

전기자동차의 드론 배터리 충전을 고려한 친환경 최적 경로 문제

차형주¹, 김동균¹, 은준엽^{2†}, 정태수^{1†}

¹고려대학교 산업경영공학과

²고려대학교 기술경영전문대학원

A Green Vehicle Routing Problem Considering Drone Battery Charging using an Electric Vehicle

Hyungjoo Cha¹, DongKyun Kim¹, Joonyup Eun^{2†}, Taesu Cheong^{1†}

¹School of Industrial Management Engineering, Korea University

²Graduate School of Management of Technology, Korea University

This paper proposes a green vehicle routing problem using a drone where the drone can charge its battery using the electric vehicle. Most of the conventional drone-vehicle collaborative routing problems have an assumption that the battery of a drone is instantly replaced after its delivery. This in turn requires numerous batteries in total, as much as the number of drone launches. However, in this research, we propose a novel routing scheme, where the drone can charge its battery using the electricity of the ground vehicle. Especially, the problem aims to find a route with the lowest total battery consumption, forming an environmental-friendly delivery route. A mixed-integer linear programming model is presented and noticing the complexity, we develop an efficient heuristic algorithm.

Keywords: Green logistics, Rechargeable drone, Electric vehicle routing problem

논문접수일 : 2021.10.05.

심사완료일 : 2021.12.19.

게재확정일 : 2021.12.21.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 2021R1F1A1059302, 2021K2A9A2A06047937).

† Corresponding Author: jeun@korea.ac.kr, tcheong@korea.ac.kr

1. 서론

경제 및 산업의 발달과 함께 많은 삶의 편의성은 증가하였지만, 화석연료의 사용으로 인한 환경오염 및 지구 온난화 현상과 같은 부작용 역시 함께 발생하였다. 환경오염 및 지구 온난화 현상은 이미 전 세계적으로 이슈가 되고 있다. 이를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그중 하나의 방법이 화석연료 대신 배터리를 이용하는 전기차이다. Tesla 사를 필두로 하는 전기차 사업은 친환경 사업의 일환으로 발전하기 시작하였으며, 국내에서도 현대자동차, 기아에서도 전기차를 출시하며 친환경 사업을 이어가고 있다.

이러한 전기차의 사용은 배송 시 차량의 사용이 필수적인 물류업계에서 전 세계적인 친환경 사업에 적합한 방법으로 떠오르고 있다. 물류업계에서의 친환경 사업은 친환경 물류라 불리며 더욱 중요도가 올라가고 있다. 하지만 단순히 전기차의 도입만으로 친환경 물류를 실현할 수는 없다. 전기차와 같은 전기를 사용하는 이동수단은 필수적으로 배터리를 사용하게 된다. 이러한 배터리를 사용하는 것은 화석연료를 사용하는 이전 이동수단에 비해 친환경적이라고 할 수 있다. 그러나 배터리 자체를 생산하고 더 이상 사용할 수 없는 폐배터리를 폐기하는 과정은 친환경과는 거리가 멀다. 배터리 생산에 필요한 광물의 채굴 과정에서는 대기오염 물질이 발생하기도 하며, 엄청난 양의 지하수를 사용하기도 한다. 또한, 국립환경과학원은 폐배터리를 유독 물질로 분류하고 있는 상황이다(B.Kim 2021). 따라서 화석연료를 대체하는 동시에 배터리를 보다 더 효율적으로 활용하여 배터리 자체의 생산과 폐기를 줄이는 것이 친환경 물류를 위해 필수적이다. 따라서 물류업계는 친환경 물류를 위해 기존과는 다르게 배터리를 보다 효율적으로 운용하며 배송을 할 수 있는 방법을 모색할 수밖에 없는 상황이 되었다.

현재 배송업계가 마주한 문제는 이뿐만이 아니다. 또 다른 문제는 전자상거래의 발달로 인해 증가하는 배송 건수와 빠른 배송에 대한 수요이다. 배송업계는 이를 만족하기 위해 다양한 시도를 하고 있다. 쿠팡에서는 ‘로켓배송’을, SSG닷컴, 마켓컬리, 오아시스마켓에서는 ‘새벽 배송’을 통해 고객들의 빠른 배송에 대한 수요를 만족시키기 위해 노력 중이다(Na 2021). 또한, 2019년 발생하여 유행하기 시작한 코로나바이러스감염증-19로 인해서 비대면 배송에 대한 수요도 증가하면서, 하나의 운송수단을 이용하는 기존의 배송 방식으로는 빠른 배송과 비대면 배송 모두를 만족하기에는 한계를 보이고 있다.

물류업계는 이러한 빠른 배송과 비대면 배송 그리고 친환경 물류 모두를 만족할 수 있는 방법으로 배송에 드론을 도입하기 시작하였다. 미국의 Amazon 사, UPS 사에서 준비 중에 있는 ‘드론 배송’은 거의 실현을 앞두고 있다(Kim, 2020). 독일의 DHL 사의 parcelcopter는 동아프리카 지역의 의료물자 조달을 선보였으며, 스카이포트(skyport)를 활용하여 두 마을 사이의 택배 드론의 시범 운용을 하는 등 다양한 행보를 보여주고 있다(Adams, 2016). 또한, 국내에서는 국토교통부에서 드론 택배 사업을 위한 사업등록증을 발급하며 국내에서도 ‘드론 배송’이 실현을 앞두고 있음을 알렸다(K.Kim 2021). 물류업계는 드론을 배송에 사용하면서 기존의 배송보다 빠르면서도 보다 친환경적인 배송이 가능할 것으로 보고 있다.

본 연구는 Murray and Chu(2015)가 제안한 flying sidekick traveling salesman problem(FSTSP)을 확장, 발전시킨 연구이다. FSTSP는 배송을 할 때 차량이 드론을 탑재한 채 이동하며, 배송 중에 드론이 차량에서 이륙하여 고객에게 배송을 수행하고 이륙했던 지역이 아닌 다른 지점으로 이동하여 차량과 합류하는 배송 모형을 의미한다. 이때, 도착시간의 정확한 계산이 중요하며, 드론이 차량과 만나게 되는 경우 배터리가 완충된 배터리로 즉각 교체된다는 가정을 갖고 있다. 저자들은 이와 더불어, 드론이 차량과 별도로 출발지와 가까운 곳에 대해서 반복적으로 배송을 수행하고 나머지 지역은 차량으로 배송을 수행하는 방식인 parallel drone scheduling traveling salesman problem(PDSTSP)를 제안하였다.

FSTSP 문제가 제안된 이후, 다양한 형태의 변형 연구가 진행되었다. 드론-차량 협동 배송에 대한 최근

연구 트렌드는 Macrina et al. (2020)과 Chung(2020)에 의해 자세히 비교분석 되었다. Poikonen and Golden(2020)은 드론이 하나가 아닌 두 고객 이상 방문할 수 있도록 문제를 정의하고 알고리즘을 제시하였다. Kitjacharoenchai(2019)는 차량과 드론의 수를 하나 이상 사용할 수 있도록 하는 수리적 모형을 제시하였으며, 그에 상응하는 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Gonzalez-R(2020)은 드론의 다수 고객 배송 문제를 재정의하고 문제를 풀기위해 담금질기법(Simulated Annealing) 기반의 반복적 탐욕 알고리즘(iterative greedy algorithm)을 새로이 제시하였다. Kuo(2021)은 각 고객에 방문해야 하는 지정된 시간이 정해진 문제를 vehicle routing problem with drones and time windows(VRPTWD)로 정의하였으며 효과적인 이웃해를 찾는 발견적 해법을 제시하였다. Jeong(2019)는 드론에 탑재되는 물건의 무게에 따른 에너지 소모와 함께 무인항공기 비행금지 지역에 대한 고려를 추가로 한 현실적인 연구를 제안하였다. Agatz(2018)에 의해 TSP with Drone(TSP-D)가 제시되었으며, 문제를 해결하는 방법에 있어 혼합정수계획법 문제를 분할하여 해결하는 방안을 제시한 연구는 Vásquez(2021)에서 확인할 수 있다. 또한, Ermağan(2022)는 열생성기법(column generation)을 기반으로 한 드론 경로 문제(drone routing problem, DRP)를 제시하였다. Moshref-Javadi (2020)은 여러 드론을 사용할 때, 차량이 모든 드론의 회수 시간까지 대기함을 고려하며 배송을 수행한다. 해당 연구에서는 최대 대기시간에 대한 증명된 한계값(bound)을 제시하여 알고리즘의 성능을 증명하였다. 나아가 차량은 드론의 이동식 기지(station) 역할만 수행하고 모든 배송은 드론이 수행하는 연구도 존재한다(Carlsson 2018). 저자가 제시한 문제와 같이, 모든 방문을 드론이 수행하는 연구는 드론의 제한된 능력 때문에 배송보다는 항공 감시, 촬영, 재난 상황 대응 등의 영역에서 사용되고 있다 (Yi 2021, Chowdhury 2021, Ribeiro 2021).

앞서 언급한 바와 같이 FSTSP만이 유일한 드론-차량 협동 배송 문제인 것은 아니다. PDSTSP 또한 드론을 활용한 배송을 수행하며 FSTSP와는 다른 특징을 가진다. PDSTSP에서는 거점(depot)을 기준으로 특정 범위 내에 존재하는 고객은 드론이 배송을 담당하며, 해당 지역을 포함한 그 외 고객은 차량으로 방문하는 문제 특성을 가진다. PDSTSP는 FSTSP와 다르게 드론이 특정 순서쌍(i.e., sorties, Murray and Chu(2015))으로 움직이지 않기 때문에 문제의 복잡도는 상대적으로 낮다. Kim and Moon(2018)은 TSP-D 문제의 연장선으로 드론 기지(station)를 사용한 문제를 제안하였다. 해당 연구에서는 차량이 배송만을 수행하는 것이 아닌 드론 기지(station)로 물품을 공급하는 역할도 담당한다. Raj et al.(2021)은 PDSTSP와 관련하여 아크(arc) 기반 수리모형과 두 가지의 입지선정문제(set covering problem) 기반 수리모형을 제안하였다. 해당 저자는 드론의 배터리 사용을 고려한 드론 이동 속도를 산정하고 이를 반영하였다. PDSTSP는 단일 차량을 사용하는데, 해당 가정을 완화한 parallel drone scheduling vehicle routing problem(PDSVRP)에 대한 연구도 진행되었다(Nguyen 2021).

전기자동차의 사용이 보편화 되면서 electric vehicle routing problem(EVRP)라 칭해지는 배터리를 사용한 경로 문제가 제시되었으며, Erdoğan and Miller-Hooks(2012)는 해당 문제를 green vehicle routing problem(GVRP)라 정의하였다. Schneider(2014)는 고객을 방문해야 하는 시간대가 정해진 상황을 가정하여 전기 차량이 충전소에서 전기를 충전하며 배송을 진행하는 경로 문제를 제안하였다. 더 나아가, 운송수단이 사용하는 배터리의 전력량을 최소화하고자 하는 목적에서 Macrina et al.(2019)는 차량 군집(vehicle fleet)이 배송을 수행할 때 충전이 가능한 상황에서 차량의 가속과 감속에 대한 에너지 소모량을 고려하고, 그에 대해 가장 친환경적인 경로를 찾는 연구를 제안하였다. Goeke(2015)는 전기자동차와 일반 내연기관 자동차가 혼재한 상황에서 속도와 화물 무게에 의한 에너지 사용을 수리모형에 접목한 연구를 제시한다.

본 연구에서는 이러한 과거 연구 배경을 기반으로 전기로 구동되는 드론이 마찬가지로 전기로 구동되는 트럭의 배터리로 자신의 배터리를 충전하는 동시에 트럭과 드론 모두 최소한의 배터리 소모량으로 배송을 수행하는 협업 배송 모델인 green vehicle routing problem with drone battery charging(GVRP-DC)을 제안한다. GVRP-DC는 주어진 고객들을 모두 1번만 방문하고 돌아오는 외판원문

제(Traveling Salesman Problem, TSP)의 종류로서 TSP 문제가 갖는 모든 가정을 동일하게 적용받는다. 하지만 앞서 언급한 것과 같이 GVRP-DC는 차량과 더불어 전기 드론을 추가로 운용하기 때문에 경로의 형태는 기존의 TSP와는 다르다. 특히, GVRP-DC는 기존의 차량-드론 협업 배송 문제에서 나타나는 경로의 형태와 다른 경우가 존재한다. 기존의 차량-드론 협업 배송에서는 드론의 배터리의 즉각적인 교체를 가정하고 있으며, 배터리 소모를 고려하지 않기 때문에 가능한 최대의 횟수로 드론을 사용할 수 있다. 반면, GVRP-DC에서는 배터리가 차량의 배터리에 의존적이며 특히 배터리의 소모량을 최소화하기 위해 이륙 횟수를 제한하게 하는 등의 경로가 확인된다. 이러한 특성은 아래의 Figure 1을 통해서 확인할 수 있다.

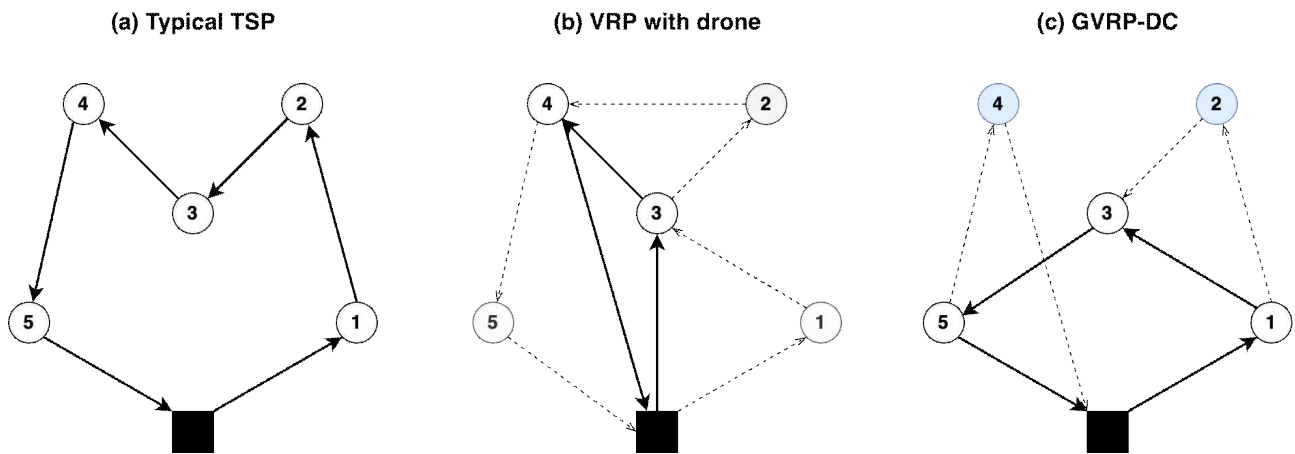


Figure 1. A difference in route shape between typical TSP problem, VRP with drone and GVRP-DC.

드론과 차량의 협동 배송에서 드론의 전력 소모를 비선형함수(nonlinear function)로 표현되는 에너지 함수(energy function)로 정의하여 분지한계법(branch-and-cut)으로 접근한 연구도 존재한다(Cheng 2020). 그러나 대부분의 기존 연구는 일반적으로 충전소를 사용한 재충전 문제를 차량 위주로 다루며, 드론에 관한 대부분의 연구는 배터리의 즉각적인 교체를 가정한다. 즉, 어떠한 운송수단이 다른 운송수단을 연료 공급원으로 사용하는 문제는 존재하지 않으며, 충전소와 같은 운송수단이 아닌 외적 구조물을 사용하여 도움을 받는 형태 위주로 연구되어왔다.

주어진 네트워크에 대하여 GVRP-DC는 전기자동차가 전기 드론을 탑재한 상태에서 물류거점(depot)를 출발하게 된다. 이때 두 운송수단은 협업하며 각각 배달을 수행하고 동시에 출발지로 돌아오는 형태의 경로를 가진다. 여기서 GVRP-DC는 각 운송수단의 배터리의 양이 절대 음수가 되면 안 되는 제약조건을 추가로 갖고 있다. GVRP-DC의 특징적인 성격은 전기 드론의 배터리가 전기자동차 위에 탑재되는 경우, 기존의 배터리 교체방식이 아닌 전기자동차의 배터리를 사용하여 자신의 배터리를 충전하는 방식으로 운용되며 전기자동차와 전기 드론의 배터리 사용 총량을 줄이고자 하기 때문에 상충관계를 고려하게 된다. 이러한 방식은 전체 필요 배터리의 개수가 각 운송수단의 개수, 즉 2개이며 전체 배터리 소모량을 최소화 하는 점에 특징이 있다. 이는 앞에서 언급하였던 것처럼 전기를 사용하는 이동수단은 화석연료를 사용하는 이동수단에 비해 친환경적이지만, 배터리의 생산과 폐기는 그렇지 않다는 점에서 그 중요성을 갖는다. GVRP-DC에서는 이러한 환경 문제를 경로 산출 과정에서 고려하기 위해 일반적인 경로 최적화 문제에서 목적으로 하는 최소 배송 소요시간을 고려한 경로생성이 아닌 최소 전력 소모량을 고려한 경로생성을 목적으로 한다.

GVRP-DC는 이러한 문제점을 반영하여 배터리의 효율적 사용을 도모하면서도 총 배송시간은 줄이는

친환경적 협업배송 모델을 제안하는 것을 목표로 한다. 본 연구의 주요 기여점은 다음과 같다.

- 전기자동차와 전기 드론의 협업배송 모델인 GVRP-DC의 수리모형을 제시한다. GVRP-DC는 전기 드론이 전기자동차를 충전소로 사용하여 충전하는 것을 고려하며, 이는 기존 연구에서 배송 시 배송을 한 드론의 배터리를 바로 교체한다는 가정을 완화한 것이다.
- 주어진 고객 모두에게 배송을 할 때, 최소한의 배터리를 사용하는 친환경적인 경로를 찾고자 한다.
- GVRP-DC의 문제를 해결하기 위한 혼합정수계획법 기반의 수리모형과 메타-휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다. 2장에서는 GVRP-DC를 정의하고 이에 대한 혼합정수계획법 수리모형과 메타-휴리스틱 알고리즘을 자세하게 살펴본다. 3장에서는 잘 알려진 TSP 데이터를 활용하여 수리모형과 메타-휴리스틱 알고리즘의 성능을 검증한다. 마지막으로, 4장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

2. 문제 정의와 제안 해법

본 장에서는 GVRP-DC를 정의하고 혼합정수계획법 기반 수리모형을 제시한다. GVRP-DC는 전기자동차와 전기 드론을 활용한 협동 배송 시스템이다. 두 운송수단은 배송 시작 지점인 거점(depot)을 출발하여 고객들을 방문하고, 다시 출발지인 거점으로 돌아온다. 배송에서 각 고객은 단 하나의 운송수단으로만 배송을 받을 수 있게 된다. 드론은 사전에 정의된 순서쌍(i.e., sorties)으로만 이동 가능하며, 순서쌍은 드론 출발 노드(i), 드론 배송 노드(j), 그리고 드론 도착 노드(k)로 이루어지게 된다. 이때 배송이 실제로 수행되는 노드는 드론 배송 노드(j)이며, 순서쌍의 나머지 노드는 차량으로 방문을 수행해야 한다.

GVRP-DC는 경로를 생성하는 과정에서 각 운송수단의 배터리 잔여량을 추가로 고려하게 된다. 전기자동차와 전기 드론은 각각 배터리를 보유하고 있으며, 전기자동차의 배터리는 전기 드론보다 그 용량이 크다고 가정한다. 또한, 전기 드론은 전기자동차의 배터리로 충전할 수 있음을 가정한다. 이때, 전기 드론이 전기자동차 위에 탑재되는 형태로 있을 때만 충전할 수 있게 되며, 본 연구에서는 충전 과정에서의 에너지 손실은 없음을 가정하였다.

드론은 앞서 언급한 순서쌍을 이동하면서 자기 자신의 배터리를 소모하는데, 이는 전기자동차가 도착하는 거점을 제외한 나머지 노드들에 대해서는 일정량 이상의 배터리를 보유하고 있어야 함을 알 수 있다. 드론의 이동과정에서 두 가지의 추가적인 작업으로 인한 시간이 발생한다. 먼저, 배송할 물품을 드론에 탑재하는 준비시간이 필요하다. 다음으로는 배송작업을 마친 드론을 수거하여 다시 차량에 탑재하는 수거 시간이 필요하다. Murray and Chu(2015)가 제안한 FSTSP 문제에서는 해당 준비시간과 수거 시간에서 배터리 교체시간이 포함되어 있다. 그러나 본 연구에서는 해당 시간이 포함되지 않는다. 이러한 특성을 기반으로 GVRP-DC는 전체 사용 전력을 최소화하는 친환경적 경로를 찾고자 하며, 다음과 같은 가정을 기반으로 한다.

먼저, 전기자동차와 전기 드론은 모든 고객을 방문하여 배송을 수행하며, 모든 고객은 단 하나의 운송수단으로만 배송을 받을 수 있다. 또한, 각 운송수단은 하나의 배터리를 각각 소유한다. 전기 드론은 전기자동차를 활용하여 충전할 수 있으며, 이때 충전량은 거리에 선형적으로 비례하여 산정된다. 각 운송수단의 배터리 소모량 또한 거리에 비례하여 산정된다. 추가적으로 전기 드론은 이동 가능 순서쌍의 마지막인 도착 노드에서만 전기자동차에 탑재될 수 있다. 이 때, 전기 드론은 사전에 정의된 순서쌍으로만 움직일 수 있으며, 하나의 순서쌍을 순회하기 위한 배터리 소요량은 전기 드론이 출발하는 시점에서 가진 배터리의 잔량을 넘을 수 없다. 마지막으로 전기자동차는 출발 거점으로부터 완충된 상태로 출발하며, 배송 중간에 재충전 될 수 없다.

2.1 수리모형

본 절에서는 GVRP-DC가 정의되는 집합, 매개변수 그리고 결정변수를 정의하고 혼합정수계획법 기반 수리모형을 제시한다. GVRP-DC는 무방향 그래프(undirected graph) $G = (N, E)$ 로 정의되고 N 은 전체 노드 집합, E 는 고객 사이의 간선 집합을 의미한다. 집합 N 은 고객 노드 집합 $C = \{1, 2, \dots, c\}$ 와 거점 노드를 출발과 도착 지점으로 복사하여 합한 $\{0, c+1\}$ 의 합집합으로 이루어진다. 수리모형의 정의를 위해 집합 N 을 $N_0 = \{0, 1, 2, 3, \dots, c\}$ 과 $N_+ = \{1, 2, 3, \dots, c+1\}$ 으로 구분할 수 있으며, 해당 집합으로 드론이 이동 가능한 길을 정의하는 순서쌍 $\langle i, j, k \rangle$ 의 집합인 집합 P 를 정의할 수 있다. 집합 P 를 정의하기에 앞서 드론이 방문하여 배송을 수행할 수 있는 고객 집합 C_p 를 사전에 정의할 수 있다.

간선 집합 E 는 $E = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ 로 정의 가능하다. 각 간선은 전기자동차와 전기 드론의 음이 아닌 이동시간이 할당되며 이를 각각 τ_{ij} 와 τ'_{ij} 로 표기한다. W_L 은 전기 드론의 이륙 준비를 위한 시간이며, W_R 은 전기 드론의 차량 탑재를 위한 수거 시간이다. α 는 전기 드론의 배터리 충전율, β 는 전기 드론의 배터리 사용률을 의미하며, γ 는 전기자동차의 배터리 사용률로 정의한다. 배송 시작 시 전기자동차의 초기 배터리 보유량을 V , 배송 시작 시 전기 드론의 초기 배터리 보유량을 A 로 정의하고, 전기 드론의 배터리 용량을 B 로 정의한다.

결정변수는 다음과 같이 정의한다. x_{ij} 는 전기자동차가 고객 노드 i 에서 고객 노드 j 로 이동하면 1, 아니면 0 값을 갖는 이진 변수이며, 실제 전기 드론의 경로를 구성하는 y_{ijk} 는 전기 드론이 고객 노드 i 에서 이륙하여 고객 노드 j 를 방문하여 배송을 수행하고 고객 노드 k 에서 차량과 합류하면 1, 아니면 0 값을 갖는 이진 변수이다. 각 운송수단이 이동하며 산정되는 시간을 올바르게 계산하고자 전기자동차와 전기 드론이 고객 노드 j 에 도착하는 시간을 의미하는 결정변수 t_j 와 t'_j 를 설정한다. 또한, p_{ij} 는 전기자동차의 방문순서에 대해 전기 드론의 이동 순서를 정확히 맞추기 위한 이진 변수를 뜻한다. 부경로 방지를 위하여 보조 결정변수 u_i 를 사용하며 고객 노드 i 에서 전기자동차와 전기 드론의 배터리 잔여량을 뜻하는 v_i 와 b_i 를 설정한다. 마지막으로, 고객 노드 i 에서 전기 드론의 배터리 완충 여부를 판별하는 이진 변수인 z_i 를 설정한다.

위 집합, 매개변수와 결정변수를 활용하여 다음과 같은 수리모형(P)를 정의한다.

$$(P) \quad \min (V + A) - (v_{c+1} + b_{c+1}) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ij} + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk} = 1, \quad \forall j \in C \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_+} x_{0j} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{ic+1} = 1 \quad (4)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (c + 2)(1 - x_{ij}), \quad \forall i \in C, j \in \{N_+ : j \neq i\} \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ij} = \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq j}} x_{jk}, \quad \forall i \in N_0 \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in N_0 \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in N_+ \quad (8)$$

$$2y_{ijk} \leq \sum_{\substack{h \in N_0 \\ h \neq i}} x_{hi} + \sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} x_{lk}, \quad \forall i \in C, j \in \{C : i \neq j\}, k \in \{N_+ : \langle i, j, k \rangle \in P\} \quad (9)$$

$$y_{0jk} \leq \sum_{\substack{h \in N_0 \\ h \neq k}} x_{hk}, \quad \forall j \in C, k \in \{N_+ : \langle 0, j, k \rangle \in P\} \quad (10)$$

$$u_k - u_i \geq 1 - (c+2)(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall i \in C, k \in \{N_+ : k \neq i\} \quad (11)$$

$$t'_i \geq t_i - M(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall i \in C \quad (12)$$

$$t'_i \leq t_i + M(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall i \in C \quad (13)$$

$$t'_k \geq t_k - M(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall k \in N_+ \quad (14)$$

$$t'_k \leq t_k + M(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall k \in N_+ \quad (15)$$

$$t_k \geq t_h + \tau_{hk} + W_L(\sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ \langle k, l, m \rangle \in P}} y_{klm}) + W_R(\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ikl}) - M(1 - x_{hk}), \quad (16)$$

$$\forall h \in N_0, k \in N_+ : k \neq h$$

$$t'_j \geq t'_i + \tau'_{ij} - M(1 - \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall j \in C_p, i \in \{N_0 : i \neq j\} \quad (17)$$

$$t'_k \geq t'_j + \tau'_{jk} + W_R - M(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}), \quad \forall j \in C_p, k \in N_+ : k \neq j \quad (18)$$

$$u_i - u_j \geq 1 - (c+2)p_{ij}, \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\} \quad (19)$$

$$u_i - u_j \leq -1 + (c+2)(1 - p_{ij}), \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\} \quad (20)$$

$$p_{ij} + p_{ji} = 1, \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\} \quad (21)$$

$$t'_l \geq t'_k - M(3 - \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P \\ j \neq l}} y_{ijk} - \sum_{\substack{m \in C \\ m \neq i \\ m \neq k \\ m \neq l}} \sum_{\substack{n \in N_+ \\ \langle l, m, n \rangle \in P \\ n \neq i \\ n \neq k}} y_{lmn} - p_{il}), \quad (22)$$

$$\forall i \in N_0, k \in N_+ : k \neq i, l \in C : l \neq i, l \neq k$$

$$t_0 = 0 \quad (23)$$

$$t'_0 = 0 \quad (24)$$

$$b_0 = A \quad (25)$$

$$b_j \geq b_i - \beta \tau'_{ij} - M(1 - y_{ijk}) - Mx_{ij}, \quad \forall (i, j, k) \in P \quad (26)$$

$$b_k \geq b_j - \beta \tau'_{jk} - M(1 - y_{ijk}) - Mx_{jk}, \quad \forall (i, j, k) \in P \quad (27)$$

$$b_k \geq b_a + \alpha \tau_{ak}(1 - z_a) - \alpha \tau_{ak} z_k - M(1 - x_{ak}) - M \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}, \quad (28)$$

$$\forall k \in N_+, a \in N_0$$

$$b_j \leq b_i - \beta \tau'_{ij} + M(1 - y_{ijk}) + Mx_{ij}, \quad \forall (i, j, k) \in P \quad (29)$$

$$b_k \leq b_j - \beta \tau'_{jk} + M(1 - y_{ijk}) + Mx_{jk}, \quad \forall (i, j, k) \in P \quad (30)$$

$$b_k \leq b_a + \alpha \tau_{ak}(1 - z_a) + M(1 - x_{ak}) + M \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk}, \quad \forall k \in N_+, a \in N_0 \quad (31)$$

$$b_i \leq B, \quad \forall i \in N \quad (32)$$

$$z_i \geq 1 - M(B - b_i), \quad \forall i \in N \quad (33)$$

$$z_i \leq 1 + \frac{b_i - B}{M}, \quad \forall i \in N \quad (34)$$

$$o_k \leq o_h + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C_p \\ j \neq h \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk} + \sum_{m \in C_p} \sum_{\substack{n \in N_+ \\ \langle k, m, n \rangle \in P}} y_{kmn} + M(1 - x_{hk}), \quad (35)$$

$$\forall h \in N_0, k \in N_+, k \neq h$$

$$o_k \geq o_h + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C_p \\ j \neq h \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk} - \sum_{m \in C_p} \sum_{\substack{n \in N_+ \\ \langle k, m, n \rangle \in P}} y_{kmn} - M(1 - x_{hk}), \quad (36)$$

$$\forall h \in N_0, k \in N_+, k \neq h$$

$$o_i + o_j \leq x_{ij} - \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i, j, k \rangle \in P}} y_{ijk} + 1, \quad \forall i \in N_0, j \in C_p \quad (37)$$

$$v_0 = V \quad (38)$$

$$v_j \leq v_i - \gamma \tau_{ij} + M(1 - x_{ij}) - (b_j - b_i) + M(1 - o_i), \quad \forall i \in N_0, j \in N_p, i \neq j \quad (39)$$

$$v_j \leq v_i - \gamma \tau_{ij} + M(1 - x_{ij}) + Mo_i, \quad \forall i \in N_0, j \in N_p, i \neq j \quad (40)$$

$$v_j \geq v_i - \gamma \tau_{ij} - M(1 - x_{ij}) - Mo_i, \quad \forall i \in N_0, j \in N_p, i \neq j \quad (41)$$

$$v_j \geq v_i - \gamma \tau_{ij} - M(1 - x_{ij}) - (b_j - b_i) - M(1 - o_i), \quad \forall i \in N_0, j \in N_p, i \neq j \quad (42)$$

$$p_{oj} = 1, \quad \forall j \in C \quad (43)$$

$$1 \leq u_i \leq c + 2, \quad \forall i \in N_+ \quad (44)$$

$$t_i \geq 0, \quad \forall i \in N \quad (45)$$

$$t'_i \geq 0, \quad \forall i \in N \quad (46)$$

$$b_i \geq 0, \quad \forall i \in N \quad (47)$$

$$v_i \geq 0, \quad \forall i \in N \quad (48)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{N_+ : j \neq i\} \quad (49)$$

$$y_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{C : j \neq i\}, k \in \{N_+ : \langle i, j, k \rangle \in P\} \quad (50)$$

$$p_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{C : j \neq i\} \quad (51)$$

$$o_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N \quad (52)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0 \quad (53)$$

GVRP-DC는 두 운송수단이 배송을 마치고 돌아왔을 때까지 사용한 배터리 전력량을 최소화하는 목적을 가지며 이는 식 (1)에서 표현된다. 식 (2)는 모든 고객이 하나의 운송수단으로만 배송을 받을 수 있다는 것을 의미하며 식 (3)과 (4)는 전기자동차가 거점을 출발하여 다시 거점으로 돌아와야 함을 나타낸다. 부정로 생성을 방지하는 제약은 식 (5)와 (44)에 표현되어있다. 제약식 (6)은 균형흐름제약을 나타내고 있으며, 식 (7)과 (8)은 전기 드론이 고객 노드 i 에서 출발하여 고객 노드 j 로 들어와 차량으로 복귀해야 함을 나타낸다. 식 (9)는 드론이 이륙하는 고객 노드 i 와 착륙하는 고객 노드 j 를 방문해야 함을 제약으로 넣어주고 있으며, 식 (10)은 드론이 출발 거점에서 이륙 되는 경우에 대한 제약을 나타낸다. 식 (11)은 전기자동차가 전기 드론이 이륙하는 노드를 착륙하는 노드보다 먼저 방문해야 함을 의미하며, 식 (12) - (15)는 각 운송수단의 도착시간 계산을 수행한다. 식 (16)은 전기 드론이 사용될 때 필연적으로 발생하는 시간인 S_L 과 S_R 을 소요시간에 더해주는 역할을 담당한다. 식 (17)-(18)에서는 전기 드론이 이동 가능 순서쌍을 사용하여 이동하는 경우 고객 노드 j 와 고객 노드 k 에서의 도착시간을 산정하며, 식 (23)과 (24)는 거점에서의 시작시간을 설정한다. 식 (19)-(21)에서는 전기 드론이 전기자동차의 방문순서와 조화를 이룰 수 있도록 하며, 제약식 (22)는 고객 노드 k 에서의 도착시간을 고려하여 고객 노드 l 에서의 적절한 이륙시간을 산정한다.

GVRP-DC는 전기로 운용되는 운송수단의 사용을 가정한다. 따라서 해당 운송수단의 배터리 잔량을 고려하는 것이 매우 중요하다. 식 (26)-(31)은 전기 드론의 초기 배터리 양을 산정하는 식 (25)와 함께 전기 드론의 배터리 잔량을 각 노드마다 계산한다. 배터리 잔량을 계산하는 과정에서 전기 드론의 배터리 소모량과 충전량은 매개변수 α 와 β 를 이용하여 산정된다. 특히 식 (28)의 경우 $\alpha\tau_{ak}z_k$ 항이 추가로 존재하는데, 가장 적은 배터리를 사용하기 위해서 해당 항이 값을 가져도 전기 드론의 충전이 배터리 최대 용량 이상으로 충전될 수 없도록 하는 제약인 식 (31)과 (32)가 적용된다. 만약 $\alpha\tau_{ak}z_k = 0$ 이라면, 식 (28)과 (31)이 배터리 충전을 고려하게 된다. 이때, 전기 드론이 방문하지 않는 고객 노드에서는 결정변수 b_i 는 갱신되지 않는다. 식 (33)과 (34)는 각 고객 노드에서 전기 드론의 완충 여부를 판별한다.

GVRP-DC는 전기자동차를 사용하기 때문에 전기자동차의 배터리 잔량 또한 계산해주어야 한다. 배터리 잔량 계산에 있어 전기 드론을 해당 위치에서 싣고 있는지가 중요하며 이는 식 (35)-(37)을 통해 결정된다. 만약 전기 드론이 차량 위에 탑재되어 있고, 배터리가 완충되지 않았다면 전기자동차의 배터리 잔량은 차량 자체가 사용하는 배터리 양에 추가로 전기 드론을 충전시키는 만큼의 배터리가 사용된다. 식 (38)은 전기자동차의 초기 배터리 양을 나타내며, 식 (39)-(42)는 식 (35)-(37)을 통해 산출된 전기 드론의 탑재 여부를 활용하여 전기자동차의 배터리 감소량을 계산한다. 모든 상황에서 배터리 잔량은 음수가 될 수 없으며 이는 식 (47)과 (48)에 기술되어 있다. 식 (43)은 p_{0j} 의 초기값을 설정해주며, (45)와 (46)은 t_i 와 t'_i 의 비음 조건을 의미한다. 마지막으로 식 (49)-(53)은 각 결정변수에 이진 조건을 부여한다.

2.2 제안 해법

TSP는 GVRP-DC의 특수한 문제(special case)이므로, GVRP-DC 또한 NP-hard에 속한다. 차원의 저주(curse of dimensionality) 이론에 따라 2.1절에서 제안한 수리모형은 큰 규모의 네트워크에서 해를 찾기 어렵다. 이러한 한계점을 인식하여 본 논문에서는 유전 알고리즘 기반 메타-휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

2.2.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 좋은 해를 다음 세대로 넘기고, 나쁜 해는 교배와 변이를 통해 개선된 해를 넘김으로써

해를 발전시키며, 조합 최적화 연구에 많이 사용되는 기법이다(Whitley, 1994). 유전 알고리즘에서 염색체(chromosome)는 유전자(gene)들로 이루어져 하나의 해를 나타내는 단위이다. Figure 2는 GVRP-DC에서 정의하는 세대, 염색체, 그리고 유전자를 나타낸다. Figure 2에서 나타난 것 과 같이, 드론은 총 3번 배송을 수행한다. 이 때, 유전자는 드론이 배송을 위해 지나가는 노드들을 순서쌍으로 나타낸다. 한 경로에 대해 모든 드론의 이동 경로 순서쌍, 즉 유전자들의 모음을 하나의 염색체로 정의한 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 사용한 유전 알고리즘은 가능해(feasible solution)를 잘 생성하고 유지하는 것에 초점을 맞추어 구성되었다. 여기서 가능해란, 단순히 경로의 구성만을 말하는 것이 아니라 모든 고객 노드에서 배터리 잔량이 음수일 수 없다는 조건이 추가로 고려된 해를 뜻한다. 경로 구성의 관점에서 살펴보았을 때, 하나의 유전자가 거점에서 출발하여 고객을 방문하고 다시 거점으로 돌아오는 전기 드론 순서쌍을 의미한다면, 전기자동차가 배송을 수행할 때 전기 드론을 1회 이상은 사용할 수 없는 상황이 된다. 이럴 때 염색체의 길이가 2 이상이 되면 불가능해(infeasible solution)가 된다.

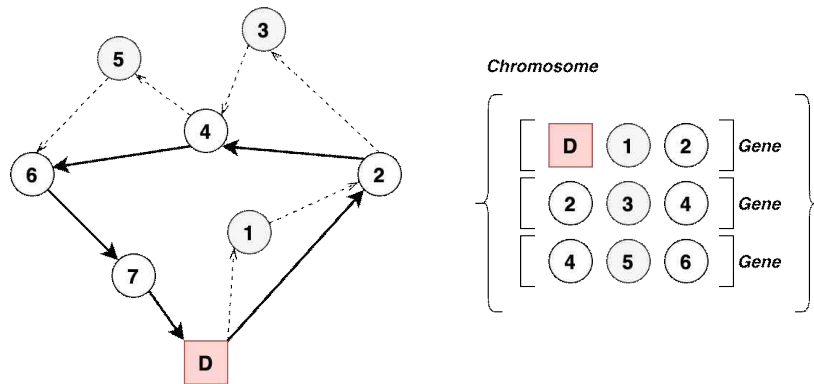


Figure 2. A feasible solution of GVRP-DC. A gene specifies a sortie and a chromosome denotes all sorties in a single route

2.2.2 교차와 변이

일반적인 유전 알고리즘의 교차(crossover)는 기존의 해의 일부를 사용하여 확률적으로 재조합을 시키는 과정을 칭한다. TSP와 같은 경로문제에서 일반적인 교차의 방법은 부경로(subtour)를 포함하는 해를 생성할 수 있으므로 변형이 필요하다. GVRP-DC에서도 부경로를 방지해야 하며, 이는 유전자를 생성하는 과정에 있어 앞서 생성된 유전자에 의존적인 관계를 가지는 것을 의미한다. 본 연구에서는 단순 교차(simple one point crossover)를 사용하였으며, 일반적인 방법으로 진행하게 되면 불가능해가 쉽게 생길 수 있으므로, 특정 유전자 뒤에 올 수 있는 순서쌍을 해집합에서 찾아 교차한다.

해 탐색에 있어 지역최적점(local optima)을 빠져나올 수 있는 것은 최적화 알고리즘에서 매우 중요한데, 유전 알고리즘에서는 변이(mutation)를 통해 이를 수행한다. GVRP-DC에서 사용되는 변이 연산은 교차와 매우 비슷하다. 차이점은 유전자를 선택할 때 세대 내 유전자 집합을 고려하지 않으며 가능한 유전자 집합 내에서 선택하는 방식으로 진행된다. 변이율은 해의 수렴을 위해 0.4로 설정하였다.

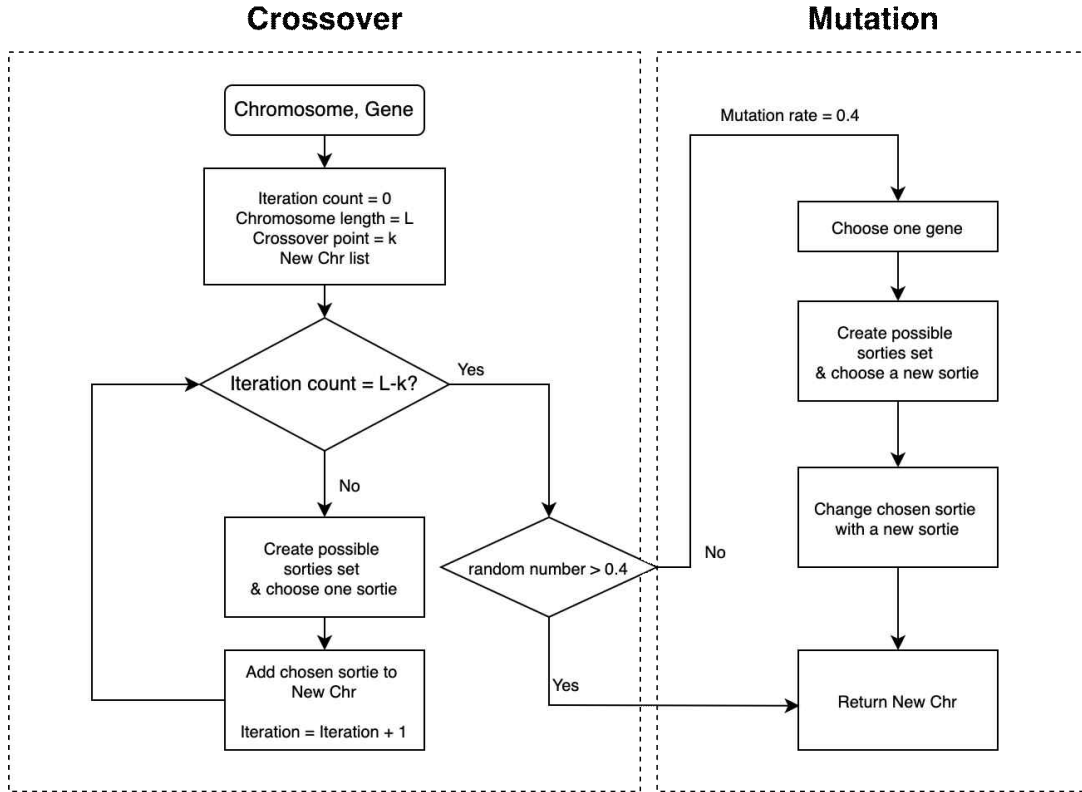


Figure 3. A flowchart of crossover and mutation for the proposed algorithm

2.2.3 차량 경로 생성

GVRP-DC의 경로는 차량 경로와 함께 전기 드론의 이동 경로가 함께 포함된 형태로 나타난다. 전기 드론의 경로 생성은 GVRP-DC의 해 품질을 결정하는 중요 요소이지만, 차량의 이동 경로 또한 해 품질에 영향을 미치게 된다. GVRP-DC는 모든 고객 노드를 한 번만 방문해야 하며 부경로가 없어야 하는 TSP가 갖는 특징적 요소를 그대로 적용받는다. 추가로, 차량은 전기 드론이 배송을 마치고 돌아오는 노드를 전기 드론이 배송을 위해 출발하는 노드보다 먼저 방문할 수 없다는 제약이 본 문제에서 포함된다.

본 연구에서는 두 가지 규칙 기반의 경로 생성 방법을 사용하였다. 먼저, 전기자동차가 전기 드론이 출발하는 위치에 있다면 가능해를 확보하기 위해 무조건 전기 드론이 도착하는 노드로 향하게 하였다. 반면에, 그렇지 않은 모든 경우에 대해서는 최근접 이웃(nearest neighborhood)으로 향하게 하였다. 이러한 방법을 사용하여 가능해를 최대한 많이 생성하도록 하였다.

경로를 생성하며 염색체 내 유전자의 경로 포함 순서, 즉 전기 드론이 출발하는 순서도 결정되었다. 이는 유전자끼리의 의존성을 고려해야 하기 때문이다. 예를 들어 $\langle 3, 4, Depot \rangle$ 이라는 유전자가 있을 때 해당 유전자는 모든 유전자 중 가장 마지막에 위치해야 할 것이다. 혹은, $\langle 1, 5, 6 \rangle$ 과 $\langle 3, 4, 1 \rangle$ 이라는 두 개의 유전자가 있을 때, 두 번째 유전자가 먼저 경로생성에서 사용되어야 하며, 그 이유는 고객 노드 1이 전기 드론이 출발하는 노드이자 동시에 도착하는 노드이기 때문이다.

2.2.4 해 적합도 평가

GVRP-DC의 가능해는 경로 관점에서뿐만 아니라 배터리 잔량 관점에서도 유효해야 한다. 즉, 모든 방문 노드에서 각 운송수단의 배터리 잔량은 음수일 수 없다. 정확한 계산을 위해 앞에서 제시한 수리모형과 같이 배송에 있어 전기 드론이 전기자동차 위에 탑재되어 있는지를 산정해야 한다. 전기 드론이 탑재된 경우 전기자동차의 배터리는 자기 자신이 사용하는 것($\gamma\tau_{ij}$) 외에도 전기 드론의 배터리 충전을 위해 추가적인 배터리 소모($\beta\tau_{ij}$)가 이루어진다. 이러한 상황을 고려하여 GVRP-DC가 목적으로 하는 최소 배터리 소모량을 적합도 식으로 정의하여 각 해를 평가한다. 적합도를 평가하는 식은 식 (54)와 같이 정의한다.

$$fitness = V + A - (TruckBattery_{c+1} + DroneBattery_{c+1}) \quad (54)$$

주어진 경로상에서 위와 같은 방법으로 각 운송수단의 배터리 잔량을 계산해보았을 때 음수가 되는 경우는 경로는 유효하나 배터리 관점에서는 유효하지 않은 해임으로 불가능해(infeasible solution)이다. 불가능해에 대해서는 적합도(fitness) 값을 매우 크게 주어 좋지 않은 해로 평가하였다. 적합도를 가장 크게 주는 것은 많은 배터리를 사용했다는 의미임으로, 자연스럽게 해는 도태됨을 기대할 수 있다. 하지만 불가능해로 평가된 해를 바로 제거하지 않았으며 이는 일반적으로 가능 영역(feasible region)과 불가능 영역(infeasible region)의 경계에서 최적해가 생기는 특징을 이용하기 위해서이다. 경로는 유효하나 배터리 잔량의 관점에서 유효하지 않은 대부분의 경우, 방문순서의 변형을 조금만 해주면 가능해로서 평가가 가능한 경우가 많다. 이러한 변형을 교차와 변이를 통해 해주기 위해 불가능해를 바로 제거하지 않았다. Figure 4은 경로 관점에서의 가능해이나 5번 고객의 배터리 잔량이 음수가 되어 불가능해인 경우를 보여주고 있다. 이러한 해의 경우 교차와 변이를 통해 가능해로의 전환을 기대해 볼 수 있다.

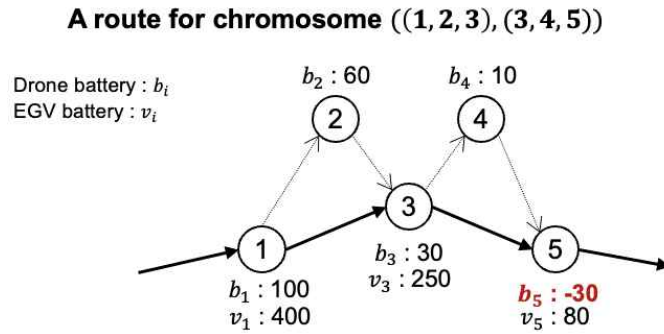


Figure 4. An infeasible solution of GVRP-DC and the battery level at each node. Note that the battery level of the drone at node 5 is negative.

3. 실험

3.1 실험 환경

본 절에서는 수리모형과 휴리스틱 알고리즘 전산 실험의 실험 환경에 대해 설명한다. 드론-트럭 협업 배송에 관한 연구는 매우 활발하게 이루어졌으나, 가장 적은 배터리 소모량과 운송수단의 연료 의존적인 관계를 고려한 경로 문제는 지금까지 연구된 바가 없다. 이에, GVRP-DC의 효율성과 효과성을 정량적으로 비교할 수 있는 선행연구가 없다. 따라서 제시한 수리모형(P)과 휴리스틱 알고리즘의 성능을 비교하여 검증 을 진행하였다. 전산 실험은 Windows Intel(R) Core i7-10700 16GB RAM에서 수행하였으며, 상용 MIP

solver로는 IBM Cplex 12.10.0.0을 사용하였다. 휴리스틱 알고리즘은 Python 3.8.5 환경에서 개발되었다.

GVRP-DC의 수리모형과 휴리스틱 알고리즘의 성능 평가를 위해 Solomon(1987)이 제안한 예제를 사용하여 실험을 진행하였다. Solomon(1987)이 제안한 예제는 총 3가지 종류로 분류되며, 고객의 위치가 군집을 이루고 있는 C-type, 군집과 임의로 분포된 고객이 섞인 RC-type, 마지막으로 모든 고객이 임의의 위치에 분포하고 있는 R-type으로 이루어져 있다. 수리모형의 검증에 있어 많은 수의 고객으로 이루어진 네트워크에 대해서는 해를 도출하기 매우 어려움으로, 수리모형의 검증은 작은 수의 고객으로 노드를 재구성하여 결과를 산출하였다.

유전 알고리즘의 경우 전기 드론의 이륙 횟수, 즉 염색체 내 유전자의 개수를 사전에 정해주어야 한다. 본 실험에서는 고객 노드 수 $|C|$ 에 대해, 작은 노드 수에 대해서는 노드 수를 2, 3, 4로 나눈 값의 몫을 유전자의 개수로 지정하였다. 큰 노드 수에 대해서는 전기 드론의 충전을 고려하여 노드 수를 4, 5로 나눈 값의 몫을 유전자의 개수로 설정하였다. 이렇게 설정된 유전자 개수에 대해 모두 실행한 후 가장 좋은 해를 주는 경우를 사용하였다.

GVRP-DC에서는 전기자동차와 전기 드론을 사용하기 때문에 각 운송수단의 배터리 용량과 사용률, 충전율을 사전에 산정해주어야 한다. 전기자동차의 경우 전기 드론의 배터리 용량과 전기자동차의 배터리 용량은 약 1:40의 비율을 갖는다(Loveday 2021, Abeywickrama 2018). 본 실험에서는 배송 시작 시 각 운송수단이 완충되어 있음을 가정함으로 해당 비율을 사용하여, 전기자동차의 배터리 용량을 40,000(V), 전기 드론의 배터리 용량을 1,000(B)으로 산정할 수 있다. Loveday(2021)와 Abeywickrama(2018)에 기재된 각 운송수단의 성능을 활용하여 충전율 $\alpha = 1$ 를 기준으로 $\beta = 0.5$, $\gamma = 2$ 로 산정할 수 있다. 네트워크상 노드 간 이동시간은 전기 드론이 전기자동차보다 1.5배 빠르도록 설정하였다(Choi, 2021).

3.2 수리모형 실험결과

본 절에서는 Solomon(1987)의 예제를 활용한 수리모형(P)의 전산 실험결과를 기술한다. 최적해의 도출을 위해 고객 노드 수를 7, 8 그리고 9개로 줄여서 실험을 진행하였으며 Table 1은 그 결과를 보여준다.

GVRP-DC의 성능을 평가하기 위해 단일 운송체계인 외판원문제(TSP)와 해를 동시에 비교해주었다. TSP 문제의 구성을 위해, GVRP-DC의 특수한 문제이므로 매개변수 A 와 α 를 0으로 설정해주어 실험을 진행하였다. Table 1은 각 문제의 유형별로 TSP와 GVRP-DC의 최적해와 연산시간을 정리한 결과이다. 특히, GVRP-DC에 대해서는 TSP 대비 해의 개선된 정도(imp. over TSP(%))와 전기 드론의 사용률을 산정하여 기재해주었다.

Table 1. Experiment result of the MILP. Solved until optimality without time limit

Problem	$ C $	Obj.val			Run time(s)		Drone usage(%)
		TSP	GVRP-DC	Imp. over TSP(%)	TSP	GVRP-DC	
C101	7	230.75	212.59	8.54	12.60	22.15	42.86
C101	8	232.90	214.91	8.37	158.26	198.77	37.50
C101	9	243.22	220.33	10.39	3343.15	10818.55	44.44
R101	7	600.24	439.08	36.70	13.78	16.81	42.86
R101	8	703.02	481.44	46.02	126.68	227.01	50.00
R101	9	730.62	515.83	41.64	3093.79	5145.14	44.44
RC101	7	441.35	440.31	0.24	6.77	21.55	42.86

RC101	8	464.78	463.74	0.22	159.42	209.16	37.50
RC101	9	479.42	471.60	1.66	2939.84	13227.37	44.44

해의 최저 개선율은 0.22%, 최대 개선율은 46.02%임을 알 수 있으며 각 문제 유형별로(C-type, R-type, RC-type) 해 개선의 평균값은 약 9.1%, 41.45%, 0.71%로 GVRP-DC의 최적해는 TSP의 최적해보다 모든 경우에 대해 개선되어 GVRP-DC의 사용이 효과적임을 강력하게 시사한다. 이를 통해 GVRP-DC는 항상 TSP보다 좋거나 같은 값을 주게 됨을 알 수 있다. 문제 유형 R-type에서 특히 해 개선의 효과가 높았음을 알 수 있으며, 상대적으로 고객의 위치가 임의로 분포되어 있는 경우 GVRP-DC의 효용이 더 높은 것으로 해석할 수 있다.

해뿐만 아니라 GVRP-DC의 전기 드론 사용률 또한 산정해 볼 수 있다. 전기 드론의 사용률은 전체 고객 노드 수 대비 전기 드론이 배송을 수행하기 위해 방문한 고객 노드 수의 비율을 백분율로 산정한 값이다. 전기 드론은 순서쌍으로 움직이기 때문에, 7명의 고객을 가진 네트워크에서는 최대 3명의 고객을 전기 드론이 방문할 수 있다. 8명과 9명의 고객을 가진 네트워크의 경우 총 4번 전기 드론이 사용될 수 있으며, R-type에서 전기 드론이 최대한으로 사용된 것을 알 수 있다.

3.3 제안 알고리즘 실험결과

제시한 수리모형은 복잡도가 매우 높기 때문에 큰 네트워크 사이즈에 대해서는 적정 시간(3600초) 내에 유효해(feasible solution)을 찾기 매우 어렵다. 해당 문제를 인식하여 큰 네트워크 사이즈에 대해서 유효해를 제공할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 개발하였으며 본 절에서 25, 50, 100개의 고객 노드에 대한 해당 알고리즘의 성능을 기술한다. 휴리스틱 알고리즘은 해를 도출하는 시점마다 해의 변동 가능성이 있어 10회 실시 중 가장 좋은 값을 기술하였다.

Table 2는 모든 문제 유형에 대해 7, 8, 9개와 25, 50, 100개의 네트워크에 대한 결과를 정리한 결과이다. Table 1과 마찬가지로 전기 드론의 사용률을 확인할 수 있으며 앞서 구한 최적해와의 차이를 백분율로 표시하였다. C101, R101, RC101 예제에 네트워크 크기를 줄인 경우 알고리즘은 최적해를 도출해주는 경우가 존재하였으며, 최적해와의 차이를 구할 수 있는 모든 경우에 대해서는 3% 이상 나쁘지 않았다. 9개의 노드를 가진 R101 문제에 대해서는 최적해와의 차이가 2.11%로 나타났는데, 이는 전기자동차의 경로 선택 규칙으로 인한 것으로 분석 가능하다. 하지만, 외판원문제(TSP)의 최적해(730.62)보다 월등히 좋은 값(526.72)을 보여주었음을 확인할 수 있다.

Table 2. Experiment result of the heuristic algorithm for GVRP-DC. The default settings for Table 1 is used.

Problem	C	Heuristic Algorithm			
		Obj.val	Run time(s)	Gap to MILP(%)	Drone usage(%)
C101	7	212.59	1.16	0.00	42.86
C101	8	215.15	2.13	0.11	50.00
C101	9	222.93	4.41	1.18	44.44
C101	25	890.48	27.81	*	24.00
C101	50	2657.98	729.63	*	24.00
C101	100	8308.79	12007.31	*	20.0
R101	7	447.08	1.06	1.82	42.86
R101	8	481.44	2.12	0.00	50.00

R101	9	526.72	2.73	2.11	44.44
R101	25	2408.03	22.74	*	24.0
R101	50	5044.04	474.77	*	24.0
R101	100	10961.15	13148.83	*	20.0
RC101	7	440.31	1.22	0.00	42.86
RC101	8	464.99	2.61	0.26	50.00
RC101	9	473.33	5.04	0.37	44.44
RC101	25	1669.98	22.07	*	24.0
RC101	50	5032.51	519.83	*	24.0
RC101	100	11229.19	13806.27	*	20.0

최적해를 산출할 수 있는 7, 8개 및 9개의 네트워크 규모에 대한 휴리스틱 알고리즘의 연산시간은 수리 모형보다 월등히 빠르다. 100명의 고객을 가진 네트워크에 대해서는 약 4시간의 연산시간이 걸리나, 50명의 고객의 경우 최대 12분 내외의 시간에(729.63초) 유효해를 산출할 수 있음을 확인할 수 있다.

전기 드론의 사용량은 작은 문제 사이즈(7, 8개 및 9개)에 대해서는 총 3가지 유형(노드 수를 2, 3, 4로 나눈 값의 몫)으로 진행한 것 중 가장 좋은 해를 준 경우로 기재하였고, 큰 문제 사이즈(25, 50 및 100개)에 대해서는 총 2가지 유형(노드 수를 4, 5로 나눈 값의 몫)으로 진행한 것 중 가장 좋은 해를 기재하였다. 이러한 방법이 최적 전기 드론 이륙 횟수를 고려하지 못하는 경우가 있을 수 있으나 실험의 일반화를 위해 해당 방법을 사용하였다.

Table 1에서 GVRP-DC는 R101 예제에 대해 외판원문제(TSP)의 해 보다 개선의 정도가 더 뚜렷하게 나타났다. 본 연구에서 제안하는 휴리스틱 알고리즘의 해 또한 Table 2에서 볼 수 있듯 최적해와 근접해가며 해당 경향성을 그대로 보존하였다. 이로써, C101과 RC101 같이 군집을 이룬 네트워크에 대해서는 알고리즘의 해 개선이 R101보다는 저조하며, 이는 해당 사용자의 네트워크 위상에 대한 충실한 이해로 제안하는 알고리즘을 더 유용하게 사용 가능성을 시사한다.

4. 결론

본 논문에서는 전기 드론과 전기자동차를 사용하는 협업 배송모형을 제안한다. 전기 드론은 전기자동차의 배터리를 사용하여 충전을 하게 되며 전체 경로 순회 시 사용되는 배터리 소모량을 최소화 하고자 하는 경로를 찾고자 한다. 이러한 특성을 반영한 수리모형을 제안하였으며 네트워크 사이즈가 커짐에 따라 수리 모형이 유효해를 찾지 못하기 때문에 유전 알고리즘을 기반으로 하는 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 전산 실험을 통해 큰 노드 수의 문제에 대해서도 합리적인 시간 내 좋은 해를 제공해 줌을 확인할 수 있었다.

본 연구는 전기자동차에 새로운 역할을 부여하였으며, 새로운 문제임을 고려하였을 때 향후 파생 가능한 연구는 매우 많을 것으로 사료된다. 배송시간은 물류 회사의 서비스 품질을 결정하는 중요 요소이므로, 물류 회사의 더 효율적인 운영을 위해 더 빠른 배송을 목적으로 하는 것을 고려한 연구는 다음 연구 주제가 될 수 있다. 또한, 본 연구에서 가정하고 있는 단일 전기자동차와 단일 전기 드론이 아닌 다수의 전기자동차와 다수의 전기 드론을 사용한 배송 모델도 확장 가능한 연구주제가 될 것이다. 알고리즘 구성의 관점에서는 지금과 같이 규칙 기반의 전기 드론 이륙 횟수 지정보다 더 유연한 방법을 제시하는 것 또한 새로운 연구 방향이 될 수 있다. 특히, 네트워크의 위상에 따른 추가적인 분석과 인사이트 도출은 해당 시스템을 현업에 더 빠르게 적용할 수 있는 방법이 될 것이다.

참고문헌

- Abeywickrama, H. V., Jayawickrama, B. A., He, Y., & Dutkiewicz, E. (2018). Comprehensive energy consumption model for unmanned aerial vehicles, based on empirical studies of battery performance. *IEEE Access*, 6, 58383-58394.
- Eric Adams. (2016), DHL's Tilt-Rotor 'Parcelcopter' Is Both Awesome and Actually Useful, WIRED, <https://www.wired.com/2016/05/dhls-new-drone-can-ship-packages-around-alps/>. (Accessed on 09/28/2021).
- Niels Agatz, Paul Bouman, and Marie Schmidt. (2018), Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone, *Transportation Science*, 52(4), 965-981.
- Carlsson, J. G., & Song, S. (2018). Coordinated logistics with a truck and a drone. *Management Science*, 64(9), 4052-4069.
- Chun Cheng, Yossiri Adulyasak, Louis-Martin Rousseau. (2020), Drone routing with energy function: Formulation and exact algorithm, *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 364-387.
- Chowdhury, S., Shahvari, O., Marufuzzaman, M., Li, X., & Bian, L. (2021). Drone routing and optimization for post-disaster inspection. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107495.
- Chung, S. H., Sah, B., & Lee, J. (2020). Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. *Computers & Operations Research*, 123, 105004.
- Ermağan, U., Yıldız, B., & Salman, F. S. (2022). A learning based algorithm for drone routing. *Computers & Operations Research*, 137, 105524.
- George B Dantzig and John H Ramser. (1959), The truck dispatching problem, *Management science*, 6(1), 80-91.
- Martin Desrochers, Jacques Desrosiers, and Marius Solomon. (1992), A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows, *Operations research*, 40(2), 342-354.
- Erdoğan, Sevgi, and Elise Miller-Hooks. (2012), A green vehicle routing problem, *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48(1), 100-114.
- Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81-99.
- Gonzalez-R, P. L., Canca, D., Andrade-Pineda, J. L., Calle, M., & Leon-Blanco, J. M. (2020). Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 657-680.
- Ha, Quang Minh, et al. (2020), A hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem with drone, *Journal of Heuristics*, 26(2), 219-247.
- Jeong, H. Y., Song, B. D., & Lee, S. (2019). Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and No-Fly zones. *International Journal of Production Economics*, 214, 220-233.

- Kuo, R. J., Lu, S. H., Lai, P. Y., & Mara, S. T. W. (2021). Vehicle Routing Problem with Drones Considering Time Windows. *Expert Systems with Applications*, 116264.
- Bomin Kim. (2021), 친환경 전기차의 딜레마..."배터리 생산·폐기 과정서 환경오염 유발", NewsQuest, <https://www.newsquest.co.kr/news/articleView.html?idxno=82223>. (Accessed on 09/28/2021).
- Ikhyun Kim. (2020), 美 아마존 '드론배송' 곧 실현된다, ZDNet Korea <https://zdnet.co.kr/view/?no=20201229104742>. ((Accessed on 09/28/2021).
- Kihun Kim. (2021), '드론 택배' 시대 열렸다...국토부, 배송용 사업등록증 첫 발급, Yonhap News Agency, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210224041100530>. (Accessed on 09/28/2021).
- Sungwoo Kim and Ilkyeong Moon. (2018), Traveling salesman problem with a drone station, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 49(1), 42-52.
- Patchara Kitjacharoenchai et al. (2019), Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach *Computers & Industrial Engineering*, 129, 14-30.
- Eric Loveday. (2021), "Electric Trucks - Every Upcoming Pickup Truck for 2021-2022", InsideEVs, <https://insideevs.com/car-lists/electric-trucks/>. (Accessed on 12/15/2021).
- Macrina, Giusy, et al. (2019), An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows, *European Journal of Operational Research*, 276(3), 971-982.
- Macrina, G., Pugliese, L. D. P., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020). Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102762.
- Moshref-Javadi, M., Lee, S., & Winkenbach, M. (2020). Design and evaluation of a multi-trip delivery model with truck and drones. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 136, 101887.
- Chase C Murray and Amanda G Chu. (2015), The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 86-109.
- Wonsik Na. (2021), "누가 먼저 상장하나"...뜨거워진 '새벽배송', Business Watch, <http://news.bizwatch.co.kr/article/consumer/2021/08/30/0023>. (Accessed on 09/28/2021).
- Nguyen, M. A., Dang, G. T. H., Hà, M. H., & Pham, M. T. (2021). The min-cost parallel drone scheduling vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*.
- Stefan Poikonen and Bruce Golden. (2020), Multi-visit drone routing problem,. *Computers & Operations Research*, 113, 104802.
- Ritwik Raj et al. (2021), A branch - and - price approach for the parallel drone scheduling vehicle routing problem, <https://ssrn.com/abstract=3879710>.
- Ribeiro, R. G., Cota, L. P., Euzébio, T. A., Ramírez, J. A., & Guimarães, F. G. (2021). Unmanned-Aerial-Vehicle Routing Problem With Mobile Charging Stations for Assisting Search and Rescue Missions in Postdisaster Scenarios. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*:

Systems.

- Michael Schneider, Andreas Stenger, and Dominik Goeke. (2014), The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations, *Transportation science*, 48(4), 500-520.
- Marius M Solomon. (1987), Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations research*, 35(2), 254-265.
- Paolo Toth and Daniele Vigo. (2014), *Vehicle routing: problems, methods, and applications*, SIAM.
- Vásquez, S. A., Angulo, G., & Klapp, M. A. (2021). An exact solution method for the TSP with Drone based on decomposition. *Computers & Operations Research*, 127, 105127.
- Zheng Wang and Jiuh-Bing Sheu. (2019), Vehicle routing problem with drones, *Transportation research part B: methodological*, 122, 350-364.
- Darrell Whitley. (1994), A genetic algorithm tutorial, *Statistics and computing*, 4(2), 65-85.
- Yi, W., & Sutrisna, M. (2021). Drone scheduling for construction site surveillance. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(1), 3-13.