

배송 네트워크에서 드론의 유용성 검증: 차량과 드론을 혼용한 배송 네트워크의 경로계획*

정예림¹ · 박태준¹ · 민윤홍^{2†}

¹연세대학교 경영대학 경영학과, ²삼성전자 종합기술원

Usefulness of Drones in the Urban Delivery System: Solving the Vehicle and Drone Routing Problem with Time Window

Yerim Chung¹ · Taejoon Park¹ · Yunhong Min²

¹School of Business, Yonsei University

²Samsung Advanced Institute of Technology, Samsung Electronics Co. Ltd.

■ Abstract ■

This paper investigates the usefulness of drones in an urban delivery system. We define the vehicle and drone routing problem with time window (VDRPTW) and present a model that can describe a dual mode delivery system consisting of drones and vehicles in the metropolitan area. Drones are relatively free from traffic congestion but have limited flight range and capacity. Vehicles are not free from traffic congestion, and the complexity of urban road network reduces the efficiency of vehicles. Using drones and vehicles together can reduce inefficiency of the urban delivery system because of their complementary cooperation. In this paper, we assume that drones operate in a point-to-point manner between the depot and customers, and that customers in the need of fast delivery are willing to pay additional charges. For the experiment datasets, we use instances of Solomon (1987), which are well known in the Vehicle Routing Problem society. Moreover, to mirror the urban logistics demand trend, customers who want fast delivery are added to the Solomon's instances. We propose a hybrid evolutionary algorithm for solving VDRPTW.

The experiment results provide different useful insights according to the geographical distributions of customers. In the instances where customers are randomly located and in instances where some customers are randomly located while others form some clusters, the dual mode delivery system displays lower total cost and higher customer satisfaction. In instances with clustered customers, the dual mode delivery system exhibits narrow competition for the total cost with the delivery system that uses only vehicles. In this case, using drones and vehicles together can reduce the level of dissatisfaction of customers who take their cargo over the time-window. From the view point of strategic flexibility, the dual mode delivery system appears to be more interesting. In meeting the objective of maximizing customer satisfaction, the use of drones and vehicles incurs less cost and requires fewer resources.

Keywords : Drone, Vehicle Routing Problem, Meta-Heuristics, Evolutionary Algorithm, Distribution Network

논문접수일 : 2016년 07월 18일 논문게재확정일 : 2016년 08월 24일

논문수정일(1차 : 2016년 08월 17일)

* 이 논문 또는 저서는 2015년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014S1A3A2044046).

† 교신저자, yunhong.min@gmail.com

1. 서 론

물류산업에 있어서, 빠른 배송에 대한 고객 수요는 계속해서 증가하고 있다[4]. 국내 일부 소셜 커머스에서 당일배송이나 2시간 내 배송이 완료되는 신속 배송 서비스를 고객의 요구에 따라 유연하게 제공하고 있다. 물류서비스의 품질이 평준화되어 있는 한국 시장에서 빠르고 유연한 배송은 소비자들이 배송회사를 선택하는 매우 중요한 기준이 되었으며, 빠른 배송에 대한 고객의 수요를 만족시키는 것은 매우 중요한 사안이다[4, 48]. 하지만 도심지역의 교통 혼잡과 복잡한 도로상황 등으로 인해 기존의 배송 네트워크를 이용해 고객이 원하는 시간 내에 서비스를 제공하는 것은 어려운 일이다[5]. 일반적인 배송 네트워크는 규모의 경제에 기반한 터미널 집중(Hub & Spoke) 구조이기 때문에, 이러한 시스템을 이용해서 빠른 배송에 대한 고객 수요를 충족시키는 것은 많은 비용을 필요로 한다[7]. 물류산업에서는 이를 보완하기 위해 이륜차를 이용한 신속배송 서비스를 제공하고 있지만, 이 방법 역시 종래와 같은 도로 네트워크를 사용한다는 점에서 큰 효과를 보고 있지는 않다. 또한 이륜차 서비스의 높은 비용은 소비자들에게도 부담으로 작용하고 있어서, 새로운 운송수단의 도입에 대한 관심이 높아지고 있다.

도심지역의 복잡성과 교통 혼잡을 피할 수 있다는 점에서 드론을 이용한 배송 서비스가 주목을 받고 있다[5, 20, 21]. 드론은 차량과 달리 항공 네트워크를 이용하기 때문에 배송시간에 영향을 주는 도심지의 혼잡에서 상대적으로 자유롭고, 고객과 차고지 사이를 점대점 방식(Point to Point: P2P)으로 운행으로 때문에 한번 창고를 나간 후 다시 창고로 돌아오는 시간인 재보충주기가 짧아 당일에 발생하는 수요를 대처하기에 유리하다.

본 논문에서는 ‘희망 배송 시간대를 가지는 고객이 존재하는 도심지역에서의 사륜차와 드론의 혼합 일정계획’(Vehicle Drone Routing Problem with Time Window: VDRPTW)을 다룬다. VDRPTW는 고객이 정한 희망 배송 시간대에 맞추어 서비스할

수 있는 차량과 드론의 최소 운송비용 라우트를 찾는 최적화 문제이다. 이 문제는 배송 시간대를 가지는 고객에게 최소비용으로 모든 고객에게 서비스할 수 있는 차량의 운행일정을 찾는 문제인 조합최적화의 희망 배송대 차량 일정계획 문제(Vehicle Routing Problem with Time Window: VRPTW)의 확장된 문제이며, 따라서 VDRPTW의 계산복잡도는 NP-하드(NP-Hard)임을 알 수 있다.

제2장에서는 VDRPTW에 대한 선행연구들을 소개하고, 서로 다른 특징을 가지는 드론과 차량이 혼용되는 VDRPTW의 특징을 살펴보고자 한다. 제3장에서는 VDRPTW의 문제 상황 및 수리모형을 제시하고, 제4장에서는 VDRPTW에 대한 유전 알고리즘을 설명한다. 제5장에서는 Solomon 데이터 셋에 진화알고리즘을 적용해 차량만을 사용한 VRPTW와 차량과 드론을 혼용한 VDRPTW의 실험결과를 비교한다. 마지막으로 제6장에서는 결론과 향후연구 방향에 관해 논의한다.

2. 선행연구 및 VDRPTW로의 확장

드론과 차량을 혼합한 배송 네트워크에 대한 직접적인 선행연구를 찾기는 힘들기 때문에, 본 논문에서는 VDRPTW와 밀접한 관련이 있는 VRPTW와 드론 운행에 대한 선행연구를 각각 살펴보고자 한다.

2.1 VRPTW 관련 선행연구

VRPTW는 차량 일정계획 문제(Vehicle Routing Problem: VRP)에서 파생된 문제로서, 서비스를 받는 고객들이 희망하는 배송 시간대(Time Window)에 맞추어 서비스가 제공되어야 하는 제약이 추가된 차량 일정계획 문제이다. VRPTW는 많은 학자들에 의해 연구된 바 있다[3]. 그 중 본 논문에서 다루는 VDRPTW와 밀접한 관련이 있는 선행연구는 다음의 두 가지로 분류할 수 있다.

첫째, 고객의 희망배송 시간대가 반드시 지켜져야 하는 하드 VRPTW(Hard VRPTW)와 달리 고객의

희망배송 시간대에서 벗어난 시점에도 서비스가 가능하고, 벗어난 만큼을 추가적인 비용으로 처리하는 소프트 VRPTW(Soft VRPTW)가 그것이다. 하드 VRPTW는 고객의 희망 배송 시간대를 제약식에 반영함으로써 각 고객이 배송 시간대에 무조건 서비스를 받을 수 있도록 하는 반면, 소프트 VRPTW는 배송 시간대를 벗어난 배송에 페널티를 부과함으로써 자연스럽게 서비스 시점이 각 고객이 제시한 희망배송 시간대에 들어갈 수 있도록 유도한다. 지역해 탐색(Local Search)[11, 30], 타부 서치(Tabu search)[18, 23, 45], 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) [19, 24], 유전 알고리즘[9, 34]와 진화 알고리즘[1, 13, 15] 등이 소프트 VRPTW의 풀이에 사용된 바 있다.

또 다른 관련 선행연구는 *다거점 차량일정 계획* (multi-depot VRP, MDVRP)이다. 도심지역 물류시스템은 차량이 속한 차고지가 복수라는 특징을 가진다. 이러한 특징은 MDVRP로 정의될 수 있으며, 복수의 차고지로 인해 문제의 해 공간을 더 크게 만든다는 점에서 MDVRP를 단일 창고 VRP 문제보다 더 어렵게 만든다. MDVRP에서 고객은 복수의 차고지 중 한 차고지에서 출발하는 차량으로부터 한번 서비스 받을 수 있으며, 차량은 출발한 차고지로 다시 돌아가야 한다는 제약식이 추가된다. MDVRP에 있어서는 분기한정법(Branch and Bound)을 이용한 정확해법이 소개되고 있으며[31, 32], 이는 작은 크기의 입력예제(instance)에서만 유효하다. 큰 크기의 입력예제에 있어서는 휴리스틱적인 접근이 활발히 연구되었는데, 단순한 연산으로 초기해를 생성하고 이를 점차적으로 개선시켜 나가는 방식이 다수를 차지하고 있다. MDVRP은 보조 네트워크를 이용해 정의된 후, 타부 서치를 이용해 연구되기도 하였으며[40], 이웃해 탐색법(cooperative and adaptive variable neighborhood search)[2, 50], 타부 서치[22], 페탈 알고리즘(petal algorithm)[39] 등이 사용되었다.

2.2 드론 관련 선행연구

배송 네트워크에서 드론의 운용에 대한 연구는 2015

년을 시작으로 소수가 소개되었다. 먼저, 드론과 차량을 팀으로 묶어 두 운송수단이 협동하여 고객에게 서비스하는 외관원 문제(Flying Sidekick TSP: FSTSP)와 드론과 차량을 이용해 병렬적으로 서비스하는 외관원 문제(Parallel Drone Scheduling TSP: PDSTSP)가 연구된 바 있다[36]. FSTSP에서는 차량이 드론의 이동기지 역할을 하기 때문에, 드론과 차량의 운행시간이 동기화되어야 한다는 조건을 가진다. PDSTSP는 외관원 문제와 드론의 병렬공정 일정계획(Parallel Machine Scheduling: PMS)을 결합한 문제라고 볼 수 있다.

또한 드론과 차량을 동시에 사용하는 외관원 문제(Traveling Salesperson Problem with Drone: TSP-D)가 연구되었다[6]. 이 연구에서는 TSP-D의 혼합 정수모형을 제시하고 있으며, TSP-D를 해밀턴 사이클 문제의 일반화된 문제로 소개하고, 복수의 고객들을 1개의 고객으로 간주하고, 이렇게 단순화된 고객들의 집합을 연결하는 방식의 휴리스틱 알고리즘(First-cluster second procedure)을 제안하고 있다. 차량과 드론의 협업을 고려한 외관원 문제는 이단폴이 휴리스틱을 이용하여 풀이된 바 있다[28, 29].

선행연구들은 드론과 차량이 동시에 사용된 상황을 제시함으로써, 본 연구의 아이디어를 주었다고 할 수 있다. 특히 PDTSP를 소개하는 Murray와 Chu의 2015년 논문은 본 유형에서 드론이 차고지와 고객 사이를 점대점으로 운행하는 문제 상황에 좋은 참고가 되었다.

선행연구들은 드론과 차량이 쌍을 이루고, 차량이 드론의 모함 기능을 하는 모형을 소개하고 있다. 하지만 도심지의 물류상황은 1개의 차고지가 반경 2~3km를 담당하고, 차량의 시각에서는 반경 1~1.5km를 담당하기 때문에, 차량이 드론의 모함이 되는 접근 보다는 드론이 독립적으로 차고지에서 운용되는 모형이 실재를 더 반영할 수 있다.

또한 본 연구에서는 차량과 드론이 혼용되는 상황을 차량만을 사용하는 상황과 비교함으로써, 의사결정자에게 드론의 사용이 상대적으로 어떠한 이익이 되는지를 살펴보고자 하였다.

2.3 VDRPTW로의 확장

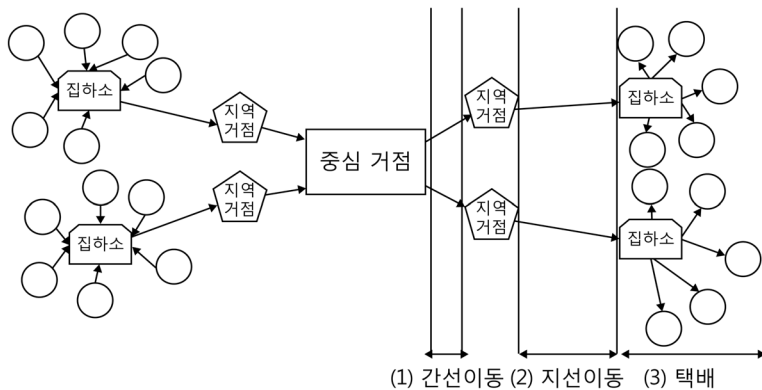
‘수직 이착륙이 가능한 무인 비행체’로 정의되는 드론은 기계의 특성상 운반 가능한 배송품의 무게 제한과 운행거리 제한으로 인해 운행 반경이 좁은 택배 배송 네트워크에서 운용될 가능성이 높다. 택배 배송 네트워크에서 드론의 장점은 무인 비행이 가능하다는 점, 도심지의 교통 혼잡을 피할 수 있다는 점, 차량보다 빠르다는 점, 그리고 단위 거리당 1개의 화물 운송비용이 차량보다 작다는 점을 들 수 있다[20] 비윤리적인 부분에서는 드론의 초기 구입비용이 1000달러 정도로 높기는 하지만, 배송 네트워크에서 드론의 운영비는 배송 건당 10~20센트로 매우 낮기 때문에 투자금의 회수율이 빠를 것으로 기대된다[21]. 드론 배송 서비스를 시범적으로 운용하는 아마존(Amazon)에서는 비용을 화물 1개 당 1달러로 계산하고 있다[41]. 배송 네트워크에 있어서 드론의 운용이 기업의 이윤에 어떠한 영향을 미칠지는 활발한 논의가 이루어지고 있으며, 긍정적인 영향을 미칠 것이라는 견해가 다수이다 [20, 21]. 이러한 점 외에도 드론은 차고지와 고객을 접대점 방식으로 운행하기 때문에 재보충주기가 짧은데, 이는 드론 배송이 다양한 형태의 고객 수요에 대해 더 탄력적으로 대응할 수 있게 한다.

일반적인 물류 네트워크는 중심 거점과 지역 거점 그리고 영업소로 이루어져 있는 터미널 집중(Hub & Spoke) 구조를 가진다[그림 1]. 물류 네트워크가 수

행하는 작업은 시작점과 종착점에 따라 화주로부터 중심(Hub)까지의 운행인 집하와 중심에서 분류된 화물을 고객에게 전달하는 배송으로 나뉜다. 배송은 다시 시작점과 끝점의 종류에 따라 중심 거점 간의 간선이동, 중심 거점에서 지역 거점까지의 지선이동, 그리고 영업소와 고객 사이의 운행인 택배로 나뉠 수 있다.

간선이동과 지선이동은 일반적으로 80km 정도의 장거리 운행으로 다량의 화물을 운송하는 작업이기 때문에 대형차량이 이용된다. 따라서 무게와 운행거리가 제한적인 드론을 사용하는 것은 비효율적이며 현실성이 떨어진다. 반면 도심지에서 이루어지는 택배의 경우에는 그 운행 범위가 반경 2~3km 정도로 상대적으로 좁아 드론을 사용하기에 적합하고, 교통 혼잡에서 자유로운 드론을 차량과 병행하여 운용할 경우 배송시간 감소 등을 통해 기존 배송 시스템의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

해외에서는 시험적으로나마 드론을 이용한 배송 서비스가 제공되고 있다. 아마존은 ‘프라임 에어(Prime air)’라는 서비스를 통해 드론을 이용한 30분 내 배송을 미국 도심 일부 지역에 한하여 시험하고 있으며[41], 독일의 DHL은 이미 독일 도서산간 지역에서 의약품 배송에 ‘퍼셀콥터(Parcelcopter)’라는 드론을 사용하고 있다[14]. 하지만 국내에서는 아직까지 배송산업에 드론을 도입하는 것에 대한 경제적, 제도적 검토가 충분히 이뤄지지 않은 상태이며, 이러



[그림 1] 물류 네트워크

한 시점에서 드론의 유용성을 검증하는 작업은 반드시 필요하다. 본 논문에서는 배송 네트워크에 드론을 도입하는 것이 배송 서비스의 유연화를 가져와 소비자의 만족도를 높일 수 있음을 보이고자 한다.

3. 문제 상황 및 수리모형

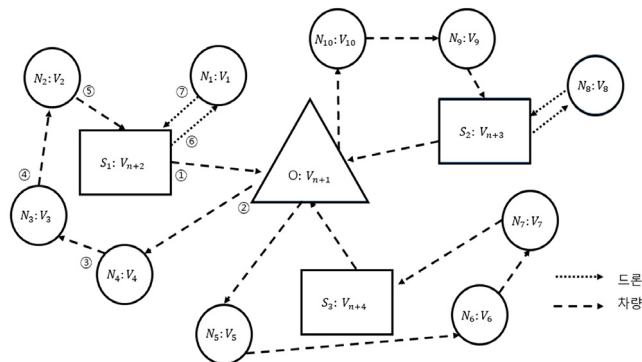
3.1 문제 상황

본 논문에서는 도심지에서의 택배 네트워크를 반영하기 위하여 복수의 MDVRP 기반의 문제 상황을 가정한다. 또 드론과 차량을 같이 운용하는 이중(dual mode) 배송 네트워크를 제안한다. 차량은 차고지에서 출발하여, 고객에게 서비스하기 전에 분배센터에서 당일 배송할 짐을 적재해야 하며, 운행이 종료된 이후에는 다시 출발하였던 차고지로 돌아가야 한다. 또 드론의 경우에는 차고지와 고객을 점대점으로 운행한다. 드론 운행에 대한 이러한 가정은 한 차고지의 담당 반경이 3km 내외로 매우 좁은 편인 실제 도심지역의 배송 상황을 잘 반영하고 있다. 소비자의 경우에는 특정한 시간 내에 배송 받기를 원하는 희망시간 고객, 그리고 희망시간 고객과 유사하게 희망배송 시간대를 가지지만, 희망배송 시간대의 시작 시간보다 빨리 배송될 경우, 페널티가 아닌 추가 비용을 지불할 의향이 빠른 배송 고객이 있다. 희망시간 고객의 경우에는 해당 시간대보다 빨리 배송

하거나, 늦게 배송하는 경우에는 페널티가 부과된다. 이 희망배송 시간대에 대한 고려는 VDRPTW를 TSP 기반의 문제와는 다른 VRPTW 기반의 문제로 만들며, 이는 문제의 계산 복잡도와 문제의 풀이 전략 모두에 있어서 TSP 기반의 문제와는 다른 접근이 필요함을 의미한다.

3.2 수리모형

VDRPTW는 완전 그래프(complete graph) $G(U, A)$ 에서 정의된다. 노드 집합 U 는 세 종류의 노드 집합으로 이루어져 있는데, 고객을 의미하는 노드 집합 $N = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 분배센터를 의미하는 노드 집합 $O = \{v_{n+1}\}$, 그리고 차고지를 의미하는 노드 집합 $S = \{v_{n+2}, v_{n+3}, \dots, v_{n+s+1}\}$ 이다. 각각의 노드 $i \in N$ 은 각 고객의 수요량(w_i)를 가지고 있으며, 고객이 요구하는 배송 시작시간(ET_i)과 배송 종료시간(LT_i)으로 이루어진 목표배송 시간대(time window) $[ET_i, LT_i]$ 를 가지고 있다. 또 해당 고객이 신속 배송을 희망하는 고객임을 알려주는 파라미터를 가지고 있다. 차고지를 나타내는 노드 $s \in S$ 에는, 사전에 해당 차고지에 배정된 차량 집합 $K = \{1, \dots, k, \dots, |K|\}$ 과 드론 집합 $L = \{1, \dots, l, \dots, |L|\}$ 이 주어진다. 각각의 차량 $k \in K$ 에는 최대 적재 용량이 주어져 있으며, 각 드론 $l \in L$ 에는 최대 적재 용량과 최대 운행가능 거리가 주어져 있다.



[그림 2] 10명의 고객과 한 개의 분배센터 그리고 세 개의 차고지로 구성된 네트워크에서 이루어진 차량(1-2-3-4-5)과 드론(6-7)의 배송 라우트에 대한 예시

모든 차량은 시내에 있는 소속 차고지에서 운행을 출발해 분배센터에 들러 그날 배송할 짐을 싣는다. 그 후 고객들을 방문하며 서비스를 제공하고, 배송을 마친 후에는 다시 소속 차고지로 돌아온다. 드론의 운행은 점대점 형태로, 차고지에서 고객의 짐을 싣고 고객에게 배송한 후 다시 차고지로 돌아와 다음 배송을 준비한다.

3.2.1 결정변수

VDRPTW의 결정변수로는 차량과 드론의 운행을 나타내는 이진변수 v_{ij}^{sk} 와 d_{ij}^l 를 사용한다. v_{ij}^{sk} 는 차고지 $s \in S$ 에 속한 차량 $k \in K$ 가 노드 $i \in U$ 에서 노드 $j \in U$ 로 운행할 경우 1의 값을 갖고 그렇지 않을 경우에는 0의 값을 갖는다. 드론의 운행을 나타내는 이진변수 d_{ij}^l 는 3가지로 나뉜다. 첫 번째 유형의 d_{ij}^l 는 차고지 $s \in S$ 에 속한 드론 $l \in L$ 이 고객 $i \in N$ 에 배송하고 돌아온 다음 고객 $j \in N$ 에 배송하기 위해 운행될 경우 1의 값을 갖고 그렇지 않을 경우에는 0의 값을 갖는다. 두 번째 유형의 d_{sj}^l 는 차고지 $s \in S$ 에 속한 드론 $l \in L$ 이 ‘운행을 시작하기 위해’ 차고지 $s \in S$ 에서 고객 $j \in N$ 로 이동하면 1, 아니면 0의 값을 갖는다. 세 번째 유형의 d_{js}^l 는 차고지 $s \in S$ 에 속한 드론 $l \in L$ 이 ‘운행을 종료하기 위해’ 고객 $j \in N$ 에서 차고지 $s \in S$ 로 이동하면 1, 아니면 0의 값을 갖는다. 드론은 점대점 형태로 운행되기 때문에 차고지에서 출발해 고객을 방문하고 나면 반드시 해당 차고지로 돌아와야 한다. 하지만 드론의 방문 순서를 결정변수에 표현하기 위하여, 운행을 시작하기 위한 첫 이동과 운행을 종료하기 위한 마지막 이동을 제외한 고객과 차고지 간의 이동은 결정변수에 포함시키지 않았다.

3.2.2 패러미터

VDRPTW의 수리모형에서 사용되는 패러미터들의 표기(notation)는 다음과 같다.

D_{ij} : 노드 i 와 노드 j 간의 유클리디안 거리

D^d : 드론의 거리상수¹⁾

D^v : 차량의 거리상수²⁾

C_D : 드론의 단위 운행거리 당 비용

C_v : 차량의 단위 운행거리 당 비용

E_k : 차량 k 의 비이익 단위³⁾ 운행거리당 비용

Q_k : 차량 k 의 용량

Q_d : 드론 d 의 용량

T_i : 노드 i 에 도착한 시간

w_j : 고객 $j(j \in N)$ 의 배송품 무게

t_{ij} : 노드 i 에서 노드 j 까지 이동하는데 걸리는 시간

ET_i : i 고객이 정한 희망 배송 시간대의 시작시간

LT_i : i 고객이 정한 희망 배송 시간대의 종료시간

a : 차량이나 드론이 ET_i 보다 먼저 도착한 경우의 비용을 계산하는데 사용되는 비용계수($a > 0$)

b : 차량이나 드론이 LT_i 보다 늦게 도착한 경우의 비용을 계산하는데 사용되는 비용계수($b > 0$)

c : 차량이나 드론이 ET_i 보다 일찍 배송했을 때 추가적인 이윤을 계산하기 위한 계수($c < 0$)

α : 해당 고객이 희망 배송 시간 내에서만 배송 서비스를 받기 원하는 경우 1, 그 외는 0

β : 해당 고객이 희망 배송 시간 보다 빠른 배송을 원하고 이에 따른 추가적인 비용을 지불할 의사가 있는 경우 1, 그 외는 0

M : 드론이 한 번에 비행할 수 있는 최대거리

- 1) 일반적으로 차량일정계획 문제에서는 두 지점 i 와 j 간의 거리를 구하는 것은 직선거리인 유클리디안 거리를 사용한다. 하지만 도심지에서는 두 지점 사이의 거리를 이러한 형태로 구하는 것은 문제가 있는데, 도심지역은 바둑판의 구조이기 때문이다. 맨해튼 거리는 이를 보정하고자 한 시도이다. 때문에 실제 산업에서는 유클리디안 거리에 의해 손실되는 부분을 보정할 수 있는 거리상수 D^v 를 곱하는 방법이 사용되고 있다. 더불어 드론의 경우에는 그리드 운행을 하는 것이 일반적이기 때문에 차량보다 작은 수치의 보정계수를 사용하였다. *그리드 운영(grid operation)은 항공역학에서 사용되는 개념이다.
- 2) 차량의 경우는 서울시 도심 내에서 20여 개의 목적지-도착지 쌍을 생성하고, 해당 지점 사이의 직선거리와 실제 차량으로 움직이는 경우의 거리를 비교하여 구한 거리 상수이다.
- 3) 비이익 거리는 이윤이 창출되지 않는 구간을 의미한다. [그림 1]에서, 차고지에서 분배센터까지의 운행거리(①)와 마지막 고객에게 배송을 한 후 다시 차고지로 돌아오는 거리(⑤)가 이에 해당한다.

S^v : 차량의 이동 속도

S^d : 드론의 이동 속도

Max time: 드론 운행 종료 시간.

DF_l : 드론 l 의 고정비용

VF_k : 차량 k 의 고정비용

3.2.3 목적식

Minimize

$$2\sum_{i \in NU} S \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ij}^{sl} D_{sj} C_D D^d \quad (1)$$

$$+ \sum_{i,j \in s} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ij}^{sk} D_{ij} C_v D^v \quad (2)$$

$$+ \sum_{i \in S} \sum_{j \in O} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ij}^{sk} D_{ij} E_k D^v \quad (3)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in S} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ij}^{sk} D_{ij} E_k D^v$$

$$+ \sum_{i \in NU} S \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \alpha_j d_{ij}^{sl} \quad (4)$$

$$\times [a \max(ET_j - T_j, 0) + b \max(T_j - LT_j, 0)]$$

$$+ \sum_{i \in NU} S \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \beta_j d_{ij}^{sl}$$

$$\times [c \max(ET_j - T_j, 0) + b \max(T_j - LT_j, 0)]$$

$$+ \sum_{i \in O \cup N} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \alpha_j v_{ij}^{sk} \quad (5)$$

$$\times [a \max(ET_j - T_j, 0) + b \max(T_j - LT_j, 0)]$$

$$+ \sum_{i \in O \cup N} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \beta_j v_{ij}^{sk}$$

$$\times [c \max(ET_j - T_j, 0) + b \max(T_j - LT_j, 0)]$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} VF_k v_{is}^{sk} \quad (6)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} DF_l d_{is}^{sl} \quad (7)$$

식 (1)은 모든 드론에 대해 운송비용을 계산한다. 드론은 차고지와 고객 사이를 왕복하기 때문에 두 번 계산된다. 식 (2)는 은 모든 차량에 대한 운송비용을 의미한다. 식 (3)은 차량의 비이익 거리 운송에 의해 발생하는 총비용을 계산한다. 식 (4)와 식 (5)는 모든 고객에 대해, 배송 서비스가 고객이 사전에 정한 시간대(Time Window)보다 이르거나 늦을 경우의 비용과 빠른 배송을 원하는 고객의 경우 먼저 도착한 시간에 대한 추가적인 이윤을 계산한다. 식 (6)은 차량의 고정비용을 식 (7)은 드론의 고정비용을 의미한다.

3.2.4 드론 운행과 관련된 제약식

$$\sum_{i \in NU} S d_{ij}^{sl} w_j \leq Q_d, \text{ for all } j \in N, l \in L, s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{i \in NU} S d_{ij}^{sl} D_{ij} D^d \leq M, \text{ for all } j \in N, l \in L, s \in S \quad (9)$$

식 (8)은 모든 드론 운송에 적재용량 제한이 있음을 나타낸다. 식 (9)는 모든 드론 운송에 최대 비행거리가 M 으로 제한되어 있음을 나타낸다.

$$\sum_{i \in NU} S d_{ij}^{sl} = \sum_{i \in NU} S d_{ji}^{sl} \text{ for all } j \in N, l \in L, s \in S \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} d_{sj}^{sl} = \sum_{j \in N} d_{js}^{sl} \text{ for all } l \in L, s \in S \quad (11)$$

식 (10) 과 식 (11)은 드론이 일단 차고지에서 출발하여 고객 j 를 방문 한 이후에는 다른 고객을 방문하거나 또는 출발했던 차고지로 돌아와 운행을 마감하는 것을 의미한다.

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ij}^{sl} (T_i + D_{si} D^d / S^d + D_{sj} D^d / S^d) \quad (12)$$

$$= T_j, \text{ for all } j \in N$$

$$d_{js}^{sl} T_j \leq \text{Max time}, \text{ for all } j \in N, l \in L, s \in S \quad (13)$$

식 (12)는 드론 운송으로 고객 j 에 도착한 시간을 계산한다. 이는 목적식에서 식 (5)와 식 (6)의 시간 페널티를 계산하기 위해 필요하다. 식 (13)은 마지막 운행의 시간이 Max time 보다 작게 함으로써, 모든 드론의 라우트가 시간 내에 종료되도록 한다.

3.2.5 차량 운행과 관련된 제약식

$$\sum_{i \in O \cup N} \sum_{j \in N} v_{ij}^{sk} w_j \leq Q_k, \text{ for all } k \in K, s \in S \quad (14)$$

식 (14)는 모든 차량에 대해 적재용량 제한이 있음을 의미한다.

$$\sum_{i \in NU} O v_{ij}^{sk} = \sum_{i \in NU} S v_{ji}^{sk} \text{ for all } j \in N, k \in K, s \in S \quad (15)$$

$$v_{so}^{sk} = \sum_{j \in N} v_{oj}^{sk} = \sum_{j \in N} v_{js}^{sk}, \quad (16)$$

$$\text{for all } j \in N, k \in K, s \in S$$

식 (15)와 식 (16)은 차량이 일단 차고지에서 나와 분배센터에 들러 배송물을 실어 고객들에게 배송을 다 마치면 반드시 동일한 차고지로 돌아와 운행을 마감하는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in NU} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ij}^{sk} (T_i + D_{ij} D'' / S^v) \\ = T_j, \text{ for all } j \in N \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)은 고객 j 에 도착한 시간을 계산한다.

3.2.6 차량과 드론 운행 모두에 관련되어 있는 제약식

$$\begin{aligned} \sum_{i \in OU} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ij}^{sk} \\ + \sum_{i \in NU} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ij}^{sl} = 1, \\ \text{for all } j \in N; V_j + D_j = 1 \\ \sum_{i \in OU} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ji}^{sk} \\ + \sum_{i \in NU} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ji}^{sl} = 1, \\ \text{for all } j \in N; V_j + D_o = 1 \\ \sum_{i \in OU} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ji}^{sk} \\ + \sum_{i \in NU} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ij}^{sl} = 1, \\ \text{for all } j \in N; V_o + D_j = 1 \\ \sum_{i \in OU} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ji}^{sk} \\ + \sum_{i \in NU} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ji}^{sl} = 1, \\ \text{for all } j \in N; V_o + D_o = 1 \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)의 식들은 노드 j 에 대하여, 드론이 들어오면(D_j), 반드시 드론이 나가게(D_o) 하고, 차량이 들어오면(V_j), 반드시 차량이 나가게(V_o) 하는 기능을 한다. 또, 노드 j 에 대해, 차량이나 드론 중 하나만 할당되도록 한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in NU} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} v_{ij}^{sk} \\ + \sum_{i \in NU} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} d_{ij}^{sl} = N \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)는 차량이나 드론으로 모든 고객에 대한 배송이 이루어져야 함을 의미한다.

$$t_{00} = 0, T_s = 0, s \in S \quad (20)$$

식 (20)은 다른 식들에서 사용되는 시작시간(T_s)이 0에서 시작하는 것을 나타낸다. 또한 t_{00} 는 모든 드론과 차량의 배송 도착시간을 계산하는데 사용된다.

4. 알고리즘

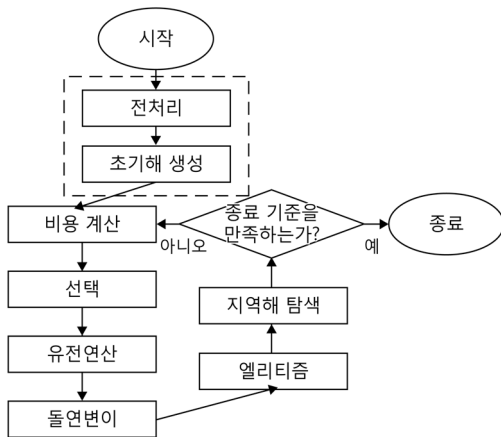
본 장에서는 VDRPTW를 풀기 위해서 고안된 하이브리드 진화알고리즘(Hybrid Evolutionary Algorithm: HEA)을 살펴보고자 한다. 제4.1절에서는 HEA의 개략적인 구조를 살펴보고, 제4.2절과 제4.3절은 HEA에 사용된 다양한 요소들을 소개하고자 한다.

4.1 HEA와 선행연구에 대한 간략한 소개 및 사용 분야

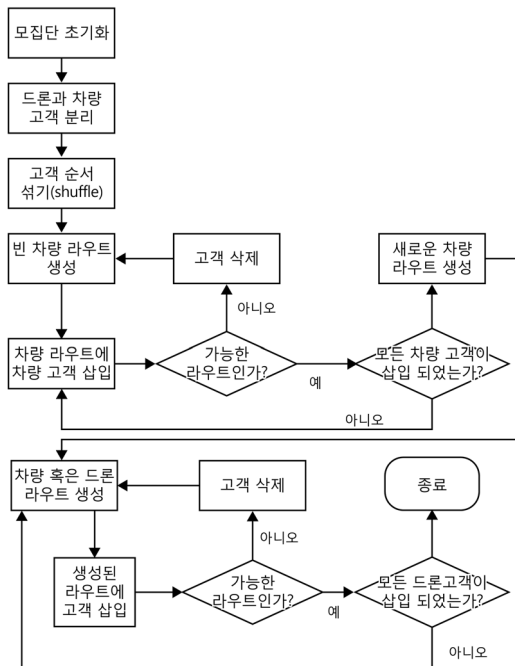
본 연구의 HEA는 무작위 방식(randomized greedy heuristic)으로 생성된 해가 진화알고리즘의 초기해로 들어가고, 진화알고리즘의 해가 다시 지역해 탐색의 초기해로 들어가는 구조이다[그림 3]. 연속형 순서기반의 조합최적화 문제인 VDRPTW의 이웃해는 정확히 정의되기 어렵다[10]. 이는 해의 변화 정도와 결과값의 개선 사이에 뚜렷한 양의 상관 관계가 보장되지 않음을 의미한다[12]. HEA 알고리즘 내에서는 연산량을 감소시키기 위해 가능해들만이 생성되고 연산되도록 한다. 충분한 연산(진화)횟수와 지역해 탐색으로 가능해 연산 전략의 약점으로 지적되는 다양성 저하 문제를 극복하고자 하였다[17].

알고리즘은 실험 데이터를 읽고, 이를 알고리즘에 적합 형태로 저장하는 전처리에서 시작한다. 초기해는 무작위 방식으로 생성되며, 두 단계로 구분된다[그림 4]. 이는 무게나 차고지로부터의 긴 거리로 인해 반드시 차량으로만 서비스해야 하는 고객이 존재하기 때문이다. 초기해 구성이 끝난 후, 모든 해들의 비용이 계산된다. 무작위 비복원 추출로 선택된 해 쌍(pair) 사이에서, 가장 좋은 라우트에 대해 교환 교차(route exchange crossover)에 의해 유전작업이

이루어지고, 일정 확률로 돌연변이가 출현한다. 이후 총비용이 낮은 전체 모집단 중 10%의 해를 보관하는 엘리티즘(Elitism)을 수행한다. 이는 좋은 해들이 후행의 연산으로 인해 소실되지 않게 하는 기능을 한다. 또 일정한 세대마다 지역해 탐색을 수행하여 해를 개선시킨다.



[그림 3] HEA의 흐름도



[그림 4] HEA의 초기해 생성 흐름도

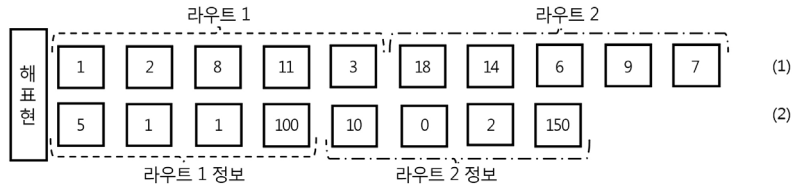
4.2 진화 알고리즘의 해 표현

해 표현은 알고리즘이 수행되는 과정에서 해에 대한 정보를 담고 있는 구조로, 좋은 해 표현의 조건으로는 4가지가 주요하게 고려되는데 1) 불필요한 반복을 줄일 것, 2) 문제의 해를 정확하게 표현 할 것, 3) 진화 알고리즘의 세대반복 과정에서 유전 연산자가 효율적이고 정확하게 유전작업을 수행할 수 있게 할 것, 4) 적응도(fitness)의 계산이 쉬울 것 등이 있다[16]. 순서형 조합최적화 문제인 VRP 계열의 문제에서는 해 표현 방법으로 단일 유전자 해 표현(One chromosome technique)[47], 두 개 유전자 해 표현(The two chromosome technique)[35, 38], 두 부분 유전자 해 표현(The two-part chromosome technique)[26], 변수길이 유전자 해 표현(variable length chromosome)[46] 등이 사용된 바 있다.

본 연구의 HEA는 두 부분 유전자 해 표현을 사용한다[그림 5]. 두 부분 유전자 해 표현은 고객들의 순서를 포함하고 있는 부분 (1)과 각 라우트의 정보를 담고 있는 (2)로 구분 된다. (2)는 (1)에서 라우트의 종료점, 운송 수단 정보를 나타내는 파라미터(1=차량, 0 = 드론), 배정 차고지, 비용으로 구성되어 있다. 예를 들어 [5, 1, 1, 100]의 경우에는 고객 1, 2, 8, 11, 3이 차량에 의해 서비스 받았으며, 차고지 1에 속해 있었고 비용이 100이라는 것을 의미한다. [10, 0, 2, 150]은 고객 18, 14, 6, 9, 7이 드론에 의해 서비스 받았으며, 차고지 2에 속해 있었고 비용이 150이라는 것을 의미한다. 두 부분 유전자 해 표현은 해당 해가 필요로 하는 차량과 드론의 대수와 각 라우트가 배달해야 하는 고객의 순서를 온전히 담고 있다.

4.3 유전 연산자

순서형 조합최적화 문제인 VDRPTW에서 일반적인 진화 알고리즘의 유전 연산자를 사용하는 것은 불가능해의 출현으로 인한 비효율을 초래한다. 불가능해가 유전 모집단의 다수를 차지하는 경우에는 문제가 풀리지 않고 좋지 않은 해가 도출될 수 있다.



[그림 5] 두 부분 해 표현

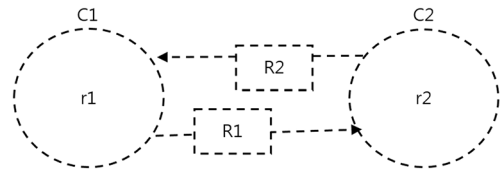
때문에 매 세대에서 가능해 조건을 강하게 유지시키면서 세대 간의 유전을 표현하기 위해 라우트 교환 교차를 유전 연산자로, 돌연변이 연산자는 2-opt*를 사용하였다.

4.3.1 교환 교차 연산자

유전 연산자는 진화 알고리즘에서 세대가 진화하여 다음 세대로 가는 과정에서 어떠한 정보를 중점적으로 이용할 것인지, 어떠한 정보를 후 세대에 넘겨줄 것인지를 결정하는 역할을 한다[8]. VDRPTW와 같이 순서가 있는 조합최적화 문제의 유전 연산자는 1)이웃 정보(adjacency information) 2)순서(order, 해 내의 고객들의 순서) 3) 위치(position, 라우트 내에서 해당 노드가 어디에 있었는지) 3가지 요소를 다음 세대에 넘겨 줄 수 있다[43]. 이웃정보를 유전시키는 연산자로는 에지 재조합(edge recombination)[49]이, 순서 정보는 교차 연산자가[25] 그리고 위치의 경우에는 사이클 교차(cycle crossover)[37]와 위치기반 교차(position based crossover)[44]가 있다.

VDRPTW의 경우는 운행거리와 시간비용이 해의 품질에 영향을 미치기 때문에, 희망 시간대에 영향을 미치는 고객의 순서가 중요한 정보이다. 라우트 교환 교차는 한 해의 좋은 라우트를 다른 해에 삽입함으로써, 가능해 조건과 고객 순서 정보를 온전히 다음 세대에 유전시킨다. 연산자는 무작위로 2개의 해를 선택한 후 각 해에서 가장 좋은 라우트를4) 뽑

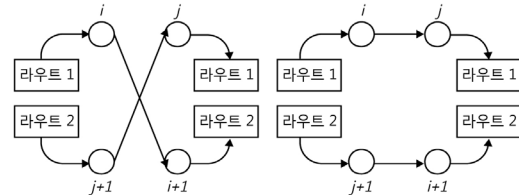
아, 상대편 해에 삽입한다. 이후 중복되는 고객을 기존 해에서 삭제시키도록 한다([그림 6] 참조).



[그림 6] 라우트 교환 교차의 작동 방식

4.3.2 돌연변이: 2 opt*

돌연변이 방법은 2 opt*를 사용하도록 한다. 돌연변이 작업은 사전에 정의된 확률에 의해 수행된다.



[그림 7] 2-opt*

2 opt*는 단일 해 내의 상이한 라우트 간 부분 교환 과정으로 단일방법 메타휴리스틱(single method based metaheuristics)에서 해를 찾기 위한 연산자로 사용되었다. 본 연구의 2 opt*는 무작위로 선택된 2 라우트에 대해, 라우트의 뒷부분을 교환하는 방식이다. [그림 7]을 보면 라우트 1의 i+1이후의 고객들이 라우트 2의 j이후의 고객과 교환된 것을 확인할 수 있다. 상이한 운송수단을 가지는 라우트 사이에서도 돌연변이가 수행되며, 드론에 의해 서비스가 불가능한 고객이 섞여있는 경우에는 해당 고객의 교환만

4) 이 개념은 각 라우트에 대해 다음의 식을 통해 계산될 수 있다.

$$\text{라우트의 적합도}_i = \frac{\text{라우트 비용}_i + (\text{운행 종료시간} - \text{라우트운행종료시간}_i)}{\text{척도 보정계수}}$$

을 취소함으로써 2 opt*의 교환 작업을 강하게 유지 시키고자 하였다.

4.3.3 지역해 탐색

지역해 탐색은 탈출 체인(ejection chain)에 기반을 둔 방식으로, 단일 해에 대해 더 좋은 해를 탐색할 수 있게 한다[27]. 지역해 탐색은 단일 해의 라우트를 길이가 K 인 고객들의 블록(block)을 만든 후, 블록들을 다른 라우트의 삽입해 본 후 비용이 감소하는 경우에는 해당 위치에 블록을 삽입하고 다음 고객 블록으로 넘어가는 방식이다.

지역해 탐색의 의사코드

- 1단계: 모든 라우트에 대해서 해 들을 K 개 길이의 서로 다른 구간으로 자른다.
- 2단계: 각 구간들에 대해서, 구간들을 다른 위치에 삽입해 본다. 이 때 비용이 감소하는 위치가 발견되면 해당 구간에 대한 탐색을 종료한다.

이때 블록의 길이는 지역해 탐색의 연산량과 효율성 두 가지에 밀접한 관련이 있기 때문에 중요하다.⁵⁾ 이러한 지역해 탐색은 단일방법 알고리즘의 접근법과 유사한데, 단일방법 알고리즘 계열에서는 K 의 길이를 3, 2, 1로 순차적으로 사용한 선행연구가 있다. 이 때 K 의 길이가 2 이상이 될 경우, 전체 연산 중 10%에서만 교환이 일어난다고 알려져 있다[33]. 이는 K 의 길이가 1인 경우와 비교해 보았을 때, K 가 2와 3인 경우는 해의 개선이 일어나는 횟수 대비 필요 연산량이 상대적으로 많다고 볼 수 있다. 때문에 본 연구에서는 K 를 2와 1로 제한시키도록 한다.

5) 모집단의 개수가 P 이고, 각 해의 전체 고객의 수가 N 인 알고리즘에 본 논문에서 제시한 지역해 탐색을 적용한다고 해보자. 이때 지역해 탐색이 길이가 상이한 블록 길이 K 개에 대해 수행된다고 하면, 지역해 탐색 알고리즘은 개별 블록길이 k 에 대해 N^2P/k 의 계산복잡도를 가진다.

5. 실험

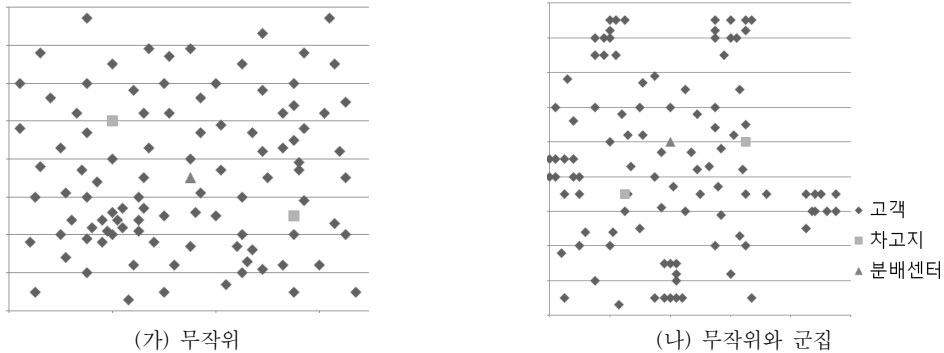
5.1 실험 데이터

실험 데이터는 VRPTW 문제에 자주 사용되는 Solomon(1987)의 데이터 셋을 사용하도록 하였다 [42]. Solomon 입력예제는 100개의 고객 노드와 1개의 창고, 각 고객들의 희망배송 시간대와 무게정보로 이루어져 있다. 또한 각 고객들의 위치 생성에 있어서 (가) 무작위로 생성되었는지, (나) 무작위와 군집이 동시에 적용되었는지에 따라 두 가지 유형으로 나뉜다[그림 8]. 더불어 본 연구에서는 해당 데이터 셋에 2개의 차고지를 임의로 추가하였다.

5.2 실험 결과

실험은 두 가지 형태의 고객 분포, 즉 무작위 그리고 무작위와 군집 계열의 데이터 셋을 대상으로 실시하였다. 무작위는 [그림 8]의 (가)와 같이 고객들이 무작위로 존재하는 데이터 셋이며, 무작위와 군집은 [그림 8]의 (나)와 같이 일부 고객들은 군집을 이루고 일부는 무작위로 분포되어 있는 형태의 데이터 셋이다. 일반적으로 물류기업의 성과지표는 고객들을 서비스하기 위해 필요한 총 운영비용과 고객들이 희망하는 시간에 서비스를 받는지에 관련된 정시 도착률, 두 가지 개념을 중심으로 구성되어 있다. 과거에는 총 운영비용을 최소화로 하는 일정계획이 선호되었다면, 근래에는 고객 경험이 강조됨에 따라 배송물의 정시 도착률을 높임으로서 고객 경험에서 경쟁우위를 확보하고자 하는 방향으로 운영 목표가 변화하고 있다[4]. 또한 평상시에는 총 운영비용 중심의 배송 네트워크를 운영하더라도, 특정한 시점이나 사건에 대처하기 위해서는 정시 도착률 중심의 배송 네트워크로의 일시적인 전환이 필요할 수 있다[7, 48].

본 연구에서는 시간비용 최소화 모형 (모형 1), 운행비용 최소화 모형 (모형 2), 그리고 시간비용과 운행비용을 동시에 최소화시키는 모형 (모형 3)으로 나누어 실험을 진행하고, 각각의 경우에서 차량만을 사용하



[그림 8] Solomon 데이터 셋(1987) 분포도

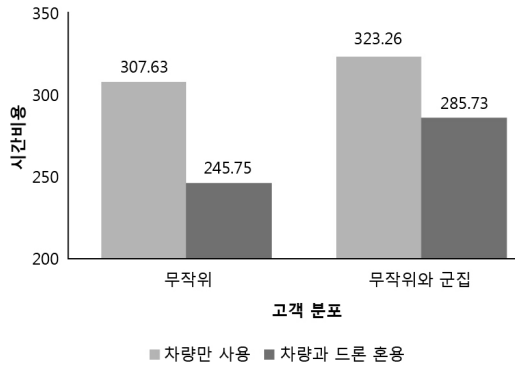
는 배송 네트워크와 차량과 드론을 같이 사용하는 배송 네트워크의 비용적인 측면을 비교 분석하였다.

5.2.1 시간비용 최소화 모형(모형 1)과 운행비용 최소화 모형(모형 2)

고객의 분포와는 무관하게 두 데이터 셋 모두에서 시간비용 최소화 모형 1과 운행비용 최소화 모형 2를 통해 드론을 혼용하는 방식이 차량만을 사용하는 방식과 비교하였을 때, 고정비를 유사한 수준으로 유지시키면서, 더 낮은 운행비와 시간비용을 보이면서 경쟁력을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

시간비용 최소화 전략: 시간비용은 서비스를 정시에 받지 못한 고객에 대해, 고객의 희망배송 시간대를 넘어가는 정도에 비례해서 계산된다. 시간비용을 최소화하는 것은 고객들의 불만족 정도를 최소화하는 것이며, 서비스의 수준에 대한 관심이 높아지는 근래의 물류시장에서는 중요한 지표라고 할 수 있다. [그림 9]는 시간비용을 최소화 시키는 모형 1을 통해 도출된, 시간비용을 보여준다. 시간비용이 작다는 것은 고객들에게 배송하는 과정에서 고객들의 희망배송 시간대를 상대적으로 적게 위반하였다는 의미이다. <표 1>을 보면, 고객들의 지리적인 분포에 따라 상대적 차이를 보여주는 하지만, 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 시간비용이 적음을 확인할 수 있다. 무작위 고객 분포의 차량만을 사용하는 배송 네트워크는 차량과 드론을 혼용한 배송 네트워크에 비해 34% 더 많은 시간비용을, 고객 분포가 무작위와 군집의 형태

를 보이는 경우에는 38% 더 많은 시간비용을 발생시켰다. 또한, 운행비용과 고정비를 고려하더라도, 고객 분포와 관계없이 드론을 혼용하는 것이 차량만을 사용하는 것보다 경쟁력이 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 9] 모형 1에 따른 배송 네트워크의 시간 비용 평균

전체 고객 중 정시 배송이나 빠른 배송을 받은 고객들의 비율인 정시 도착률을 살펴보면, 고객들이 무작위로 분포되어 있는 경우에는 차량만을 사용하는 배송 네트워크가 39.9%의 정시 도착률을 보였고, 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 경우에는 34.5%의 정시 도착률을 보였다. 또한 고객들이 무작위와 군집을 이루고 분포되어 있는 경우 차량만을 사용하는 배송 네트워크가 52.9%, 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 경우 42.4%의 정시 도착률을 보였다. 정시 도착률의 시각에서는 고객들의 분포와 상관 없이 차량만을 사용하는 배송 네트워크가 미비한 수준이지만 더 효과적임

〈표 1〉 모형 1에 따른 배송 네트워크 해 정보

고객들 분포	배송 네트워크 종류	라우트 비용	시간 비용	고정 비용	정시 도착 (%)	조기도착 (%)	지연도착 (%)	빠른배송 (%)	1인당 서비스 비용	불만족 고객 1인당 비용
무작위	차량만 사용	7649.46	307.63	4284	23.30	30.98	30.03	15.69	122.41	5.04
	차량과 드론 혼용	6746.58	245.75	4620	20.61	41.49	23.97	13.93	116.12	3.75
무작위와 군집	차량만 사용	9783.57	323.26	5604	34.01	23.03	24.00	18.96	157.11	6.87
	차량과 드론 혼용	7174.51	285.73	5036	25.19	23.72	34.04	17.05	124.96	4.95

〈표 2〉 모형 2에 따른 배송 네트워크 해 정보

고객들 분포	배송 네트워크 종류	라우트 비용	시간 비용	고정 비용	정시 도착 (%)	조기 도착 (%)	지연 도착 (%)	빠른 배송 (%)	1인당 서비스 비용	불만족 고객 1인당 비용
무작위	차량만 사용	7721.13	365.46	4836	18.28	34.07	32.27	15.38	129.23	5.51
	차량과 드론 혼용	6247.40	294.93	4472	21.40	35.57	25.06	17.97	110.14	4.86
무작위와 군집	차량만 사용	8652.86	349.34	5148	31.42	24.32	28.28	15.98	141.50	6.64
	차량과 드론 혼용	6582.87	313.86	4740	31.11	27.00	15.86	26.03	116.37	7.32

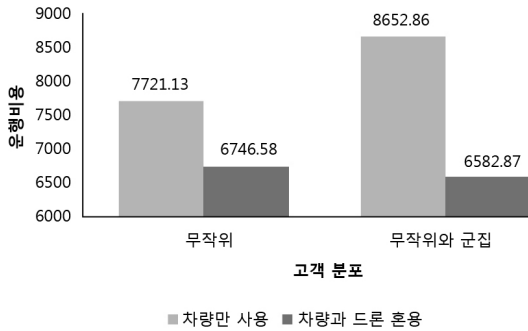
을 확인하였다. 이러한 결과는 드론의 빠른 이동속도로 인해서 조기에 서비스를 받는 고객이 증가하기 때문이라고 해석할 수 있는데, 이는 무작위 고객 분포에 있어서, 드론을 혼용한 배송 네트워크가 조기 배송한 고객의 수가 차량만을 사용한 경우보다 월등히 높다는 것에서 확인할 수 있었다. 또한 ‘불만족 고객 1인당 비용’을 고려해보면, 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 가지는 경제적 효용성이 더 크다고 결론지을 수 있겠다.

일부 고객들이 군집을 이루고 있는 무작위와 군집 데이터 셋의 경우, 모든 고객이 무작위로 분포되어 있는 경우에 비해 시간비용이 작게 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 군집을 형성하는 고객들의 희망시간대가 상이할 경우, 그 군집 지역을 여러 번 방문해야 하는 상황이 발생하기 때문이다. 또한 일반적으로 군집 분포에서 효과적으로 알려져 있는 차량의 밀크런 운행방식이 시간 비용을 최소화하는 모형에서는 그 효과성이 감소되기 때문이라고 해석할 수 있다.

운행비용 최소화 전략: 고객들의 지리적인 분포가 무작위로 있는 데이터 셋과 고객들이 군집을 이루는 데이터 셋 모두에서 드론을 혼용하는 것이 차량만

을 사용하는 경우보다 더 적은 운행비용과 고정비용을 보인다. 고객의 분포가 무작위인 경우 운행에 필요한 운송수단의 측면에서는 차량만 사용하는 배송 네트워크보다 차량과 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 고정비 측면에서는 8% 정도 드론을 혼용하는 것이 우위에 있다. 고객들이 무작위와 군집으로 분포되어 있는 경우에는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 사용하는 배송 네트워크에 비해 31% 더 낮은 운행비용을 보이고 있다. 또한 운행에 필요한 운송수단의 측면에서는 차량만 사용하는 배송 네트워크(차량 4.29대)보다 차량과 드론을 혼용하는 배송 네트워크(차량 3.28대, 드론 2.01대)가 고정비적인 측면에서는 8% 정도 드론을 혼용하는 것이 우위에 있다.

운행비용을 최소화 하는 모형 2에서도 무작위와 군집 데이터 셋의 경우 무작위 데이터 셋에 비해 전체 운행이용이 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다([그림 10] 참조). 고객이 군집을 이루고 있는 경우, 고객과 차고지 사이를 반복 운행하는 드론의 이동 거리가 군집 지역의 위치에 따라 더 많이 증가할 수 있기 때문이라고 해석할 수 있다.



[그림 10] 모형 2에 따른 배송 네트워크의 운영 비용 평균

흥미있는 사실은 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 경우에 운영비용을 최소화하는 모형 2가 시간비용을 최소화하는 모형 1에 비해서 더 높은 수준의 정시 도착률을 가지는 해들을 도출한다는 점이다. 모형 2의 드론과 차량을 혼용하는 배송 네트워크는 모형 1의 경우와 비교하였을 때도 더 높은 수준의 정시 도착률을 보이고 있다. 이는 정시 도착률과 시간비용 사이에는 비례 관계가 있음을 알 수 있는 부분이다. [그림 11]은 모형 1과 모형 2의 각 해들을 정시 도착률과 불만족 고객 1인당 시간비용을 축으로 하는 2차원 좌표계 상에서 표현한 것이다. 또한 선형추정을 한 것을 보면, 정시 도착률을 높이려면, 상대적으로 불만족 고객에 대해서 더 많은 수준의 희망배송 시간대를 벗어난 배송을 하는 것을 피할 수 없다는 것을 보여준다.

5.2.2 시간비용과 운영비용을 동시에 최소화시키는 모형(모형 3)

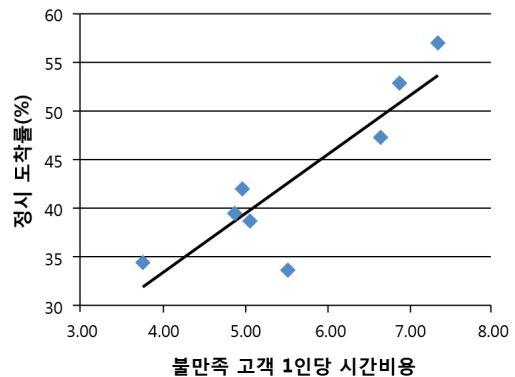
시간비용과 운영비용을 동시에 최소화시키는 모형에서도 또한 드론을 혼용하는 것이 운영비용과 시간비용에 있어서 고객들의 분포와 무관하게 모두 더 좋은 결과를 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다.

고객들이 무작위를 이루어 분포되어 있는 데이터셋의 경우에는 차량 4.48대가 필요하였으며, 드론을 혼용하는 경우에는 차량 2대와 드론 3대가 필요하였다. 무작위와 군집 분포를 보이는 경우에서 차량만을 사용하는 경우에는 차량 3.85대가 필요하였고, 드론을 혼용하는 경우에는 차량 3.51대와 드론 1대가 필요

하였다. 이 경우에는 고정비상으로는 드론을 혼용하는 것이 차량만을 사용하는 경우보다 비용적인 우위를 보인다.

근래에 물류산업에서는 고객들의 ‘운영비용을 최소화’ 하려는 전략에서 체감서비스 수준인 ‘정시 도착률 최대화’로 관심이 옮겨가고 있다. 때문에 우리는 운영비용과 ‘고객들의 불만족 체감수준’을 나타내는 시간비용을 동시에 최소화시키는 모형 3을 통해 정시 도착률을 최대화 하는 해들과 운영비용을 최소화로 가지는 값들을 비교해 보고자 한다.

우선 운영비용을 최소화하는 상위 10%의 해를 보자. 고객들의 지리적인 분포가 무작위로 있는 데이터셋을 보면, 고객들이 군집을 이루는 경우와 달리 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 사용하는 배송 네트워크에 비해 더 낮은 총 운영비용과 더 높은 정시 도착률을 보인다(<표 3> 참고). 고객 1인당 비용측면에서는 드론을 혼용하는 방식이 30% 더 낮은 비용을 보인다. 특히 드론을 혼용하는 것이 차량만을 사용하는 것에 비하여 더 낮은 수준의 정시 도착률을 보였지만, 희망 배송 시간대를 벗어난 고객의 불만족 정도를 나타내는 ‘불만족 고객 1인당 시간비용’에서 더 낮은 값을 보이고 있다는 것은 드론의 사용이 경쟁력을 가지는 부분이 될 수 있다. 운영에 필요한 운송수단의 측면에서는 차량과 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 2대 더 적은 수의 차량과 3대의 추가적인 드론을 필요로 하였다. 드론보다 3배 정도 높은 차량



[그림 11] 불만족 고객 1인당 시간 비용과 정시 도착률의 관계

의 고정비를 고려하면, 고정비적인 측면에서는 약 33% 정도 드론을 혼용하는 것이 우위에 있다.

고객들이 무작위와 군집으로 분포되어 있는 경우에는 운행비적인 우위가 약해지는 것을 볼 수 있다. 이동비용의 차량과 드론을 혼용하는 경우가 차량만을 사용하는 경우보다 15% 낮은 비용을 보인다. 시간비용은 서비스를 받은 고객들 중 본인의 희망배송 시간대를 벗어난 정도에 비례하여 계산되기 때문에, 시간비용이 높다는 것은 정시에 배송 받지 못한 고객들의 체감 불만족 정도가 높다는 것을 의미한다. 때문에 정시 도착률이 높다고 하여 일방적인 우위에 있다고 판단하기 보다는 정시 도착률과 시간비용을 같이 고려하는 것이 더 합리적인 선택을 가져올 수 있다.

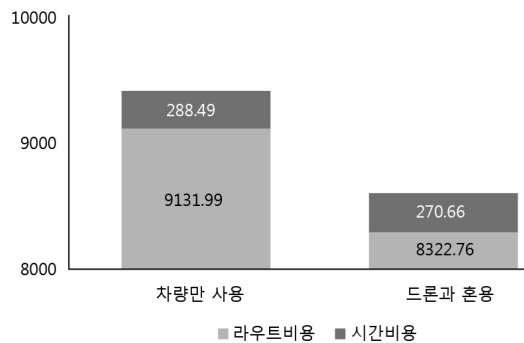
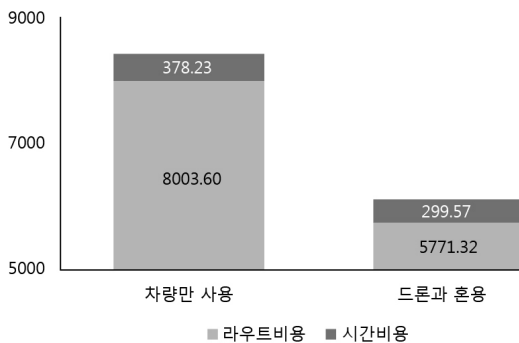
전체적인 시각에서는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 4% 더 낮은 비용과 14% 더 높은 수준의 정시 도착률을 보였다. 운행에 필요한 운송수단의 대수 관점에서는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 사용하는 배송 네트워크와 같은 수의 차량을 사용하였고, 한 대의 드론을 추가적으로 사용함으로써, 고정비 상으로는 10% 정도를 더 필요로 한다.

고객들의 정시 도착률을 최대화로 하는 상위 10%의 해들을 보면, 고객들의 분포가 무작위를 보이는 데이터 셋의 경우에는 운행비용에 있어서, 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 우위가 고객들이 군집과 무작위를 이루는 데이터 셋에 비해서 강하게 나타나고 있다. 이 경우에는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가

차량만을 혼용하는 경우보다 40% 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 이용하는 배송 네트워크보다 2% 더 낮은 정시 도착률을 보이지만, 불만족 고객의 체감 불만족 정도를 나타내는 지표인 ‘불만족 고객 1인당 시간비용’이 차량만을 사용하는 것보다 34% 낮게 발생함으로써 드론을 혼용하는 것이 경쟁력을 가질 수 있다.

고객들이 무작위와 군집을 이루어 생성되어 있는 데이터 셋의 경우 드론을 혼용하는 것이 차량만을 사용하는 경우보다 12% 더 높은 정시 도착률을 보이고 있다. 또한 이 경우에 고객 1인당 비용적인 측면에서는 드론이 차량보다 7% 더 낮은 비용을 보이는 것을 볼 수 있다. 또한 필요한 운송수단의 경우에는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 사용하는 네트워크보다 비용적으로 더 많은 3% 정도 더 많은 비용을 필요로 한다.

총비용적인 시각에서 보았을 때, 고객들의 위치가 무작위 혹은 무작위와 군집이 혼합된 형태로 분포되어 있는 경우 모두에서는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 우위에 있음을 확인할 수 있다. 고객들이 무작위로 분포되어 있는 경우에는 드론의 사용이 총 운행비용적인 측면에서 강한우위를 보이고 있으며, 정시 도착률 있어서는 차량만을 사용하는 경우보다 다소 낮지만, 불만족 고객들의 1인당 불만족 수준을 더 낮게 만든다는 점은 드론의 경쟁력을 상승시키는 요인이다. 고객들이 무작위와 군집을 동시에 보이는 데



[그림 12] 총비용을 최소화하는 모형(모형 3)

〈표 3〉 최소비용을 도출한 상위 10%의 해의 평균 값

고객 분포유형	배송 네트워크	운행비용	시간비용	고정비	차량대수	드론대수	정시에 서비스 받은 고객 수 (명)	조기에 서비스 받은 고객 수 (명)	지연 서비스 받은 고객 수 (명)	빠른 서비스를 받은 고객 수 (명)	정시 도착률 (%)	고객 1인당 서비스 비용	불만족 고객 1인당 시간비용
무작위	차량만	7509.92	335.8	4800	4	0	21.2	35.5	26	17.3	38.5	126.46	5.46
	드론 혼용	5712	296.25	3600	2	3	21.9	37.9	26.3	13.9	35.8	96.08	4.61
무작위와 군집	차량만	8240.24	215.99	3600	3	0	27.6	20.1	32.2	20.1	47.7	120.56	4.13
	드론 혼용	7648.24	180.18	4000	3	1	30.2	32.4	13	24.4	54.6	118.28	3.97

〈표 4〉 최대 정시 도착률을 도출한 상위 10%의 해들의 평균값

고객 분포유형	배송 네트워크	운행비용	시간비용	고정비	차량대수	드론대수	정시에 서비스 받은 고객 수 (명)	조기에 서비스 받은 고객 수 (명)	지연 서비스 받은 고객 수 (명)	빠른 서비스를 받은 고객 수 (명)	정시 도착률 (%)	고객 1인당 서비스 비용	불만족 고객 1인당 시간비용
무작위	차량만	8002.24	385.27	5520	46	0	22	34.9	25.4	17.7	39.7	139.08	6.39
	드론 혼용	5712	297.32	3600	2	3	23.4	36.8	25.9	13.9	37.3	96.09	4.74
무작위와 군집	차량만	9524.08	277.32	4800	4	0	30.8	20.3	28.4	20.5	51.3	146.01	5.69
	드론 혼용	8404.08	235.91	5080	3.9	1	33.2	30.7	11.3	24.8	58	137.2	5.62

〈표 5〉 총비용 최소화에서 고객 정시 도착률 최대화로의 전략 변경 시 필요한 추가 자원

고객 분포 유형	배송 네트워크	운영비용	시간비용	고정비	차량 대수	드론대수	정시 도착률 (%)	고객 1인당 서비스 비용
무작위	드론 혼용	0	1.07	0	0	0	1.5%	0%
	차량만	492.32	49.47	720	0.15	해당없음	1.2%	10%
무작위와 균집	드론 혼용	755.84	42.73	1080	0.30	0	3.4%	16%
	차량만	1283.84	61.33	1200	0.33	해당없음	3.6%	21%

이터 셋의 경우에는 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 사용하는 경우에 비하여 정시 도착률이 더 우수함을 확인할 수 있었다.

5.2.3 총비용 최소화에서 고객 정시 도착률 최대화로의 전략 변경 시 필요한 추가 자원

총 운용비용 중심에서 정시 도착률 최대화로의 배송 네트워크 운영전략을 전환을 위해 추가적으로 필요한 전환비용을 고려한 논의를 진행하고자 한다.

소비자들이 더 높은 수준의 물류서비스를 원함에 따라, 물류기업은 총비용의 최소화뿐 아니라 고객들의 정시 도착률을 최대화할 수 있는 배송 네트워크에 대한 관심을 가진다. 이는 모형 3의 결과를 비용중심으로 보았던 경우와 정시 도착률을 중심으로 보았던 것과 유사한 상황이다. 〈표 5〉는 운영비용 최소화에서 정시 도착률 최대화로 운영전략을 바꾸는 과정에 있어 필요한 추가적인 자원을 보여준다.

드론을 혼용하는 배송 네트워크의 경우에는 모든 데이터 셋에서 고정비적인 측면에서 우위를 보이고 있다(〈표 5〉 참조). 고객들이 무작위로 분포되어 있는 경우에는 차량만을 사용하는 경우에만 0.15대의 차량을 추가적으로 필요로 하였다. 고객들이 무작위와 균집을 이루고 있는 데이터 셋의 경우에는 드론을 혼용하는 경우에 0.33대의 차량을 추가적으로 필요로 하였고, 차량만을 사용하는 경우에는 0.34대의 차량을 추가적으로 필요로 하였다. 추가적으로 필요한 자원에 있어서 차량과 드론은 중요한 차이점을 가지고 있는데, 드론의 경우에는 잠재적인 유희비용이 없다는 점이다. 더불어 드론은 차량과는 달리 새로운 지역에 있어서의 효율도 저하문제가 일어나지 않기

때문에, 배송 네트워크 전체적인 시각에서 보았을 때는 특정 지역의 유희 드론을 다른 지역으로 쉽게 이전시킬 수 있다.

반면 차량의 경우에는 특정 지역에서 근무할수록 숙련도가 증가하고, 이러한 숙련도는 다른 지역으로 근무지가 이동될 경우에는 상실된다. 드론은 이러한 학습된 숙련도가 적용되지 않기 때문에 다른 지역에서 운행되더라도 동일한 수준의 숙련도를 발휘할 수 있다. 때문에 운영관리자는 유희 드론이 발생하더라도, 복수의 배송망을 고려하여 다른 배송 네트워크로 유희 드론을 이동 배치함으로써 시스템 전체적인 시각에서 더 유연한 일정계획을 세울 수 있다. 이는 시간에 따라 큰 물동량의 차이를 보이는 물류 네트워크의 특징을 고려할 때, 드론 사용이 제공하는 장점이라 할 수 있다. 종합하면, 드론을 혼용하는 배송 네트워크는 차량만을 단독으로 사용하는 배송 네트워크에 비해 정시 도착률과 비용적인 측면에서의 우위를 가질 뿐 아니라, 거시적인 일정계획의 유연성이 있어서도 우위를 지닌다고 할 수 있겠다.

6. 결 론

우리는 VRPTW 문제 풀이에 있어서 대표적인 Solomon(1987)의 데이터 셋을 대상으로 드론과 차량을 혼용하는 배송 네트워크와 차량만을 운용하는 배송 네트워크의 일정계획을 비교해 보았다. 이를 통해 고객들의 분포가 무작위에 가까울수록, 드론을 혼용하는 배송 네트워크가 차량만을 단독으로 사용하는 배송 네트워크에 비해 우위를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 드론을 혼용하는 배송 네트워크가

차량만을 운용하는 배송 네트워크에 비해서 더 유연하다는 점은 드론을 사용하는 배송 네트워크의 장점이라고 판단된다.

고객들의 위치가 지리적으로 좁은 구역에 밀집되어 있는 경우에는 드론의 점대점 운행방식이 차량에 비해 드론의 이동거리를 다른 데이터 셋에 비해 많이 증가시켜서, 드론의 낮은 단위당 운행비용을 감안하더라도, 드론 운행의 비효율성으로 인해 차량에 비해 확실한 우위를 점하기 힘들다는 것을 확인하였다. 고객들이 무작위와 무작위와 군집으로 분포되어 있는 경우에는 운행비용적인 측면과 시간비용적인 측면 모두에서 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 우위를 확인 할 수 있었다. 더불어 드론의 사용이 정시나 빠른 배송을 받지 못한 고객들의 체감 불만족 수준을 낮춰 줄 수 있다는 점은 드론의 유용성을 평가하는 새로운 요소가 될 수 있다. 실제로 빠른 시간 내에 배송을 원하는 고객들의 수요가 증가함에 따라 재보충주기가 짧은 드론을 혼용하는 배송 네트워크의 잠재성이 계속 증가하고 있다.

향후 연구에서는 총비용의 최소화뿐만 아니라 다른 요소를 반영할 수 있는 다목적성에 대한 접근이 필요할 것이다. 정시 도착률, 운행에 필요한 드론이나 차량의 대수가 추가적으로 고려됨으로써, 물류기업이나 이해관계자들에게 드론 도입에 대한 더 상세한 정보를 줄 수 있을 것이다. 또한 실제 데이터를 사용해봄으로써, 고객들의 수요가 지리적으로 어떠한 특징을 지니고 있는지, 혹은 고객들의 희망배송 시간대가 배송 네트워크의 운영시간 중 어느 부분에 집중되어 있는지를 문제 상황에 반영함으로써, 더 현실성 있는 결과를 도출할 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 석상문, “네트워크 문제를 위한 새로운 진화 알고리즘에 대하여”, 『한국경영과학회지』, 제32권, 제2호(2007), pp.109-121.
- [2] 윤영수, “적응형 유전알고리즘의 실험적 비교”, 『한국경영과학회지』, 제32권, 제4호(2007), pp.1-18.
- [3] 이상현, 이승원, “시간제약이 있는 차량경로문제에 대한 개미군집 시스템 해법”, 『한국경영과학회지』, 제34권, 제1호(2009), pp.153-165.
- [4] “택배 서비스의 핵심 지표: 고객은 ‘당일 배송’을 원한다(?)”, CLO 2015년 4월호 통권 59호, pp.71-73.
- [5] 서울시, 『2014년 서울시 차량통행속도 보고서』, pp.11-13, 2015.
- [6] Agatz, N., P. Bouman, and M. Schmidt, “Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone,” *ERIM Report Series Reference*, No. ERS-2015-011-LIS., 2015.
- [7] Anand, N., H. Quak, R. van Duin, and L. Tavasszy, “City logistics modeling efforts: Trends and gaps-A review,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol.39(2012), pp.101-115.
- [8] Berger, J. and M. Barkaoui, “A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows,” *Computers & Operations Research*, Vol.31, No.12(2004), pp.2037-2053.
- [9] Blanton, Jr, J.L. and R.L. Wainwright, “Multiple vehicle routing with time and capacity constraints using genetic algorithms,” *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, pp.452-459, Morgan Kaufmann Publishers Inc. (1993, June).
- [10] Bräysy, O. and M. Gendreau, “Tabu search heuristics for the vehicle routing problem with time windows,” Vol.10, No.2(2002), pp.211-237.
- [11] Bräysy, O., “A reactive variable neighborhood search for the vehicle-routing problem with time windows,” *INFORMS Journal on Computing*, Vol.15, No.4(2003), pp.347-368.
- [12] Braysy, O., “Fast local searches for the vehicle routing problem with time windows,”

- INFOR*, Vol.40, No.4(2002), pp.319-330.
- [13] Bräysy, O., W. Dullaert, and M. Gendreau, "Evolutionary algorithms for the vehicle routing problem with time windows," *Journal of Heuristics*, Vol.10, No.6(2004), pp.587-611.
- [14] Bryan, V., Drone delivery: DHL 'parcelcopter' flies to German isle <http://www.reuters.com/article/us-deutsche-post-drones-idUSKCN0HJ1ED20140924>, 2014.
- [15] Burke, E.K. and J.P. Newall, "A multistage evolutionary algorithm for the timetable problem," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol.3, No.1(1999), pp.63-74.
- [16] Carter, A.E. and C.T. Ragsdale, "A new approach to solving the multiple traveling salesman problem using genetic algorithms," *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, No.1(2006), pp.246-257.
- [17] Chaovalitwongse, W., D. Kim, and P.M. Pardalos, "GRASP with a new local search scheme for vehicle routing problems with time windows," *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol.7, No.2(2003), pp.179-207.
- [18] Chiang, W.C. and R.A. Russell, "A reactive tabu search metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows," *INFORMS Journal on Computing*, Vol.9, No.4(1997), pp.417-430.
- [19] Chiang, W.C. and R.A. Russell, "Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows," *Annals of Operations Research*, Vol.63, No.1(1996), pp.3-27.
- [20] Colin Lewis, *Is package delivery using drones feasible?* RobotEconomics, 2014.(Lewis, 2014b).
- [21] Colin Lewis, *The economics of Amazon's delivery drones*, RobotEconomics, 2014.(Lewis, 2014a).
- [22] Cordeau, J.F., M.M. Gendreau, and G. Laporte, "A tabu search heuristic for periodic and multi depot vehicle routing problems," *Networks*, Vol.30, No.2(1997), pp.105-119.
- [23] Cordeau, J.F., G. Laporte, and A. Mercier, "A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.52, No.8(2001), pp.928-936.
- [24] Czech, Z.J. and P. Czarnas, "Parallel Simulated Annealing for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *PDP*, 2002, p.0376 IEEE.
- [25] Davis, L., "Applying adaptive algorithms to epistatic domains," *IJCAI*, Vol.85(1985), pp.162-164.
- [26] Falkenauer, E., *Genetic algorithms and grouping problems*, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [27] Glover, F., "Ejection chains, reference structures and alternating path methods for traveling salesman problems," *Discrete Applied Mathematics*, Vol.65, No.1(1996), pp.223-253.
- [28] Ha, Q.M., Y. Deville, Q.D. Pham, and M.H. Hà, "Heuristic methods for the Traveling Salesman Problem with Drone," *arXiv preprint arXiv:1509.08764*, 2015.
- [29] Ha, Q.M., Y. Deville, Q.D. Pham, and M.H. Hà, "On the Min-cost Traveling Salesman Problem with Drone," *arXiv preprint arXiv:1512.01503*, 2015.
- [30] Kilby, P., P. Prosser, and P. Shaw, "Guided local search for the vehicle routing problem with time windows," *Meta-Heuristics*, Springer, US, (1999), pp.473-486.
- [31] Laporte, G., Y. Nobert, and D. Arpin, "Optimal solutions to capacitated multi-depot vehicle

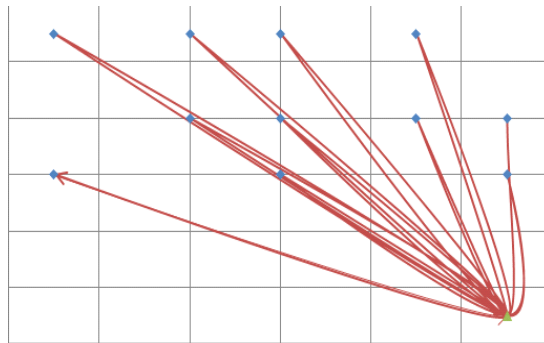
- routing problems,” Université de Montréal, Centre de recherche sur les transports, 1984.
- [32] Laporte, G., Y. Nobert, and S. Taillefer, “Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems,” *Transportation Science*, Vol.22, No.3(1988), pp.161-172.
- [33] Lin, S., “Computer solutions of the traveling salesman problem,” *Bell System Technical Journal*, Vol.44(1965), pp.2245-2269.
- [34] Louis, S.J., X. Yin, and Z.Y. Yuan, “Multiple vehicle routing with time windows using genetic algorithms,” *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on Vol.3(1999)*, IEEE.
- [35] Malmberg, C., “A genetic algorithm for service level based vehicle scheduling,” *European Journal of Operational Research*, Vol.93, No.1(1996), pp.121-134.
- [36] Murray, C.C. and A.G. Chu, “The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.54(2015), pp.86-109.
- [37] Oliver, I.M., D.D. Smith, and J.R. Holland, “Study of permutation crossover operators on the traveling salesman problem,” *Genetic algorithms and their applications: proceedings of the second International Conference on Genetic Algorithms: July 28-31, 1987 at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. Hillsdale, NJ: L. Erlbaum Associates, 1987*.
- [38] Park, Y.B., “A hybrid genetic algorithm for the vehicle scheduling problem with due times and time deadlines,” *International Journal of Productions Economics*, Vol.73, No.2(2001), pp.175-188.
- [39] Renaud, J., F.F. Boctor, and G. Laporte, “An improved petal heuristic for the vehicle routing problem,” *Journal of the Operational Research Society*, Vol.47, No.2(1996), pp.329-336.
- [40] Renaud, J., G. Laporte, and F.F. Boctor, “A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem,” *Computers & Operations Research*, Vol.23, No.3(1996), pp.229-235.
- [41] Rose, C., “Amazon’s Jeff Bezos looks to the future,” *D. Mihailovich (Producer)*, (2013.), p.60.
- [42] Solomon, M.M., “Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints,” *Operations research*, Vol.35, No.2(1987), pp.254-265.
- [43] Starkweather, T., S. McDaniel, K.E. Mathias, L.D. Whitley, and C. Whitley, “A Comparison of Genetic Sequencing Operators,” *In ICGA (1991, July)* pp.69-76.
- [44] Syswerda, G., “Schedule optimization using genetic algorithms,” *Handbook of genetic algorithms*, 1991.
- [45] Taillard, É., P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin, and J.Y. Potvin, “A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows,” *Transportation science*, Vol.31, No.2(1997), pp.170-186.
- [46] Tan, K.C., Y.H. Chew, and L.H. Lee, “A hybrid multiobjective evolutionary algorithm for solving vehicle routing problem with time windows,” *Computational Optimization and Applications*, Vol.34, No.1(2006), pp.115-151.
- [47] Tang, L., J. Liu, A. Rong, and Z. Yang, “A multiple traveling salesman problem model for hot rolling schedule in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex,” *European Journal of Operational Research*, Vol.124, No.2(2000),

- p.267.
- [48] Taniguchi, E. and R.G. Thompson, "City Logistics Network Modelling and Intelligent Transport Systems," *Emerald*, United Kingdom, 2011.
- [49] Whitley, L.D., T. Starkweather, and D. Fuquay, "Scheduling problems and traveling salesmen: The genetic edge recombination operator," *In ICGA*, Vol.89(1989), pp.133-140.
- [50] Zhang, M., D. Jiang, and X. Tang, "Full load vehicle routing with multiple depots: New network flow based algorithm," *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, Vol.6(2002), pp.216-220.

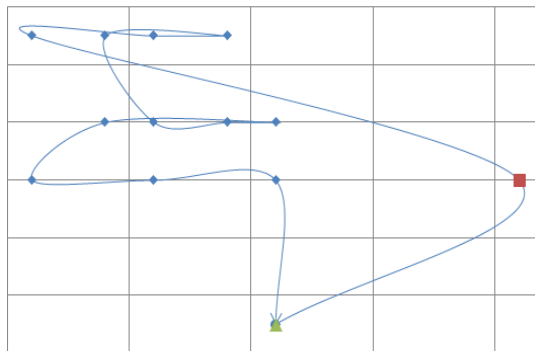
〈부 록〉

[참고 1] 고객들의 분포가 균집인 데이터 셋에서 드론과 차량의 운행 비교

작은 크기의 해에 대해서는 정확해법을 사용하는 것이 가능하기 때문에, 고객들의 지리적인 분포가 균집을 이루고 있는 데이터 셋의 일부분에 대하여, 정확해법을 사용한 차량의 해와 드론의 해를 비교해 보고자 한다. 대상이 되는 Solomin(1987)의 C105의 차고지와 고객 1개를 가지는 해이다. [(고객 Solomon 데이터 셋 C105의 번호 20~30인 11명의 고객과 번호 0인 분배센터, 추가된 차고지 x, y 좌표(30, 45)]



[그림 1] 드론을 사용하는 경우의 정확해



[그림 2] 차량을 이용한 경우의 정확해

정확해법으로 드론과 차량의 운행거리를 비교해보면, 차량의 경우에는 89를 이동하였으며, 드론의 경우에는 387을 이동했음을 알 수 있다. 차량의 최적고객 방문 순서는 [30, 26, 23, 28, 25, 22, 21, 27, 29, 24, 20]였고, 드론의 경우에는 [24, 20, 25, 27, 29, 30, 28, 26, 23, 22, 21]이다. 이때 차량의 시간비용은 51.6이고, 드론의 시간비용은 12.7이었다. 즉 우리는 단순한 이동거리의 측면에서 본다면, 고객들이 밀집되어 있는 경우에는 드론이 4.3배 정도 더 긴 이동거리를 가지고 있음을 알 수 있다. 다만 고객들의 적시배송과 관련된 시간비용에 있어서는 드론이 여전히 더 우수함을 알 수 있다.