

다종의 차량과 납품시간창을 고려한 동적 로트크기 결정 및 디스패칭 문제를 위한 자율유전알고리즘

김병수¹ · 이운식^{2*}

¹부경대학교 일반대학원 기술경영(MOT) 협동과정 / ²부경대학교 시스템경영공학과

An Adaptive Genetic Algorithm for a Dynamic Lot-sizing and Dispatching Problem with Multiple Vehicle Types and Delivery Time Windows

Byung Soo Kim¹ · Woon-Seek Lee²

Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University, Busan, 608-739, Korea
Department of Systems Management and Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-739, Korea

This paper considers an inbound lot-sizing and outbound dispatching problem for a single product in a third-party logistics (3PL) distribution center. Demands are dynamic and finite over the discrete time horizon, and moreover, each demand has a delivery time window which is the time interval with the dates between the earliest and the latest delivery dates. All the product amounts must be delivered to the customer in the time window. Ordered products are shipped by multiple vehicle types and the freight cost is proportional to the vehicle-types and the number of vehicles used. First, we formulate a mixed integer programming model. Since it is difficult to solve the model as the size of real problem being very large, we design a conventional genetic algorithm with a local search heuristic (HGA) and an improved genetic algorithm called adaptive genetic algorithm (AGA). AGA spontaneously adjusts crossover and mutation rate depending upon the status of current population. Finally, we conduct some computational experiments to evaluate the performance of AGA with HGA.

Keywords: Dynamic Demand, Lot-Sizing, Dispatching, Delivery Time Windows, Multiple Vehicle Types, Adaptive Genetic Algorithm

1. 서론

제 3자 물류(3PL)의 서비스 중 가장 중요한 기능들은 공급업자들로부터 3PL 물류센터까지 물품들을 보충하는 기능과 저장된 물품들을 적시에 고객들의 주문에 맞추어 물류센터로부터 고객들에게 주문 배송하는 기능이다. 이러한 상황은 물품의 보충을 위한 로트크기(Lot-sizing) 결정문제와 각각의 고객들의 수요에 대응하기 위한 디스패칭(Dispatching) 문제들을 발생

시킨다. 본 논문의 문제 상황은 공급업자로부터의 물품 보충이 다양한 적재용량을 가진 운송차량을 이용하여 물류센터로 이동되기 때문에 운송비용은 사용되는 차량의 형태와 대수에 비례하게 된다. 또한, 납품시간창(Delivery Time Window)이라고 불리는 고객의 수요들이 고객과의 공급계약에 의해 특정한 벌과비용(Penalty Cost)없이 납품허용을 배려받을 수 있는 시간구간이 정의된다. 각각의 수요에 대해 독립적으로 정해진 납품시간창은 가장 이른 납품시간과 가장 늦은 납품시간으로

본 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-DO1222).

* 연락처 : 이운식 교수, 608-739 부산광역시 남구 용당동 부경대학교 시스템경영공학과, Tel : 051-629-6482, Fax : 051-629-6496,

E-mail : iewslee@pknu.ac.kr

2011년 9월 10일 접수; 2011년 10월 14일 수정본 접수; 2011년 11월 10일 게재 확정.

구성되는 시간구간으로 형성되며 고객은 이 납품시간창 내에 제품을 전달 받아야 한다. 본 논문에서는 인바운드 및 아웃바운드 물류 그리고 3PL 물류센터 물류의 포괄적인 관점에서 다종의 운송차량을 고려한 공급계획 및 납품시간창을 고려한 납품계획을 동시에 결정하는 효율적인 운영전략을 수립하고자 한다. 이 문제의 해결을 위해 본 논문은 다종의 차량을 고려한 인바운드(Inbound) 주문과 납품시간창을 고려한 아웃바운드(Outbound) 디스패칭을 동시에 결정할 수 있는 최적화 모형 및 휴리스틱 알고리즘을 제시한다. 로트크기 결정 문제와 관련된 선행연구들을 살펴보면, Wagner and Whitin(1958)은 단일제품에 대해 유한생산계획기간 동안의 동적 수요를 만족시키는 로트크기 결정 문제를 처음으로 연구하였다. 만약, 전통적인 동적 로트크기 결정 문제에 화물운송비용을 포함하면, 이 문제는 다수의 고정비용이 발생하는 한층 복잡한 로트크기 결정 문제로 확장된다. Lee(1989)는 생산 및 재고 비용은 시간에 관계없이 일정하다는 가정을 가지는 화물수송비용을 고려한 동적 로트크기 결정 문제를 연구하였다. Lee(1998)는 Lee(1989)의 문제를 다종의 화물컨테이너를 고려한 문제로 확장하였다. Lee *et al.*(2003a)은 Lee(1998)의 문제를 확장하여, 적재용량이 다른 다종의 화물컨테이너의 최적 조합과 생산계획을 동시에 찾을 수 있는 동적계획법을 기초로 한 해법을 제안하였다. Lee *et al.*(2003b)은 아웃바운드 운송계획을 고려한 2단계 구조의 동적 로트크기 결정 문제를 고려하였다. Topal *et al.*(2003)은 인바운드 수송환경에서의 일정한 수요를 갖는 2단계 구조의 동적 로트크기 결정 문제를 연구하였다. 최근, Jaruphongsa *et al.*(2003)은 다종의 운송 수단을 고려한 동적 로트크기 결정문제에 대한 해법으로 polynomial time 알고리즘을 개발하였다.

본 논문의 또 다른 특징인 고객이 허용하는 납품시간창에 관한 연구는 Lee *et al.*(2001)에 의해 시작되었다. Lee *et al.*(2001)은 추후조달이 허용되지 않는 경우와 허용되는 경우에 대해 각각 납품시간창에 관한 동적계획법알고리즘을 제안하였다. Jaruphongsa *et al.*(2004)은 제한된 물류센터 용량과 납품시간창을 고려한 동적 로트크기 결정 문제를 다루었다. Hwang and Jaruphongsa(2006)는 새로운 분해원리를 기반으로 한 납품시간창을 고려한 동적 로트크기 결정 문제에 대한 알고리즘을 제안하였다. Hwang(2007)은 Lee *et al.*(2001)의 확장된 모형을 가지고 추후 조달이 허용되지 않을 경우에 대한 향상된 알고리즘을 제안하였다. 최근, Hwang and Jaruphongsa(2008)은 주요 수요에 대해서만 납품시간창을 허용하는 문제에 대해 동적 로트크기 결정 문제를 다루었고 해법으로 동적계획법알고리즘을 개발하였다. Jaruphongsa and Lee(2008)는 납품시간창을 허용하고 컨테이너 단위의 운송비용을 고려한 상황에서의 동적 로트크기 결정 문제를 다루었다. 그들은 납품시간창 내의 디스패칭 형태에 따라 두 가지의 하위 문제로 구분하고 단일 컨테이너 형태 운영에서의 분할수요(Split demand) 충족의 경우에 대해서만 동적계획법알고리즘을 제안하였다. Lee(2010)는 본 논문에서 관심을 가지는 생산과 수송이 통합된 3PL 물류환경

에서 납품시간창을 고려한 동적 로트크기 결정 문제에 대한 알고리즘을 제안하였다. Kim and Lee(2010)는 납품시간창을 허용하고 단일 운송차량을 고려한 상황에서의 동적 로트크기 결정 문제의 효율적인 해를 구하기 위한 유전알고리즘을 제시하였다. 현재까지의 연구들에서 보면, 납품시간창의 허용과 다종의 운송차량을 동시에 고려한 동적 로트크기 결정 및 디스패칭 문제는 연구되지 않았다.

본 논문에서는 다종의 운송차량들을 고려한 인바운드 공급계획과 납품시간창을 고려한 아웃바운드 디스패칭을 동시에 고려하는 최적화 모형을 제시하고 제한된 시간에 효율적으로 해를 탐색할 수 있는 알고리즘들을 제안한다.

또한, 본 논문은 Kim and Lee(2010)의 연구를 확장하여 다종의 차량을 고려한 동적 공급계획과 아웃바운드 디스패칭에 대해 지역해 탐색방법을 포함하는 유전알고리즘을 제시한다. 다종의 운송차량의 고려로 인해 Kim and Lee(2010)에서 제시한 0-1-2인코딩에 의한 로트크기 표현을 이용할 수 없다. 따라서 0-1인코딩을 이용하여 총입고량을 결정하고, 지역해 탐색방법을 이용하여 차량형태에 따른 입고 로트크기를 효율적으로 결정하는 혼합유전알고리즘(HGA : Hybrid Genetic Algorithm)을 제시한다. 또한, 보다 좋은 성능을 가진 알고리즘을 제시하기 위해 유전알고리즘의 성능에 영향을 미치는 교차변이율과 돌연변이율을 자율적으로 조정하는 새로운 유전알고리즘을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 고려대상 문제에 대한 최적화 모형을 제시한다. 제 3장과 제 4장에서는 연구대상 모형에 대해 지역해 탐색방법을 사용한 혼합유전알고리즘과 효율적인 해를 탐색할 수 있는 교차변이율과 돌연변이율을 자율적으로 조정하는 자율유전알고리즘(AGA : Adaptive Genetic Algorithm)을 제시한다. 제 5장에서는 본 논문에서 제시한 두 가지 유전 알고리즘들의 성능을 검증하는 컴퓨터 실험결과를 설명하고 마지막 장에서는 결론 및 향후연구를 소개한다.

2. 최적화 모형

본 논문에서 다루어질 최적화 모형을 효과적으로 표현하기 위해 다음과 같이 파라미터 및 변수들을 정의한다.

- T = 총 계획기간 수,
- t = 계획기간의 인덱스($t = 1, 2, \dots, T$),
- M = 총수요 수,
- i = 수요의 인덱스($i = 1, 2, \dots, M$),
- N = 차량 형태의 수,
- j = 차량 형태 인덱스($j = 1, 2, \dots, N$),
- W_j = 차량 형태 j 의 운송능력,
- S_t = 기간 t 에서의 주문비용,
- p_t = 기간 t 에서의 단위당 구매비용,

h_t = 기간 t 에서 $t+1$ 로의 단위당 재고유지비용,
 f_{tj} = 기간 t 에서 차량 형태 j 를 사용한 차량당 운송비용,
 d_i = 수요 i 의 요구량,

본 논문에서 모든 제품은 동일한 중량과 부피를 가지는 단일제품이라 가정한다. 따라서 문제의 목적은 관련 비용을 최소화하는 아래의 두 가지 의사결정변수들을 결정하는 것이다.

x_{tj} = 기간 t 에서 차량 형태 j 를 사용한 3PL 물류센터로의 구매량(공급량),
 d_{ti} = 기간 t 에서 수요 i 의 요구량 d_i 를 만족시키기 위한 디스패칭 납품량.

위의 두 가지 의사결정변수들의 결정에 의한 종속변수들은 다음과 같다.

I_t = 기간 t 에서의 재고량,
 y_{tj} = 기간 t 에서 차량 형태 j 를 사용한 3PL 물류센터로의 운송 차량 대수,

위의 파라미터 및 변수들을 이용하여 아래의 최적화모형을 제시할 수 있다.

(P1) Min $S_t \delta \left(\sum_{j=1}^N x_{tj} \right) + p_t \sum_{j=1}^N x_{tj} + \sum_{j=1}^N f_{tj} \lceil x_{tj} / W_j \rceil + \sum_{t=1}^T h_t I_t$ (1)

s.t., $\sum_{j=1}^N x_{tj} + I_{t-1} - \sum_{i=1}^M d_{ti} = I_t, \quad \forall t,$ (2)

$\sum_{t=E_i}^{L_i} d_{ti} = d_i, \quad \forall i,$ (3)

$d_{ti} \geq 0, \quad \forall i; t = E_i, \dots, L_i,$ (4)

$d_{ti} = 0, \quad \forall i; t = 1, \dots, E_i - 1,$ (5)

$d_{ti} = 0, \quad \forall i; t = L_i + 1, \dots, T,$ (6)

$I_0 = I_T = 0,$ (7)

$x_{tj} \geq 0, I_t \geq 0, \quad \forall t, j.$ (8)

목적함수 식 (1)은 차례로 주문비용, 구매비용, 운송비용 및 재고유지비용으로 구성된다. 주문비용은 고정비용함수(Fixed cost)를 고려하며 운송비용은 차량 형태의 사용대수에 비례하는 다수의 고정비용함수를 고려한다. 이러한 운송차량의 적재량은 제품의 운송 시 적재용량을 완전히 채울지 덜 채울지에 따라 차이가 나게 된다. 비용함수식 (1)에서 $\lceil x_{tj} / W_j \rceil$ 는 비선형함수를 만들게 된다. 여기서, $\lceil a \rceil$ 는 a 를 초과하는 정수 중 가장 작은 정수이고, $\delta(\cdot)$ 는 0-1정수변수를 의미한다. 제약식 (2)는 각 계획기간의 재고균형 제약식을 의미하고, 제약

식 (3)~식 (6)은 수요 i 에 대한 납품시간창이 가장 이른 납품시간 E_i 와 가장 늦은 납품시간 L_i 로 구성되는 시간구간 $[E_i, L_i]$ 로 형성되며 이 구간 내에 제품은 고객에게 반드시 인도되어야 함을 의미한다. 제약식 (7)은 초기재고와 마지막 기간의 재고는 0이어야함을 의미한다.

상기 혼합정수모형(P1)의 목적식 (1)에서 $\lceil x_{tj} / W_j \rceil$ 는 비선형함수를 만들게 된다. 이를 선형화시키기 위해 비음인 정수 변수 y_{tj} 를 최적화 모델에 추가하고, 목적식 (1)은 선형화된 목적식 (9)과 같이 표현되고 x_{tj} 와 y_{tj} 의 관계 형성을 위한 제약식 (10)과 식 (11)을 추가하면 비선형 혼합정수모형(P1)은 혼합정수모형(P2)으로 아래와 같이 동일한 해집단(Feasible region)을 형성하며 선형화되게 된다.

(P2) Min $S_t \delta \left(\sum_{j=1}^N x_{tj} \right) + p_t \sum_{j=1}^N x_{tj} + \sum_{j=1}^N f_{tj} y_{tj} + \sum_{t=1}^T h_t I_t$ (9)

s.t. (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), and

$x_{tj} \leq W_j y_{tj}, \quad \forall t, j,$ (10)

$y_{tj} \in \text{Inegers}, \quad \forall t, j.$ (11)

따라서 제약식 (2)~식 (8) 및 식 (10)~식 (11)은 bounded and convex set을 형성하고 목적함수(10)은 오목함수(Concave)이므로 최적해는 정점(Extreme Point)에서 발생하게 된다. 상기 혼합정수모형(P2)의 네트워크 표현은 <Figure 1>과 같이 표현될 수 있다. <Figure 1>에서 점선으로 묶인 노드들의 집단은 수요 i 의 납품시간창의 시간구간을 의미한다. Jaruphongsa and Lee(2008)는 단일 운송수단을 가지는 경우와 납품시간창 내에서 단일 디스패칭만 허용되는 경우에 대하여 NP-hard하다고

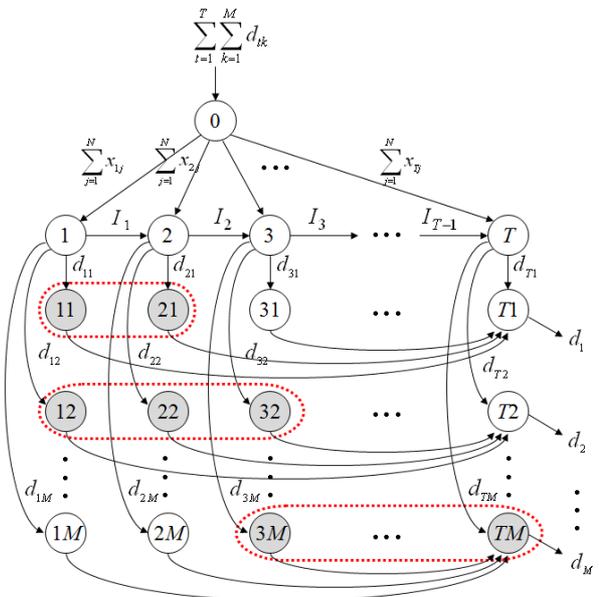


Figure 1. Network representation of the model P

증명하였다. 본 논문의 문제는 다종의 차량형태를 가지는 경우에 대해 납품시간창 내에서 복수의 디스패칭도 가능하므로 기존의 문제보다 훨씬 복잡하다. 따라서 큰 규모의 문제를 위해 휴리스틱을 이용한 효율적인 해의 탐색이 필수적이다.

3. 유전알고리즘(Genetic algorithm)

본 논문에서는 문제(P2)에 대한 우수한 해를 효율적으로 탐색하기 위한 방안으로 유전알고리즘을 제안한다.

3.1 해의 표현 및 초기해의 생성

본 문제의 의사결정변수들은 다종의 차량에 수송되는 공급량(x) 및 대수(y)와 디스패칭량(D)이다. 우선, 디스패칭량에 대한 염색체(Chromosome) 표현은 디스패칭량의 구조적 특성상 염색체 설계를 위해 Kim and Lee(2010)에서 제시한 2차원 행렬 표현법을 사용하였다. 일단 초기 디스패칭량(D)이 생성되면, 기간 t 에서 모든 수요의 합인 $\sum_{i=1}^M d_{ti}$ 가 결정되고, 이를 이용하여 각 기간의 총공급량(X)이 결정되게 된다. 대부분의 로트크기 결정 문제의 유전알고리즘 표현은 각 시점의 로트의 개수가 염색체로 표현된다. 본 논문에서는 각 기간의 총공급량(X)의 표현을 위하여 '0-1'인코딩 체계를 가지고 염색체는 계획기간의 수 T 와 같은 개수의 0 혹은 1 중의 한 개의 숫자로 표현되는 1차원 (e_1, e_2, \dots, e_T) 염색체 표현을 제안하였다. 여기서, e_t 는 0 혹은 1의 값을 가질 수 있고, 이 값은 기간 t 의 총공급량 X_t 로 직접적으로 변환될 수 있는 키(Key)값이다. $e_t = 1$ 은 현 수요(직전기간의 재고+현 재고)와 그 이후에 0으로 표현되는 연속되는 기간의 수요들을 포함하는 현재 기간의 공급량으로 표현된다. 나머지 기간에서는 공급량이 0으로 표현되게 된다. 각 기간의 총공급량(X)의 생성절차는 다음과 같다.

<총공급량(X)의 초기해 생성절차>

Step 1 : p 를 유전자값들 중 초기시점부터 0이 아닌 최초의 시점이라고 두자. 만약, t 시점 이후 모든 기간들이 0이면 $p \leftarrow T+1$.

Step 2 : $X = \sum_{r=ti=1}^{p-1} d_{ri} - I_{t-1}$.

Step 3 : 만약 $e_t = 1$ 이면, $X_t = X$. 그렇지 않으면 $X_t = 0$.

각 기간의 총공급량 X_t 가 위의 절차에 의해 결정되면, 의사결정변수인 기간 t 에서 차량 형태 j 를 사용한 3PL 물류센터로의 공급량 x_{tj} 가 결정되게 되고 x_{tj} 에 의해 기간 t 에서 차량 형태 j 를 사용한 3PL 물류센터로의 차량 대수 y_{tj} 도 동시에 결정된다. (x_{ti}, y_{ti})의 결정은 한계 수송비용 휴리스틱(Marginal Shipment Cost Heuristic)을 이용한 지역해 탐색방법을 이용

하여 구한다.

<총공급량(X)을 고려한 한계 수송비용 휴리스틱의 결정절차>

Step 1 : 각 시점 t 에 대해 단위당 차량형태에 따른 수송비용 $M_{tj} = f_{tj}/W_j$ 을 구한 후, 가장 작은 M_{tj} 를 가지는 차량형태 p 를 가지는 차량형태를 구한다.

Step 2 : 각 시점 t 에 대해 선택된 차량 p 의 대수 $y_{tp} = \lfloor X_t/W_p \rfloor$ 와 차량 p 를 이용한 공급량 $x_{tp} = y_p \times W_p$ 을 정한 후, 총공급량을 $X_t \leftarrow X_t - x_{tp}$ 로 업데이트한다.

Step 3 : 각 시점 t 에 대해

$F_{tj} = \begin{cases} f_{tj} & X_t \leq W_j \\ f_{tj} \times \lceil X_t/W_j \rceil & \text{otherwise} \end{cases}$ 를 구한 후, 가장 작은 F_{tj} 값을 가지는 차량형태 k 를 선택하고 선택된 차량 k 의 대수 $y_{tk} = \lceil X_t/W_k \rceil$ 와 차량 k 를 이용한 공급량 $x_{tk} = y_{tk} \times W_k$ 를 정한다.

일반적인 유전알고리즘내에 지역해 탐색방법을 사용하여 의사결정변수를 구하였으므로, 본 알고리즘을 혼합유전알고리즘이라 한다.

3.2 목적함수 및 적합도

일단 총공급량(X)과 디스패칭량(D)이 구해지면 재고량(I)이 구해지고, 결정된 총공급량(X)을 이용하여 한계 수송비용 휴리스틱으로 (x_{ti}, y_{ti})가 구해지면, 최적화 모형에서 제시된 목적함수를 이용하여 목적함수 값을 구할 수가 있다. 본 문제는 최소화 문제이기 때문에 최대화 문제로 전환하여 적합도 함수를 평가하였다.

3.3 유전자 연산

3.3.1 디스패칭(D)의 교차변이 및 돌연변이

본 논문에서는 실행 불가능한 디스패칭량의 자식 염색체는 생성시키지 않게 하는 Kim and Lee(2010)가 제시한 2차원 교차변이 방법과 공통 납품시간창을 이용한 돌연변이 방법을 적용하여 알고리즘을 수행한다.

3.3.2 총공급량(X)의 교차변이 및 돌연변이

총공급량(X)의 교차변이 방법은 0-1인코딩에 의해 1차원 염색체로 표현되었기 때문에 잘 알려진 한점 교차변이(One-cut Point Crossover)를 시행하였다. 한편, 총공급량(X)의 돌연변이 방법은 0-1인코딩에 의한 1차원 염색체로 표현되었기 때문에 잘 알려진 교차돌연변이(Swap Mutation)를 시행한다.

3.3.3 다음 세대로의 선택(Selection)

본 논문에서 사용되는 선택방식은 엘리트 전략을 이용하여 두 개의 최고 적합도를 가지는 염색체들을 선택, 교차변이와

돌연변이를 거치지 않고 다음 세대로 복사 전달하고 나머지 염색체들은 다음 세대를 구성하기 위해 염색체 생성을 위한 부모해는 현 세대 해집단의 적합도 평균보다 좋은(높은) 적합도를 갖는 해들에서 임의로 선택한다. 자식해는 기본적으로 선정된 부모해들을 임의로 짝을 지어 교차변이 또는 돌연변이 연산으로 생성하나, 가장 우수한 해가 일정비율 이상 부모가 되도록 조정하였다.

4. 자율유전알고리즘(Adaptive Genetic Algorithm : AGA)

본 논문에서는 해의 탐색 도중에 해집단의 다양성의 정도(Degree of Diversity)에 따라 자율적(Adaptive)으로 교차변이율 및 돌연변이율을 조정하는 새로운 유전알고리즘을 제안한다. 해의 탐색과정에서 교차변이율과 돌연변이율을 자율적으로 변화시키는 목적은 해집단의 다양성을 유지시키고 좋은 수렴도를 획득하기 위해서이다. 각 세대의 교차변이율과 돌연변이율을 결정하기 위하여 세대 k 에서의 식 (12)에서 표현된 평균 적합도 편차(AFD^g)를 이용한다.

$$AFD^g = \sum_{i=1}^n \frac{|PF_i - C_{BEST}|}{C_{BEST}} / n. \tag{12}$$

여기서, n 은 g 세대의 잠재적인 부모 집단 풀(Pool)내에 존재하는 염색체들의 수, PF_i 는 염색체 i 의 적합도, C_{BEST} 는 현재 세대까지 가장 좋은 해를 나타낸다. AFD^g 값이 크면 해집단이 너무 다양해서 좋은 수렴도를 획득하지 못한다는 것을 의미한다. 이러한 경우, 교차변이율을 향상시켜 주는 것이 바람직하다. 반면에 AFD^g 값이 작으면 잠재적으로 조기수렴도가 커진다. 이러한 경우, 돌연변이율을 높힘으로써 해집단의 다양성을 높인다. $g+1$ 세대의 교차변이율 r_C^{g+1} 와 돌연변이율 r_M^{g+1} 은 식 (13)과 식 (14)에 의해 조정된다.

$$r_C^{g+1} = \frac{AFD^g - dL}{dH - dL}, \tag{13}$$

$$r_M^{g+1} = 1 - r_C^{g+1}. \tag{14}$$

여기서, dH 는 초기세대부터 g 세대까지 가장 큰 평균적합도편차이고 dL 은 g 세대까지 가장 작은 평균적합도편차이다. 단, 초기세대의 r_C^1 과 r_M^1 은 제시된 HGA를 이용하여 선행실험들로부터 선택된 0.6와 0.4로 고정한다. <Figure 2>는 제안하는 자율유전알고리즘의 전체 흐름도이다.

5. 컴퓨터 실험

5.1 실험 환경

본 논문에서 제시한 HGA 및 AGA의 성능을 검증하기 위하여, 여러 가지 실험 데이터를 생성하여 최적해와 비교·평가 하였으며 실험조건들은 다음과 같다.

- (1) 규모가 작은 경우, 최적해와의 비교를 위해 계획기간(T)의 크기를 10, 12로 정하고, 규모가 큰 경우, 유전알고리즘 상대적 비교를 위해 계획기간의 크기를 24, 30, 36로 정한다.
- (2) 수요의 크기(M)는 계획기간(T)의 25%, 50%, 75%로 정한다
- (3) 각 수요의 납품시간창의 크기(TW)는 계획기간의 30%, 40%, 50%로 정한다.
- (4) 차량형태(N)의 수는 3, 4, 5로 정한다.
- (5) 운송차량 적재크기(W)를 100, 200, 300으로 두며, 특정기간의 차량형태에 따른 해당 운송비용은 다음과 같이 표현된다. $f_{ij} = \lambda_j(1 - 0.1 \times j)$, $j = 1, 2, \dots, N$. 여기서, $\lambda_j = W_j \times j$ 이다.
- (6) 수요 i 는 정규분포 $N(\mu_i, \sigma_i)$ 를 따르며, 평균 μ_i 는 균등분포 $U(300, 900)$ 에 의해 발생되고, 표준편차 σ_i 는 μ_i 와 $\mu_i/5$ 중에 임의의 한 개의 값으로 랜덤하게 발생시킨다.
- (7) 발주비용은 $S_i = TS\bar{\mu}/2$ 를 따른다. 여기서, $TS = 1, 3, 6$ 중의 임의의 한 개의 값으로 고정한다.
- (8) 문제의 일관성을 유지하기 위해 계획기간에 관계없이 재고비용(h_i)을 1로, 그리고 해당 구매비용(p_i)을 7로 고정한다.
- (9) 선행실험에 의해 염색체 그룹(D, X)에 대한 HGA의 고정

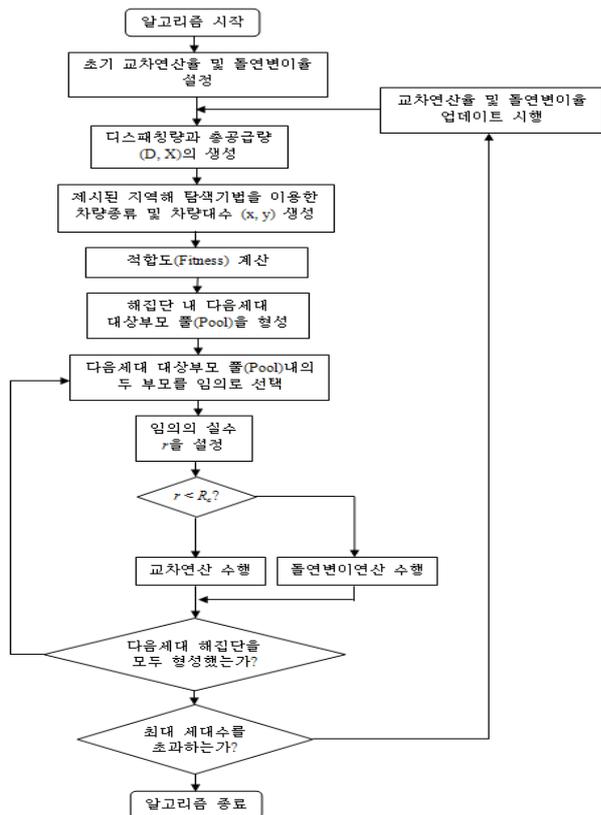


Figure 2. Flow chart of AGA

교차변이(P_c)와 돌연변이 확률(P_m) 및 AGA 초기 교차변이와 돌연변이 확률은 동일하게 0.6과 0.4로 둔다.

위의 각 입력모수들의 총 405개(= $5 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3$)의 실험 조합들에 대해 규모가 작은 그룹의 실험은 동일 모수 조건 각각에 대해 4개의 데이터(Instance)를 생성하여 CPLEX에 의해 구해진 최적해와 HGA 및 AGA의 절대적 성능을 비교하였다. 또한, 규모가 큰 그룹의 실험은 10번의 반복실험을 통하여 HGA와 AGA의 상대적 성능을 비교하였다. HGA 및 AGA 휴리스틱들은 C++를 이용하여 프로그래밍 되었고 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 3.06GHz와 2.00GB RAM하의 PC에서 실행되었다.

5.2 실험결과

컴퓨터 처리 성능의 제약 때문에 계획기간 크기 14이상에서는 합리적인 시간(3600초) 내에 CPLEX로 최적해를 도출하지 못하였다. 반면, 유전알고리즘을 이용한 휴리스틱 해는 모든 문제에 대해 1분 이내에 해를 도출하였다. <Table 1>에 규모가 작은 문제인 계획기간 크기 10, 12에 대한 실험결과를 정리하였다. 제시된 알고리즘들의 성능을 평가하기 위한 척도로 해의 상대비율편차(Relative Percentage Deviation : RPD)를 이용하였다. RPD 는 최적해에 대한 휴리스틱 해의 편차의 비를 의미하며 식 (15)로 표현된다. RPD 가 $\alpha\%$ 란 것은 휴리스틱 해가 최적해에 비해 $\alpha\%$ 초과한다는 것이므로, RPD 의 값이 작을수

Table 1. RPD test results for small sized problems

M	N	W	TW : 30%				TW : 40%				TW : 50%			
			T = 10		T = 12		T = 10		T = 12		T = 10		T = 12	
			HGA	AGA	HGA	AGA	HGA	AGA	HGA	AGA	HGA	AGA	HGA	AGA
25%	3	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		200	0.00	0.00	0.29	0.21	0.00	0.00	0.11	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
		300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	100	0.00	0.00	0.14	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	100	0.00	0.00	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.39	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
		300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50%	3	100	0.10	0.06	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.85	0.72	0.00	0.00
		200	0.32	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		300	0.30	0.21	0.25	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	100	0.10	0.10	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.08
		200	0.00	0.00	0.90	0.77	0.42	0.35	0.00	0.00	0.84	0.75	0.00	0.00
		300	0.15	0.15	0.10	0.08	0.00	0.00	0.16	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	100	0.10	0.03	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		200	0.08	0.05	0.10	0.07	0.00	0.00	0.03	0.00	0.45	0.38	0.00	0.00
		300	0.00	0.00	0.17	0.12	0.00	0.00	0.10	0.05	0.56	0.50	2.52	2.35
75%	3	100	0.18	0.10	0.33	0.25	0.39	0.31	0.00	0.00	0.21	0.16	0.00	0.00
		200	0.10	0.11	0.63	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.48	0.00	0.00
		300	0.40	0.21	0.15	0.09	0.00	0.00	0.12	0.10	0.00	0.00	0.17	0.11
	4	100	0.25	0.18	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.35	0.50	0.44
		200	0.07	0.02	0.30	0.20	0.00	0.00	0.18	0.12	1.27	1.20	0.00	0.00
		300	0.29	0.15	0.12	0.08	0.14	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.17
	5	100	0.35	0.22	0.15	0.11	0.46	0.41	0.17	0.11	0.42	0.36	0.00	0.00
		200	0.09	0.05	0.00	0.00	0.07	0.07	0.05	0.01	0.00	0.00	0.37	0.24
		300	0.69	0.39	0.05	0.02	0.87	0.79	0.00	0.00	0.84	0.77	0.42	0.36
Avg.			0.13	0.08	0.14	0.11	0.12	0.10	0.04	0.02	0.24	0.21	0.16	0.14

록 알고리즘의 효과(Effectiveness)가 좋다는 것을 의미한다.

$$RPD = \frac{\text{휴리스틱해} - \text{최적해}}{\text{최적해}} \times 100 \quad (15)$$

<Table 1>의 실험 결과를 보면 HGA와 AGA의 RPD 평균이 각각 최대 0.14%와 0.11%로 매우 작아 규모가 작은 문제들에 대해 두 알고리즘의 성능이 모두 우수함을 알 수 있다.

보다 큰 규모의 문제에 대해 HGA와 AGA의 성능을 평가하기 위하여 계획기간 T를 24, 30, 36로 증가시켜 실험데이터를 생성하였다. 생성된 큰 규모의 실험 데이터들은 합리적인 시간 이내에 정수계획법에 의한 최적해를 찾는 것이 불가능하므로, 최적해를 대신하여 알고리즘들의 성능을 비교하기 위한

기준해(Baseline Solution)로 본 논문에서는 HGA와 AGA의 각각의 10개 반복실험의 결과들 중 가장 좋은(Best)해를 이용하였다. 즉, HGA와 AGA의 성능을 평가하기 위한 척도로 RPD 대신, Best값 대비 해의 상대비율편차(Relative Percentage Deviation with the best solution : RPD_{Best})를 이용하였다. RPD_{Best} 는 Best값에 대한 휴리스틱에 해의 편차의 비를 의미하며 식 (16)으로 표현된다.

$$RPD_{Best} = \frac{\text{알고리즘해} - \text{Best}}{\text{Best}} \times 100 \quad (16)$$

<Table 2>~<Table 4>의 실험결과를 보면 HGA와 AGA의

Table 2. Test results of 30% time window for large sized problems

M	N	W	T = 24				T = 30				T = 36			
			HGA		AGA		HGA		AGA		HGA		AGA	
			RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time
25%	3	100	0.76	1.022	0.27	1.095	13.47	2.352	4.78	2.550	14.04	4.328	6.65	4.756
		200	2.75	1.080	0.27	1.016	5.93	2.359	0.89	2.403	12.45	4.320	5.74	4.980
		300	0.41	0.983	0.10	0.970	15.43	2.333	3.63	2.613	4.78	4.409	1.25	5.094
	4	100	2.71	1.059	0.05	1.019	11.85	2.411	2.65	2.533	9.75	4.388	4.26	4.900
		200	3.48	1.103	0.36	1.088	9.10	2.495	1.60	2.683	10.68	4.328	1.49	4.580
		300	3.90	1.077	0.48	1.033	9.48	2.417	1.98	2.580	18.08	4.197	4.98	4.761
	5	100	1.67	1.148	0.19	1.155	12.64	2.489	4.47	2.641	7.09	4.234	3.07	4.866
		200	2.50	1.183	0.61	1.184	11.61	2.516	3.19	2.742	13.24	4.219	3.82	4.602
		300	10.30	1.152	0.34	1.133	16.61	2.428	3.57	2.655	20.76	4.252	4.28	4.781
50%	3	100	3.46	2.464	1.02	2.994	3.96	5.158	1.61	6.094	6.53	9.600	3.08	11.219
		200	5.40	2.453	1.59	2.769	11.49	5.188	5.63	6.175	2.37	9.678	1.25	11.209
		300	3.79	2.483	0.55	2.755	4.33	5.263	1.87	5.913	4.27	9.647	2.70	11.053
	4	100	12.23	2.484	5.51	2.728	5.65	5.402	2.10	6.130	2.19	9.778	1.42	12.025
		200	3.66	2.538	0.96	2.948	9.14	5.269	3.54	6.425	4.75	9.733	3.42	11.488
		300	5.27	2.517	0.40	2.822	4.03	5.250	0.90	6.470	3.10	9.928	2.42	10.817
	5	100	4.67	2.497	2.14	2.922	5.90	5.506	2.74	6.499	2.16	9.980	1.29	11.108
		200	5.64	2.536	1.34	2.934	4.71	5.527	1.04	6.764	3.31	9.961	1.10	12.308
		300	7.23	2.533	1.62	2.853	9.98	5.622	3.66	6.483	3.13	9.917	1.43	11.503
75%	3	100	6.59	4.372	1.00	5.383	2.16	10.224	1.83	11.789	2.32	18.352	1.12	23.831
		200	2.75	4.327	1.33	5.272	1.91	10.711	1.20	12.536	2.93	18.299	1.23	24.473
		300	5.15	4.355	2.89	4.992	1.91	10.395	1.07	12.580	2.31	18.242	1.71	21.295
	4	100	4.12	4.344	1.24	5.267	1.53	10.714	0.70	12.677	1.60	18.567	0.68	22.611
		200	2.40	4.331	1.54	5.117	2.61	10.409	0.74	12.684	1.87	18.452	1.10	21.141
		300	2.99	4.333	0.99	5.253	1.85	10.341	1.63	11.823	1.25	18.845	1.11	21.333
	5	100	4.24	4.456	1.74	5.253	2.53	10.406	1.09	12.553	2.25	18.416	1.34	22.720
		200	3.62	4.453	1.68	5.211	2.86	10.350	1.97	12.070	1.60	18.306	0.80	22.644
		300	4.36	4.480	1.58	5.302	4.19	10.409	1.73	13.075	1.18	18.558	0.79	23.309
Avg.			4.30	2.658	1.18	3.054	6.92	6.072	2.29	7.116	5.93	10.849	2.35	12.941

RPD_Best 평균값 측면에서 각각 최대 6.89%, 2.77%로 나타나 AGA가 HGA에 비해 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 또한, HGA 대비 AGA의 통계적 우수성을 검증하기 위해, <Table 2> ~<Table 4>의 결과를 이용하여 95% 신뢰구간의 평균과 Tukey HSD intervals로 두 알고리즘의 *RPD_Best*를 <Figure 3>에서와 같이 도식하였다. <Figure 3>에서 보는 바와 같이 Tukey HSD intervals이 겹치는 부분이 없으므로 두 알고리즘의 *RPD_Best*간에는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한, AGA는 HGA에 비해 Tukey HSD intervals이 작다. 이는 해의 분산정도가 상대적으로 작음을 의미하기 때문에 확률적으로 안정(Robust)한 해를 제공함을 알 수 있다. <Figure 4>는

계획기간(*T*)의 변화, 수요의 개수(*M*)의 변화, 차량형태(*N*)의 변화, 그리고 납품시간창(*TW*)의 변화에 따른 두 알고리즘의 *RPD_Best*에 대한 95% 신뢰구간의 평균과 Tukey HSD intervals의 변화를 나타낸다.

<Figure 4>내의 각 그림들에서 보는 바와 같이 계획기간(*T*)과 납품시간창(*TW*)의 변화에 관계없이 *RPD_Best*간에는 통계적으로 유의한 차이를 보임을 알 수 있다. 또한, 차량형태(*N*)이 증가함에 따라 *RPD_Best*간에는 통계적으로 더 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 그러나 수요의 개수(*M*)가 커질수록 두 알고리즘의 *RPD_Best*간에는 통계적으로 차이가 적어짐을 알 수 있다.

Table 3. Test results of 40% time window for large sized problems

<i>M</i>	<i>N</i>	<i>W</i>	<i>T</i> = 24				<i>T</i> = 30				<i>T</i> = 36			
			HGA		AGA		HGA		AGA		HGA		AGA	
			<i>RPD_Best</i>	Time	<i>RPD_Best</i>	Time	<i>RPD_Best</i>	Time	<i>RPD_Best</i>	Time	<i>RPD_Best</i>	Time	<i>RPD_Best</i>	Time
25%	3	100	12.15	1.078	4.31	1.086	18.14	2.372	6.70	2.767	4.61	4.138	1.47	4.783
		200	5.16	1.114	1.30	1.145	10.41	2.338	4.11	2.645	5.26	4.133	1.39	4.934
		300	2.79	1.084	0.71	1.013	7.78	2.363	3.64	2.649	10.13	4.083	5.96	4.578
	4	100	7.94	1.131	2.63	1.194	9.94	2.431	1.10	2.645	13.02	4.109	8.24	4.689
		200	7.28	1.116	1.42	1.159	13.84	2.400	3.93	2.427	18.57	4.158	6.98	4.753
		300	6.52	1.141	3.43	1.256	11.38	2.430	3.25	2.666	5.98	4.164	2.31	4.836
	5	100	10.96	1.166	3.48	1.211	9.89	2.492	4.78	2.761	12.07	4.186	3.51	4.897
		200	4.20	1.205	0.84	1.267	15.68	2.495	4.84	2.686	10.43	4.239	4.21	4.752
		300	5.69	1.152	0.67	1.136	13.70	2.480	5.31	2.738	11.53	4.289	5.81	4.823
50%	3	100	6.48	2.430	2.59	2.772	5.90	5.105	2.69	6.174	3.48	9.792	1.81	11.303
		200	6.06	2.455	2.45	2.820	4.64	5.056	1.32	6.133	2.62	9.792	1.27	11.839
		300	5.25	2.434	2.11	2.825	3.92	5.116	1.21	6.123	4.10	9.683	1.96	11.095
	4	100	6.14	2.450	3.45	2.800	10.07	5.170	3.12	6.134	1.91	9.906	0.86	12.189
		200	7.03	2.494	2.24	2.852	3.54	5.205	0.70	6.519	2.13	9.889	0.80	12.108
		300	5.03	2.511	1.91	2.914	3.60	5.172	1.45	6.399	11.88	9.803	5.54	11.731
	5	100	7.12	2.522	0.93	2.852	3.29	5.416	0.95	6.662	2.39	10.053	1.34	11.797
		200	11.82	2.523	5.02	2.881	4.51	5.414	2.23	6.052	8.13	9.839	2.85	11.569
		300	5.93	2.555	2.75	2.955	4.80	5.291	2.84	6.391	7.71	9.986	3.51	11.859
75%	3	100	4.79	4.299	2.14	5.094	2.24	9.769	1.09	11.903	0.89	18.692	0.57	23.567
		200	3.85	4.345	1.74	5.083	2.53	9.792	1.28	11.541	1.93	18.373	0.97	21.634
		300	1.81	4.298	0.92	5.433	1.71	9.747	1.63	10.997	3.18	18.580	1.96	22.908
	4	100	7.17	4.420	1.95	5.291	3.91	10.013	2.11	12.045	2.44	18.570	1.47	22.966
		200	1.99	4.388	0.71	5.470	3.61	9.666	1.69	11.922	2.80	18.241	1.05	22.570
		300	2.19	4.530	0.94	5.305	1.05	9.806	0.78	12.188	2.85	18.394	1.58	22.259
	5	100	3.01	4.431	1.77	5.184	4.10	9.859	1.68	11.789	2.58	18.838	1.50	22.773
		200	3.39	4.431	1.65	5.534	1.94	9.942	0.77	12.300	1.22	18.783	0.50	23.092
		300	2.04	4.473	0.88	5.155	2.21	9.987	1.52	11.989	2.32	18.467	1.41	22.425
Avg.			5.70	2.673	2.04	3.100	6.61	5.827	2.47	6.935	5.78	10.859	2.62	13.064

Table 4. Test results of 50% time window for large sized problems

M	N	W	T = 24				T = 30				T = 36			
			GA		AGA		GA		AGA		GA		AGA	
			RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time	RPD_Best	Time
25%	3	100	4.78	1.109	1.75	1.227	9.03	2.391	3.34	2.672	9.52	4.059	4.01	4.789
		200	5.97	1.106	2.77	1.147	15.23	2.316	7.08	2.698	7.83	4.027	3.37	4.763
		300	7.25	1.130	2.42	1.208	4.22	2.344	1.86	2.722	16.69	4.058	5.48	4.684
	4	100	4.43	1.152	1.54	1.214	7.44	2.370	2.81	2.689	3.88	4.188	1.18	4.955
		200	12.39	1.119	5.67	1.128	7.61	2.397	2.05	2.739	6.07	4.131	1.35	4.970
		300	13.38	1.192	3.05	1.186	15.60	2.374	4.86	2.741	14.16	4.085	4.24	4.741
	5	100	15.64	1.167	8.25	1.203	18.74	2.452	6.18	2.761	5.67	4.270	2.08	4.956
		200	19.45	1.183	5.83	1.183	8.26	2.475	1.95	2.736	8.22	4.209	2.97	5.014
		300	7.70	1.172	2.95	1.200	7.98	2.459	2.06	2.848	10.15	4.184	2.06	4.780
50%	3	100	10.31	2.433	6.42	2.823	3.97	5.092	1.67	6.327	3.12	9.611	1.43	11.556
		200	3.13	2.502	1.83	2.833	4.37	5.142	2.23	5.852	1.93	9.748	1.41	10.983
		300	8.60	2.434	2.62	2.891	3.95	5.084	1.55	5.844	0.95	9.734	0.63	12.052
	4	100	2.70	2.538	1.02	2.966	3.56	5.139	2.02	6.350	1.33	9.769	1.03	11.859
		200	5.28	2.517	1.89	2.934	7.37	5.119	5.39	5.841	5.13	9.867	2.92	11.413
		300	5.00	2.547	2.50	2.974	8.09	5.125	3.38	5.963	9.15	9.711	3.18	12.105
	5	100	7.00	2.584	2.23	3.019	1.33	5.231	0.74	6.383	3.37	9.889	0.75	12.853
		200	13.44	2.527	3.86	2.894	3.73	5.230	1.54	6.266	3.60	10.042	1.59	12.367
		300	6.66	2.545	1.85	2.941	2.92	5.189	0.87	6.253	1.92	9.877	1.09	12.048
75%	3	100	4.72	4.359	1.38	5.242	1.55	9.519	1.57	11.120	1.57	18.119	0.82	21.536
		200	3.29	4.313	1.52	5.292	2.80	9.597	0.95	11.819	3.02	18.219	2.40	21.436
		300	1.92	4.358	0.54	5.156	3.04	9.788	1.69	11.478	1.71	18.470	1.15	22.378
	4	100	2.41	4.447	1.15	5.064	0.57	9.817	0.53	11.945	1.68	18.344	1.20	21.492
		200	5.05	4.342	2.94	5.128	0.92	9.775	0.46	11.867	0.73	18.294	0.81	22.273
		300	4.20	4.369	3.39	4.830	1.24	9.602	0.71	11.653	0.86	18.455	0.55	22.989
	5	100	4.64	4.433	2.47	5.197	1.83	9.589	1.53	11.391	2.73	18.722	1.45	23.019
		200	4.21	4.534	0.85	5.353	2.60	9.850	1.99	11.500	0.66	18.470	0.68	23.202
		300	2.38	4.405	2.10	5.039	0.98	9.731	0.53	12.197	1.97	18.314	1.69	21.875
Avg.			6.89	2.686	2.77	3.084	5.52	5.748	2.28	6.839	4.73	10.773	1.91	13.003

6. 결론

본 논문은 3PL 물류센터의 운영에 있어서 동적수요를 만족시키기 위한 인바운드 로트크기 결정 및 아웃바운드 디스패칭을 동시에 결정할 수 있는 연구를 수행하였다. 3PL 물류센터로부터 고객에게 납품되는 제품은 다종의 차량을 이용하여 물류센터로 주문 입고되고 고객과의 공급계약에 의해 특정한 별과비용없이 납품시간차를 고려하여 납품된다. 문제의 해결을 위해, 혼합정수계획 모형을 제시하였고 규모가 큰 문제의 해를 효율적으로 탐색하기 위해 해집단의 다양성의 정도에 따라 자

율적으로 교차변이율 및 돌연변이율을 해의 탐색 도중에 조정하는 자율유전알고리즘을 제안하였다. 휴리스틱 알고리즘의 성능을 평가하기 위해, 여러 실험 요소들의 조합에 의한 405개의 실험문제들을 대상으로 성능을 검증하였다. 평균적인 측면에서 AGA는 CPLEX를 이용한 최적해 대비 평균적으로 최대 0.11% 이내의 우수해 해를 제공하였다. 현실적인 규모가 큰 문제들에 대한 AGA와 HGA의 상대적 비교를 위한 RPD_Best의 평균값 측면으로 볼 때, AGA가 최대 2.77%로 HGA 최대 6.89%에 비해 더 우수함을 알 수 있다. 또한, 통계적인 우수성 검증을 위해 95% 신뢰구간의 평균과 Tukey HSD intervals을 구

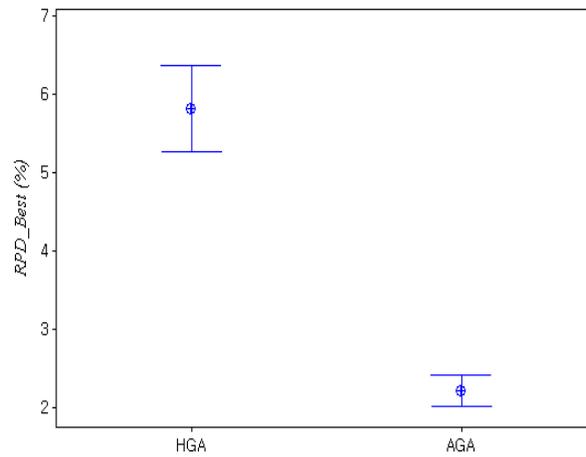


Figure 3. Mean plots and Tukey HSD intervals at the 95% confidence level of HGA and AGA

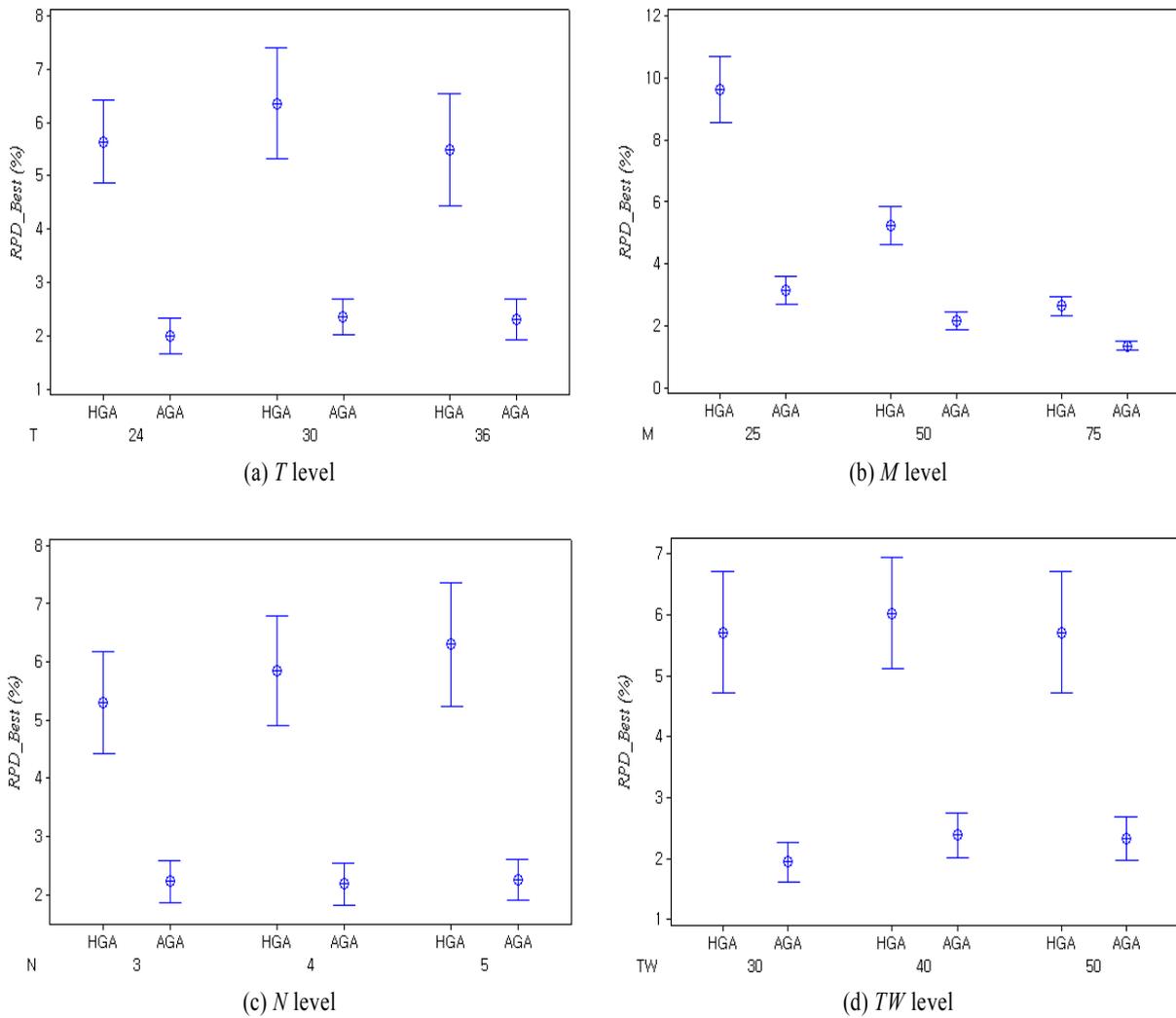


Figure 4. Mean plots and Tukey HSD intervals at the 95% confidence level of HGA and AGA for T , M , TW , and N

하였고 RPD_{Best} 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인하였으며, AGA의 우수성을 검증할 수 있었다.

향후 연구과제로서는 다양한 납품비용, 다중제품과 다양한

납품채널 등 보다 현실적인 상황에서의 요인들을 고려한 3PL 물류센터에서의 동적 주문 및 운송, 그리고 아웃바운드 디스패칭 문제를 다룰 것이다.

참고문헌

- Hwang, H. C. (2007), An Efficient Procedure for Dynamic Lot-sizing Model with Demand Time Windows, *Journal of Global Optimization*, **37**, 11-26.
- Hwang, H. C. and Jaruphongsa, W. (2006), Dynamic Lot-sizing Model with Demand Time Windows and Speculative Cost Structure, *Operations Research Letters*, **34**, 251-256.
- Hwang, H. C. and Jaruphongsa, W. (2008), Dynamic Lot-sizing Model for Major and Minor Demands, *European Journal of Operational Research*, **184**, 711-724.
- Jaruphongsa, W. and Lee, C. Y. (2008), Dynamic lot-sizing problem with demand time windows and container-based transportation, *Optimization Letter*, **2**(1), 39-51.
- Jaruphongsa, W., Cetinkaya, S., and Lee, C. H. (2004), Warehouse Space Capacity and Delivery Time Window Considerations in Dynamic Lot-sizing for a Simple Supply Chain, *International Journal of Production Economics*, **92**, 169-180.
- Jaruphongsa, W., Cetinkaya, S., and Lee, C. Y. (2005), A Dynamic Lot-sizing Model with Multi-Mode Replenishments : Polynomial Algorithms for Special Cases with Dual and Multiple Modes, *IIE Transactions*, **37**, 453-467.
- Kim, B. S. and Lee, W. S. (2010), A Genetic Algorithm for a Dynamic Lot-Sizing Problem with Delivery Time Windows, *Journal of the Korean Production and Operations Management Society*, **21**(4), 383-398.
- Lee, C. Y. (1989), A Solution to The Multiple Set-Up Problem with Dynamic Demand, *IIE Transactions*, **21**(3), 266-270.
- Lee, C. Y., Cetinkaya, S., and Jaruphongsa, W. (2003a), A Dynamic Model for Inventory Lot Sizing and Outbound Shipment Scheduling at a Third-Party Warehouse, *Operations Research*, **51**, 735-747.
- Lee, C. Y., Cetinkaya, S., and Wagelmans, A. P. M. (2001), A Dynamic Lot-sizing Model with Demand Time Windows, *Management Science*, **47**, 1384-1395.
- Lee, W. S. (1998), A Dynamic Production and Transportation Model with Multiple Freight Container Types, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **24**(1), 157-165.
- Lee, W. S. (2010), A Dynamic Ordering, Shipping, and Outbound Dispatching Problem with Delivery Time Windows, *Journal of the Korean Management Engineering Society*, **15**(3), 15-23.
- Lee, W. S., Kim, C. H., and Sox, C. R. (2003b), A Dynamic Production and Transportation Model with Heterogeneous Vehicle Types, *International Journal of Industrial Engineering*, **10**, 420-426.
- Topal, A., Cetinkaya, S. and Lee, C. Y. (2003), The Buyer-Vendor Coordination Problems: Modeling Inbound and Outbound Cargo Costs, *IIE Transactions on Logistics and Scheduling*, **35**(10), 987-1002.
- Wagner, H. M. and Whitin, T. M. (1958), Dynamic Version of the Economic Lot Size Model, *Management Science*, **5**(1), 89-96.