다. 따라서 최선과 차선의 삽입위치에 대한  $C_r(i, x, j)$ 의 차가 크고 포함이 가능한 그룹의 수가 적은 고객부터 우선적으로 그룹에 포함된다.

$$A(x) = [p'(x) - p(x)]/v(x), x=1, \dots, X \tag{16}$$

여기서  $v(x)$  = 고객  $x$ 의 포함이 가능한 그룹수

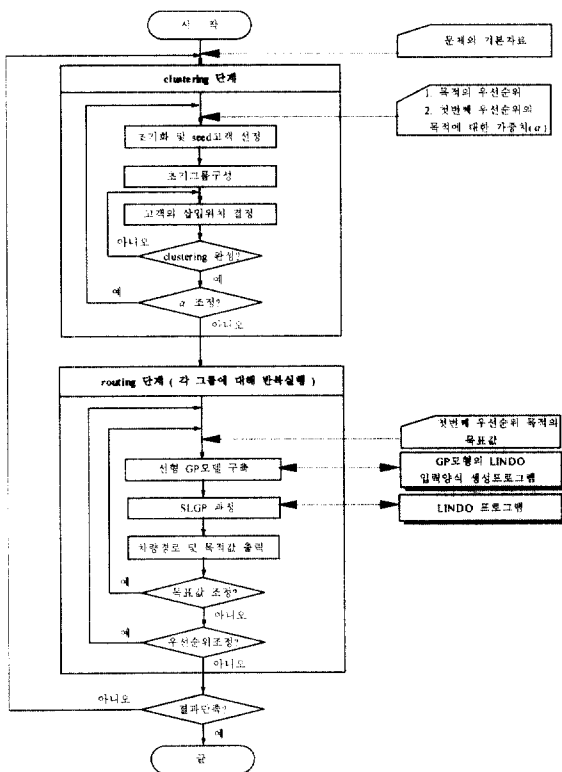
현재의 그룹들에게 포함이 불가능한 고객이 존재하는 경우는 이 고객을 seed 고객으로 하여 새로운 그룹을 구축한다.

단계 6: 모든 고객들이 그룹으로 나누어지면 과정을 멈추고 그렇지 않으면 단계3부터 반복한다.

### 4.2 routing 단계

이 단계에서는 clustering 단계를 거쳐 구성된 고객그룹 각각에 대해 3.1절에서 구축된 선형 GP모형(차량이 1대인 경우)을 사용하여 분석자의 입장에서 가장 만족스러운 차량경로해를 결정한다. 이때 선형 GP모형을 풀기 위한 방법으로 SLGP 과정을 적용한다.

각 차량의 경로에 대한 SLGP 적용과정은 다음과 같이 이



〈그림 2〉 제안된 BVRPTW 발견적해법의 순서도

루어 진다. 먼저, 첫번째 우선순위 목적을 단일목적함수로 한 LP모형을 최소화한다. 그리고나서 구하여진 첫번째 우선순위의 목표값이 목표값으로 반영된 제약식을 추가하고 두번째 우선순위 목적을 단일목적함수로 한 LP모형을 새롭게 구성한다. 이 LP모형에 대하여 목표값을 조정하면서 해를 구하는 과정이 반복된다. 이때 두 목적함수값 사이에 trade-off가 이루어진다.

BVRPTW를 위해 제안된 발견적해법의 절차가 <그림2>에 순서도로서 정리되어 있다.

### 5. 계산실험

제안된 발견적해법의 성능을 평가하기 위해 Solomon의 실험문제[14]중 6개의 문제를 선정하여 계산실험을 수행하였다. 이 문제들은 모두 일양분포에 의해 임의로 그 위치들이 정해진 100개의 고객지점들을 다루고 있다. 모든 문제에서 차량용량, 차량귀환시간, 고객서비스 소요시간은 각각 200, 230, 10으로 동일하게 설정하였다. 그리고 고객서비스시간대의 폭의 크기가 해법의 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해 각 문제에서의 서비스시간대 평균길이를 다르게 설정하였다. (즉, 문제1: 10.0, 문제2: 30.0, 문제3: 57.4, 문제4: 58.9, 문제5: 72.4, 문제6: 103.0)

제안된 발견적해법은 FORTRAN 언어로써 프로그래밍 되었으며, 두번째 단계에서의 SLGP과정은 LINDO[13]와 연결하여 배취작업으로 수행하였다. 모든 계산실험은 IBM 호환 PC/586을 이용하여 실행되었다.

서비스시간대 제약이 존재하는 VRP를 위한 기존의 발견적해법들 중에서 Potvin and Rousseau의 기법(P&R 기법)[10]이 매우 우수한 기법으로 알려져 있다. 비록 P&R 기법이 서비스시간대를 엄격히 지키면서 총차량이동시간을 최소화하는 단일목적의 VRP문제를 대상으로 하고 있지만, BVRPTW를 위한 다른 해법이 아직 존재하지 않는 상황에서 비교대상으로 합당한 기법으로 인식되었다. 이에따라 BVRPTW에서의 제안된 발견적해법의 수행도를 평가하기 위해 P&R 기법을 비교대상으로 선정하였다.

<표 2>에 6개의 실험문제에 대한 제안된 발견적해법과 P&R 기법의 해가 정리되어 있다. 제안된 발견적해법의 clustering 단계에서는 두목적의 정해진 우선순위에 따라 가중치  $\alpha$ 를 0.05씩 변화시키면서 얻어진 해들 중 첫번째 우선순위 목적값이 최선인 clustering 결과를 선택하였다. 그리고 routing 단계

에서는 첫번째 우선순위 목적의 목표값을 적절히 변경하면서 차량의 경로를 구축하였다. 표에서 최선해는 실험문제에 대해 지금까지 구해진 가장 좋은 해이며, 문제1과 문제3의 최선해는 최적해이다.

실험결과, 일반적으로 총차량이동시간의 최소화가 첫번째 우선순위의 경우  $\alpha$ 는 1.0~0.9에서 clustering 결과가 선택되었고 총고객대기시간의 최소화가 첫번째 우선순위의 경우  $\alpha$ 가 작아질 수록 총고객대기시간이 감소되는 해를 구할 수 있었으나, 차량수가 점진적으로 증가되는 경향이 있다. 따라서 <표 2>에서는 최소의 차량수로써 얻어진 결과들만을 다루고 있으므로 총고객대기시간의 최소화가 첫번째 우선순위의 경우  $\alpha$ 의 값은 대체적으로 0.5~0.6에서 clustering 결과가 선택되었다. 서비스시간대 평균길이가 작은 문제일수록 구하여지는 nondominated solutions의 수가 적게 나타났으며 더욱 많은 차량이 소요되었다. 그리고 서비스시간대 평균길이가 큰 문제일

<표 2> 제안된 발견적해법과 Potvin & Rousseau 기법과의 비교

문제	제안된 발견적해법		P&R 기법	최선해	
	GTT	GCW	[10]	[10,11,14]	
1	a	1733.3	1813.6	1736.5	1608
	b	188.7	165.3	213.0	n.a.
	c	19	19	19	18
2	a	1529.4	1579.0	1525.2	1421
	b	1053.4	756.4	1098.0	n.a.
	c	15	15	15	14
3	a	1542.5	1648.6	1528.7	1434
	b	2142.4	909.6	2461.9	n.a.
	c	18	18	18	17
4	a	1249.7	1367.5	1363.2	1205
	b	2497.6	2355.7	2776.8	n.a.
	c	12	12	12	12
5	a	1349.4	1406.7	1372.9	1350
	b	3631.0	3088.1	3678.2	n.a.
	c	12	12	12	12
6	a	1467.3	1508.7	1430.4	1207
	b	5530.0	4771.9	5802.9	n.a.
	c	13	13	13	13

(주) a : 총차량이동시간, b : 총고객대기시간, c : 차량수  
 GTT : 총차량이동시간최소화 우선  
 GCW : 총고객대기시간최소화 우선  
 n. a. : 자료없음

수록 총고객대기시간이 증가되는 것을 알 수 있었다.

〈표 2〉에 나타나 있듯이, 제안된 발견적해법은 P&R기법과 비교하여 모든 문제에서 목적의 우선순위와 관계없이 더 짧은 총고객대기시간의 해를 얻을 수 있었다. 총차량이동시간 최소화가 우선인 경우(GTT), 제안된 해법은 P&R기법과 비교하여 모든 문제에서 총차량이동시간은 별로 차이가 없었으며, 문제 1, 4, 5에서는 오히려 약간 감소하였다. 그리고 총고객대기시간 최소화가 우선인 경우(GCW), 제안된 해법은 P&R기법과 비교하여 전체적으로 총차량이동시간이 대략 3~5% 증가한 반면에 총고객대기시간은 대체적으로 20~30%정도 감소하였다. 특히, 문제3의 경우 총차량이동시간이 7.3% 증가한 반면에 총고객대기시간은 무려 63%나 감소하였다. 그러나 제안된 발견적해법은 routing 단계에서의 SLGP 적용과정으로 인해 계산시간 측면에서 P&R기법에 비하여 길게 소요되는 단점을 가지고 있다.

제안된 발견적해법의 적용과정에서 총차량이동시간과 총고객대기시간이 함께 증가하거나 감소된 경우도 있었으나 일반적으로 두목적은 크게 상충하는 것을 확인할 수 있었다. 이외에도 실험과정에서 각 목적의 목표값을 조정함에 따라 무수히 많은 nondominated solutions이 존재한다는 것과, 또 차량수의 증가는 총고객대기시간을 크게 감소시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.

## 6. 결론

본 논문에서는 물류비용 관점에서의 총차량이동시간 최소화 와 고객서비스향상 관점에서의 총고객대기시간 최소화가 함께 고려된 서비스시간대 제약이 존재하는 2기준 차량경로문제(BVRPTW)를 다루었다. 먼저, BVRPTW의 선형 GP모형을 구축하여 분석자의 관점에서 가장 만족스러운 해를 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 다양한 크기의 BVRPTW를 용이하게 다룰 수 있는 발견적해법을 개발하였다. 이 발견적해법은 clustering과 routing의 두단계로 구성되어 있다.

제안된 발견적해법에 대한 실험결과, Potvin and Rousseau 기법과 비교하여 모든 실험문제에서 목적의 우선순위와 관계없이 총차량이동시간은 별로 차이가 없었으나, 총고객대기시간은 크게 감소하였다. 특히, 총고객대기시간의 최소화가 우선인 경우 총고객대기시간은 매우 크게 감소하였다. 실험과정을 통하여 두목적은 일반적으로 크게 상충하고 있다는 것과 각 목적의 목표값 조정에 따라 수많은 nondominated solutions이

존재한다는 것을 확인하였다. 이에 따라 제안된 발견적해법의 적용에서 두목적에 대한 선호와 목표값의 조정을 통하여 분석자의 입장에서 아주 만족할만한 차량경로해를 구할 수 있었다.

추후, 제안된 발견적해법을 기본으로한 interactive-graphic 컴퓨터시스템의 개발은 차량에 의한 수배송활동을 효과적으로 수행하는데 크게 이바지할 것이라 사료된다.

## 【참 고 문 헌】

- [1] 유병우, 김동혁, "업종별 물류성공에 영향을 미치는 물류 활동요인에 관한 실증연구", 로지스틱스연구, 제3권, 제1호, pp.1-37, 1995.
- [2] Bowerman R., Hall B., and Calamai P., "A Multi-Objective Optimization Approach to Urban School Bus Routing: Formulation and Solution Method", Transportation Research A, Vol.29A, No.2, pp.107-123, 1995.
- [3] Desrosiers J., Soumis F., and Desrochers M., "Routing with Time Windows by Column Generation", Networks, Vol. 14, pp.545-565, 1984.
- [4] Golden B., Magnanti T., and Nguyen H., "Implementing Vehicle Routing Algorithms", Networks, Vol.7, pp.113-148, 1977.
- [5] Ignizio J., Goal Programming and Extensions, Lexington Books, Lexington, MA, U.S.A., 1976.
- [6] Ignizio J., Linear Programming in Single and Multiple Objective Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., U.S.A., 1982.
- [7] List G., Mirchandani P., "An Integrated Network/Planar Multiobjective Model for Routing and Siting for Hazardous Materials and Wastes", Transportation Science, Vol.25, No. 2, pp.146-156, 1991.
- [8] Malandraki C., and Daskin M., "Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms", Transportation Science, Vol.26, No.3, pp. 185-199, 1992.
- [9] Park Y. B. and Koelling P., "A Solution of Vehicle Routing Problems in a Multiple Objective Environment", Engineering Costs and Production Economics, Vol.10, pp.121-132, 1986.

[10] Potvin J., and Rousseau J., "A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows", European Journal of Operational Research, Vol.66, pp.331-340, 1993.

[11] Russell R., "Hybrid Heuristics for Vehicle Routing Problem with Time Windows", Transportation Science, Vol. 29, No. 2, pp.156-166, 1995.

[12] Savelsbergh M., "Local Search in Routing Problems with Time Windows", Annals of Operations Research, 4, pp. 285-305, 1986.

[13] Schrage L., User's Manual for Linear, Integer, and Quadratic Programming with LINDO, Scientific Press, U. S.A, 1989.

[14] Solomon M., "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints", Operations Research, Vol.35, No.2, pp.254-265, 1987.

[15] Solomon M., and Desrosiers J., "Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems", Transportation Science, Vol.22, pp.1-13, 1988.



**박양병**  
 1978년 한양대학교 산업공학과 졸업  
 1981년 Pennsylvania State University 산업공학 석사학위  
 1984년 Oklahoma State University 산업공학 박사학위  
 1984년 Northeastern University 산업 및 정보공학과 조교수  
 1990년 Virginia Polytechnic Institute and State University 산업공학과 객원교수  
**현 재** 경희대학교 산업공학과 교수  
**관심분야** 생산/물류, FMS/CIM 등



**홍성철**  
 1995년 경희대학교 산업공학과 졸업  
 1997년 경희대학교 산업공학 석사학위  
**현 재** 경희대학교 산업공학과 박사과정  
**관심분야** 생산물류, 시뮬레이션, AI 응용 등