

공학석사학위 논문

물류배송을 위한 드론 및 네트워크 최적 설계 연구

A Study on the Optimal Design of Drones and Networks
for Delivery

2025년 2월

인하대학교 대학원

항공우주공학과(항공우주공학전공)

이 석 환

공학석사학위 논문

물류배송을 위한 드론 및 네트워크 최적 설계 연구

A Study on the Optimal Design of Drones and Networks
for Delivery

2025년 2월

지도교수 이 학 태

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

이 논문을 이석환의 석사학위논문으로 인정함.

2025년 1월 10일

주심 목성훈 (인)

부심 이학태 (인)

위원 김종한 (인)

초록

4차 산업혁명의 도래와 함께 드론은 물류배송 분야에서 많은 기술 발전을 이루었다. 드론 물류배송은 기존의 지상 물류 시스템의 한계를 보완하며, 시간과 비용 측면에서 효율성을 높일 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 드론을 활용한 물류배송은 최적의 허브 위치, 경로 설계, 배송 드론 개발 및 비용 분석이 필수적이다.

본 연구는 서울시 공간정보 데이터를 기반으로 허브 수에 따른 경로 네트워크 최적 설계 방법과 전기 추진 시스템의 멀티드론 설계 및 성능 분석 방법을 제시하고, 이를 기반으로 허브 운영 비용 모델을 산출하여 드론 배송 운임 비용을 분석한다.

첫째, Min-Max 알고리즘을 활용하여 단일 및 다중 허브 운영 시 최적의 허브 위치를 도출한다. 또한, 실제 물류 데이터를 기반으로 깊이 우선 탐색 알고리즘과 선형계획 최적화 기법을 결합하여 배송 경로 탐색과 경로 이용 횟수 최적화를 수행한다.

둘째, 전기 추진 시스템을 기반으로 허브 운영 조건에 적합한 전진 비행 상태의 드론을 설계한다. 이 과정에서 페이로드 1kg을 탑재할 수 있는 드론이 요구하는 최소 전력 도출을 위해 호버링 성능을 분석한다. 이를 바탕으로 비행 속도, 전력 소모량, 비행 가능 거리, 그리고 비행 시간을 포함한 주요 성능을 도출하며, 단일 허브와 다중 허브 모델 간의 차이를 분석한다.

마지막으로, 경로 네트워크와 드론 모델링에서 도출한 결과를 종합하여 드론 배송 운영 비용 모델을 제시한다. 배터리 충전 비용 및 교체 비용, 드론 초기 비용 및 유지 비용을 산출하여 허브 수와 드론 비행 속도에 따른 비용 차이를 분석한다. 연구 결과에 따르면, 단일 허브 운영에 비해 다중 허브 운영 시 1회 운임비가 7.2% 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 드론을 활용한 물류배송 시스템의 프레임워크를 제시하고, 전기 추진 드론 설계의 기초 데이터를 제공함으로써 국내 드론 물류 서비스 발전에 큰 도움이 될 것이다.

핵심어: 드론, 물류배송, 전기 추진 시스템, 경로 네트워크

Abstract

With the advent of the 4th Industrial Revolution, drones have achieved significant technological advancements in the field of logistics delivery. Drone logistics delivery has emerged as a promising alternative, addressing the limitations of conventional ground logistics systems while enhancing efficiency in terms of time and cost. Operating drone-based logistics delivery requires optimizing hub locations, designing delivery routes, developing efficient delivery drone, and conducting cost analyses.

This study presents methods for optimizing route networks based on the number of hubs using spatial data from Seoul, designing and analyzing the performance of multi-drone with electric propulsion systems, and calculating operational cost models to analyze drone delivery charge.

First, the study derives optimal hub locations for single and multiple hub operations using the Min-Max algorithm. It also combines the depth-first search algorithm and linear programming optimization techniques with real logistics data to search delivery routes and optimize route usage count.

Second, an electric propulsion system is used to design a forward-flight drone satisfied hub operation conditions. Hovering performance is analyzed to calculate the minimum power required for a drone carrying a 1 kg payload. Based on these results, prior performance metrics, including flight speeds, power consumption, range, and flight time, are derived, and performance differences between single-hub and multi-hub models are compared.

Finally, the study presents an operational cost model for drone delivery by integrating the results of the route network and drone modeling. The model calculates battery charging and replacements costs, initial drone costs, and maintenance costs to analyze

cost differences based on the number of hubs and drone flight speed. Results from the study show that the drone delivery charge decreased by 7.2% for multi-hub operation compared to single-hub operation.

The proposed methods are particularly useful for the development of drone logistics services in Korea by presenting a framework for drone-based logistics systems and foundational data for designing electric propulsion multi-drones.

Keyword: Drone, Logistics Delivery, Electric Propulsion Systems, Route Network

차례

제 1 장. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.1.1 드론 물류배송 동향	1
1.1.2 드론 물류배송 연구 사례	2
1.2 연구 목표 내용 및 의의	4
제 2 장. 경로 네트워크 최적 설계	6
2.1 물류 데이터	6
2.2 단일 및 다중 허브 운영 모델	7
2.2.1 단일 허브 운영	8
2.2.2 다중 허브 운영	9
2.2.2.1 두 허브 위치 탐색	9
2.2.2.2 세 허브 위치 탐색	11
2.2.2.3 네 허브 위치 탐색	13
2.3 경로 네트워크 물류 데이터 처리 방법	14
2.3.1 배송 경로 탐색 방법	14
2.3.2 경로 사용 빈도 최적화	20
제 3 장. 물류배송 드론 설계	25
3.1 전기 추진 시스템 멀티로터 드론 설계	25
3.1.1 호버링 성능 분석	28

3.1.2 단일 허브 운영 전진 비행 드론 모델	32
3.1.3 세 허브 운영 전진 비행 드론 모델	37
제 4 장. 물류 배송 드론 비용 모델 산출	44
4.1 허브 수에 따른 배터리 충전 비용 산출	44
4.2 배터리 교체 비용 산출	46
4.3 드론 초기 및 모터 교체 비용 산출	48
4.3.1 드론 초기 구매 비용	48
4.3.2 모터 교체 비용	49
4.4 운영 비용 모델 산출 결과	51
제 5 장. 결론	53

그림 차례

Figure 1 An example TSP-D solution[7]	2
Figure 2 Comparison of energy consumption between different fleet size[8]	3
Figure 3 Drone-based delivery service[9]	3
Figure 4 Links by logistics data	6
Figure 5 Top 5 departure and arrival regions	7
Figure 6 Seoul districts	7
Figure 7 Hub 1 operation result	9
Figure 8 Two hub locations and their regions	11
Figure 9 Three hub locations and their regions	12
Figure 10 Four hub locations and their regions	14
Figure 11 Route finding using DFS algorithm	16
Figure 12 Number of one hub route by level	17
Figure 13 Number of two hub route by level	17
Figure 14 Number of three hub route by level	18
Figure 15 Number of four hub route by level	19
Figure 16 Delivery method (Level 3)	20
Figure 17 Delivery method through hubs	20
Figure 18 An example R matrix	21
Figure 19 Route usage count by Linear Problem	23
Figure 20 Route usage count	23
Figure 21 Comparison total route to using route	24
Figure 22 Electric propulsion system flow[10]	25

Figure 23 KV100 motor & 29x9.5 prop static data 27

Figure 24 Thrust and Power coefficient 29

Figure 25 Motor efficiency 30

Figure 26 Quadcopter aerodynamic forces in forward flight 32

Figure 27 Drone front and top dimensions[m²] in 1 Hub 34

Figure 28 Incidence angle in level-flight condition 35

Figure 29 Forward flight drone results 36

Figure 30 Drone top and front dimensions[m²] in 3 Hub 37

Figure 31 Incidence angle in 3 Hub 39

Figure 32 Forward flight drone results in 3 Hub 40

Figure 33 Comparison performance between 1 Hub and 3 Hub 42

Figure 34 Total power consumption 45

Figure 35 Battery charge cost 46

Figure 36 Number of battery replacement 47

Figure 37 Drone price curve fitting result 49

Figure 38 Number of motor replacement 50

Figure 39 Total operating cost result 51

Figure 40 delivery cost of one drone flight 52

표 차례

Table 1 Three hub operation result	12
Table 2 Four hub operation result	14
Table 3 Termination condition for DFS algorithm	15
Table 4 One hub drone design parameter	26
Table 5 Detailed specification of the drone [12]	26
Table 6 Hovering efficiency parameter	31
Table 7 Hovering operation performance	31
Table 8 Battery specifications	37
Table 9 Hovering operation performance in 3 Hub	38
Table 10 Drone performance in 1 Hub and 3 Hub	43
Table 11 Battery price reference	48
Table 12 Drone price	49
Table 13 Motor data provided by the manufacturer	50

제 1 장. 서 론

1.1 연구 배경

드론, 또는 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는 조종사가 탑승하지 않고 원격 조종이나 자동화 시스템에 의해 비행하는 항공기이다. 19세기 초기 개념이 등장하여 1차 세계대전인 1910년대에 무인항공기의 초기 형태가 등장하였다. 군사적 목적으로 개발되었으나, 기술의 발전으로 정찰, 무기화, 상업용 등 다양한 목적에 맞게 변화하였고, 4차 산업혁명의 동력으로 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다.

1.1.1 드론 물류배송 동향

최근 전자상거래의 성장으로 빠르고 효율적인 물류 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 대체 방안으로 드론을 활용한 배송이 대두되고 있다. 다국적 시장조사기관 IMARC 그룹에 따르면, 글로벌 드론 패키지 시장 규모는 2024년 17.4억 달러에서 연평균 19.5%의 증가하여, 2033년 93.3억 달러에 도달할 것으로 전망하고 있다[1].

2013년 아마존은 옥토크터(Octocopter) 개발 드론을 통해 드론을 이용하여 운송하는 프라임 에어(Prime Air)를 발표하였다[2]. 서비스 공개 이후 국내외 많은 물류 기업들이 주목하고 있다. 대표적으로 DHL의 “Parcelcopter”, Google의 “Project Wing” 등이 있으며, 미국은 월마트와 아마존이 드론 물류 산업을 이끌고 있으며 UPS와 FedEx가 뒤따르고 있다[3].

국내의 경우 CJ대한통운이 2016년 택배용 드론을 개발하여 시험 비행을 하였으나, 비상 상황 대처 기술이 아직 미흡한 부분이 존재한다. 또한 우정사업본부는 도서산간 지역에서 우편물을 배송하는 시연을 진행한 바 있다[4]. 최근

2024년 드론실증도시 구축을 사업의 일환으로 섬, 공원, 항만을 시작으로 드론 배송을 시행하고 있다[5].

1.1.2 드론 물류배송 연구 사례

기존의 지상 트럭 배송에 드론 배송을 결합한 물류배송은 시간 및 비용 측면에서 효율적이다. Sudbury et al.는 배송 거리를 단축하고, 수요가 많은 고밀도 지역에서 큰 이점을 제공하며, 지상 배송 대비 1/3 이상의 비용 절감이 가능하다는 연구 결과를 제시하였다[6].

드론의 최적화된 배송 경로는 신속하고 비용적에서 이점이 있다. Traveling Salesman Problem(TSP)은 모든 노드(Node)를 방문하는 최단 경로를 찾는 최적화 알고리즘이다. Agatz et al.는 트럭과 드론을 결합한 배송에서 TSP를 통해 효율성을 높이는 방법론을 제시하였지만, 추후 실제 데이터를 적용할 경우 계산 시간이 증가하는 문제에 대한 추가 연구가 필요하다[7].

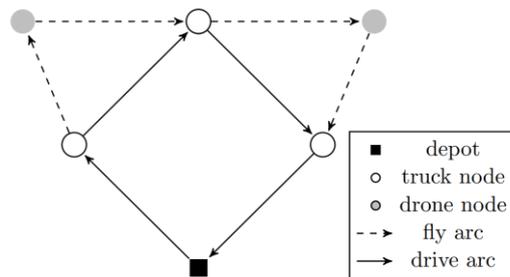


Figure 1 An example TSP-D solution[7]

Bhuiyan et al.의 연구에서는 에너지 소비량, 기체 크기, 배터리 개수를 최소화 하는 최적화 기법을 제시하였다. 드론의 비행 경로가 도로망 위를 비행할 때보다 직선 경로로 비행할 때와 주요 성능을 비교 분석하였고, 드론의 종류에 따

른 에너지 소비량을 비교하였다[8].

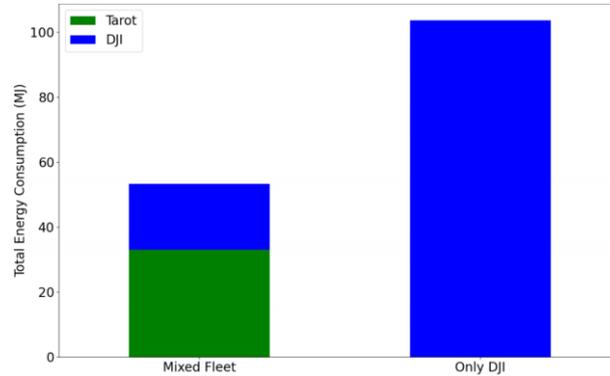


Figure 2 Comparison of energy consumption between different fleet size [8]

한국에서의 드론 물류배송의 한계를 해결하기 위해서는 비행시간, 돌발상황 대처, 물품수령을 위한 기술적 문제, 환경적 제약과 법적 제도 문제가 해결되어야 한다. 이러한 문제점들이 해결되는 시점에 드론을 활용한 물류 시장이 확대 될 것이다[9].



Figure 3 Drone-based delivery service [9]

1.2 연구 목표 내용 및 의의

미래에 드론을 활용한 라스트 마일 배송은 확대될 것이며, 이와 더불어 자율 비행, 항법, 실시간 경로계획과 같은 제어 기술, 충돌회피 기술, 탑재 센서 기술 등 다양한 기술 발전 전망이 있을 것으로 보인다. 하지만, 해외의 경우 드론 배송이 상용화 단계에 있지만 국내의 경우 규제와 기술적인 제약으로 인해 미흡한 부분이 존재한다. 특히 밀집된 도시가 많기 때문에 배송 취약지역을 대상으로 물류 사각지대를 우선적으로 프레임워크를 개발해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 대한민국 서울시를 기준으로 드론 물류배송 운영 방법에 대해 소개한다. 물류 배송 네트워크에서 허브는 여러 배송 경로를 연결하는 중추적인 지역으로, 관할지역에 있는 모든 지역을 연결하고 다른 허브와 연결하는 역할을 한다. 효율적인 드론 물류배송은 허브의 적절한 위치 선정에서 시작된다. 허브는 드론이 이·착륙뿐만 아니라 배터리 충전 및 교체 등의 정비를 수행할 수 있어야 한다. 따라서, 드론은 임무를 수행하고 허브로 복귀하는 구조로 운영된다. 또한, 드론은 제한된 페이로드로 인해 허브에서 출발해 각 지역을 순차적으로 이동하면서 한 번에 한 개의 물류를 처리하는 방식으로 운영된다. 추가적으로, 국내 도서·산간에서 긴급 상황이 발생할 경우 드론을 활용하여 의약품, 생필품 등을 배송할 수 있도록 직선 경로 기반의 긴급 배송을 드론 운용 목적으로 설정하였다.

1장에서는 드론 물류배송의 연구 배경과 목적을 소개하고, 연구의 필요성을 제시한다. 2장에서는 최적 허브 위치 선정과 배송 경로 설계를 다루며, 깊이 우선 탐색(Depth-First Search, DFS) 알고리즘 및 선형 최적화 기법을 활용한 경로 탐색 결과를 제시한다. 3장에서는 드론 설계 및 성능 분석을 통해 허브 운영 조건에 적합한 드론 설계를 수행하고, 단일 및 다중 허브 모델 간의 드론 성능을 비교한다. 4장에서는 허브 운영 모델과 드론 설계 결과를 기반으로 물류

배송 드론 운영 비용 모델을 산출하며, 5장에서는 연구 결과를 종합하여 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

허브 운영에 따라 요구되는 드론 성능 조건에 맞게 전기 추진 시스템의 드론 모델을 설계하여, 배송 드론 운용 비용 모델을 산출한다. 본 연구에서 진행한 전체 과정으로 드론 물류배송을 위한 허브 운영 시 초기 비용과 유지 비용 모델링 방법을 파악할 수 있고, 국내 드론 운용 관련에 큰 도움이 될 것이다.

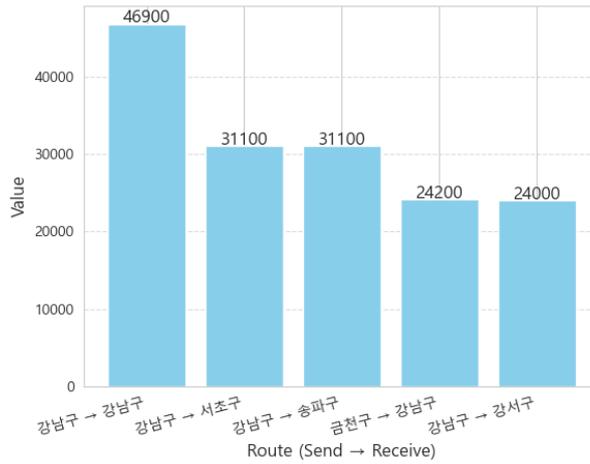


Figure 5 Top 5 departure and arrival regions

2.2 단일 및 다중 허브 운영 모델



Figure 6 Seoul districts

본 연구에서는 대한민국 서울시 WGS84 좌표 데이터를 사용하였다. 서울시는 25개의 자치구가 있으며 Figure 6에 도시되어 있다. 각 지역의 중심(Centroid)을 대표 위치로 선정하였으며, 지역 간 거리는 식 (2.1)을 통해 대원거리(Great-Circle Distance)로 계산하였다.

$$d_{ij} = R \cos^{-1}(\cos \phi_i \cos \phi_j \cos(\lambda_i - \lambda_j) + \sin \phi_i \sin \phi_j) \quad (2.1)$$

허브의 위치는 서울시 25개 자치구의 중심 위치로 제한하였다. 따라서, 후보군은 식 (2.2)과 같이 25개이며 허브 수에 따라 Min-Max 알고리즘을 이용해 허브의 최적 위치를 선정하였다.

$$\mathcal{N} = \{h_k\}, \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (2.2)$$

2.2.1 단일 허브 운영

허브 위치는 임의의 허브(c)와 다른 24개 지역 중 가장 먼 지역과의 거리 z 를 최소화하는 알고리즘을 사용하여 결정하였다. 이 과정에서 최대 거리를 최소화한 결과, 최적해인 z 는 허브에서 모든 지역을 방문할 수 있는 최소값을 나타낸다. 그 결과, 문제 (2.3)과 같은 단일 허브 위치 선정 문제를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & z = \max_{i \in \mathcal{N}} d_{ci} \\ \text{subject to} \quad & \forall c \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (2.3)$$

문제 (2.3)을 통해 허브에서 가장 먼 지역까지의 거리 z 는 15.26 km로 계산되었으며, 단일 허브의 최적 위치 c 는 중구로 결정되었다. 그 결과는 Figure 7에 시각적으로 나타내었다.

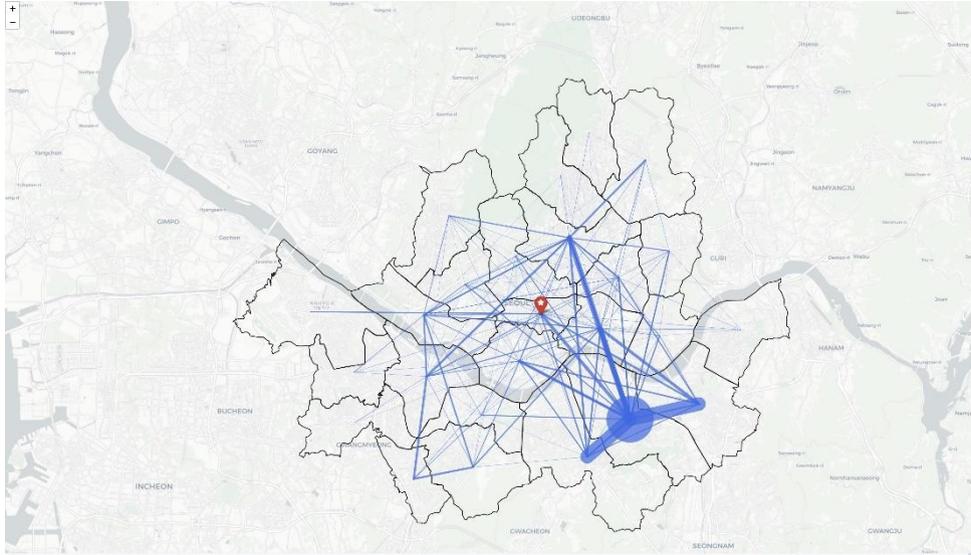


Figure 7 Hub 1 operation result

2.2.2 다중 허브 운영

2.2.2.1 두 허브 위치 탐색

두 개의 허브를 선정하기 위해, 25개 지역 중 두 지역을 조합하여 선택할 수 있는 경우의 수인 $\binom{25}{2}$ 에 해당하는 조합을 기준으로 허브 후보를 설정하였다. 이후, 무작위로 선택된 두 개의 허브의 위·경도 데이터를 활용해 거리 기반 알고리즘으로 각 허브가 담당할 두 개의 관할구역으로 전체 지역을 분할하였다.

관할구역은 각 허브가 담당하는 지역들을 포함하며, 분할된 두 개의 관할구역은 단일 허브 운영 방식과 동일하게 운영된다. 또한, 각 허브는 관할하는 지역

내에서만 이동이 가능하며, 관할구역 간의 이동은 반드시 허브를 경유해야 한다고 가정하였다.

알고리즘은 각 허브와 관할구역 내 최대거리와 허브 간의 거리를 고려하여 두 개의 허브 조합을 최소화하여 최적 허브 위치를 선정하였고, 문제 (2.4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } z = \max_{c1 \in \mathcal{R}_1, c2 \in \mathcal{R}_2} (z_{c1}, z_{c2}, d_{c1c2}) \\
 & \text{subject to } z_{c1} = \max_{v \in \mathcal{R}_1} (d_{c1v}) \quad \forall c1, v \in \mathcal{R}_1, v \neq c1 \\
 & \quad \quad \quad z_{c2} = \max_{v \in \mathcal{R}_2} (d_{c2v}) \quad \forall c2, v \in \mathcal{R}_2, v \neq c2 \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

문제 (2.4)의 결과로 최소화된 거리 z 는 13.15 km로 계산되었으며, 최적의 허브 위치 $c1$ 과 $c2$ 는 각 성동구와 영등포구로 결정되었다. Figure 8은 두 허브 운영 시 허브 위치와 각 관할구역 내 이동을 시각화한 결과이다.

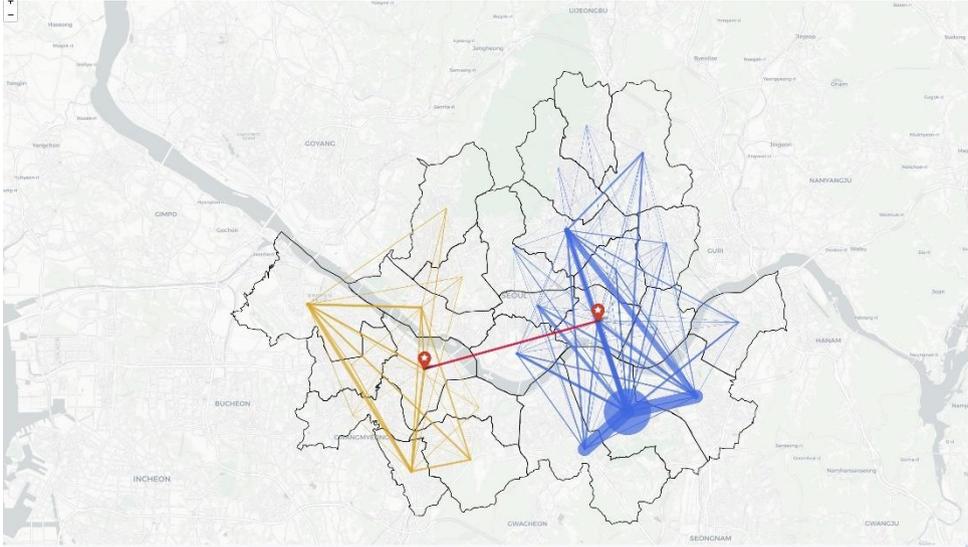


Figure 8 Two hub locations and their regions

2.2.2.2 세 허브 위치 탐색

세 허브의 최적 위치를 선정하기 위해, (2.5)에 해당하는 조합을 허브 후보 지역으로 설정하였다. 이후, 각 지역은 가장 가까운 허브를 기준으로 관할구역이 분할되었다. 따라서, 관할구역은 식 (2.5)을 통해 계산할 수 있다.

$$\mathcal{R}_j = \left\{ v_i \in \mathcal{N} \mid c_j = \arg \min_{c_k \in \mathcal{C}} d_{c_j v_i} \right\}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (2.5)$$

각 관할구역에서의 최대거리와 허브 간의 거리들을 고려하여 문제 (2.6)와 같이 정의할 수 있고, 그 결과는 Table 1과 같다.

$$\begin{aligned}
\text{minimize } z &= \max_{c1 \in \mathcal{R}_1, c2 \in \mathcal{R}_2, c3 \in \mathcal{R}_3} (z_{c1}, z_{c2}, z_{c3}, d_{c1c2}, d_{c2c3}, d_{c1c3}) \\
\text{subject to } z_{c1} &= \max_{v \in \mathcal{R}_1} (d_{c1v}), \quad \forall c1, v \in \mathcal{R}_1, v \neq c1 \\
z_{c2} &= \max_{v \in \mathcal{R}_2} (d_{c2v}), \quad \forall c2, v \in \mathcal{R}_2, v \neq c2 \\
z_{c3} &= \max_{v \in \mathcal{R}_3} (d_{c3v}), \quad \forall c3, v \in \mathcal{R}_3, v \neq c3
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Table 1 Three hub operation result

z [km]	$c1$ (Hub1)	$c2$ (Hub2)	$c3$ (Hub3)
11.65	용산구	동대문구	서대문구

Figure 9은 세 허브의 최적 위치와 해당 허브의 관할구역을 시각적으로 나타낸 결과이다.

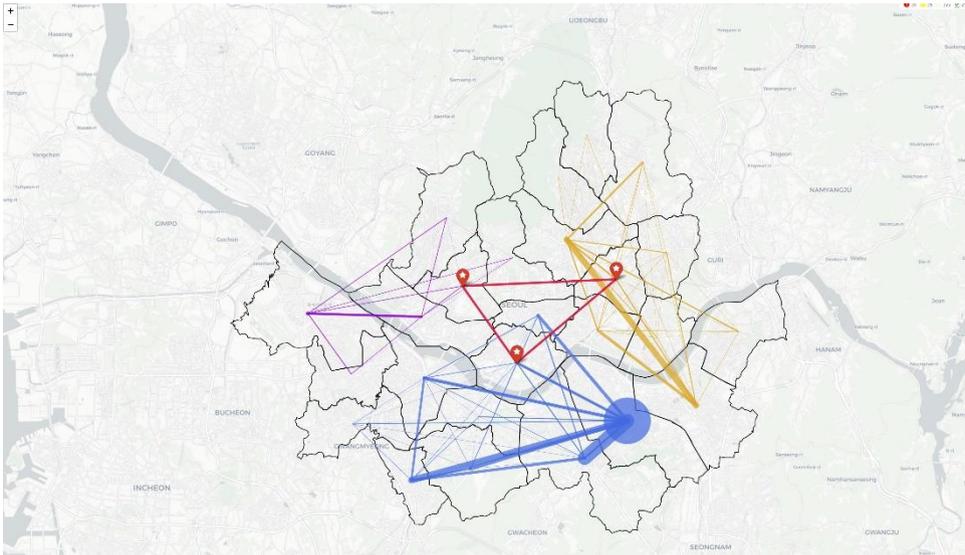


Figure 9 Three hub locations and their regions

2.2.2.3 네 허브 위치 탐색

네 허브의 최적 위치를 선정하기 위해, (25)에 해당하는 조합을 허브 후보 지역으로 설정하였다. 이후, 각 지역을 가장 가까운 허브를 기준으로 관할구역을 분할하였다. 관할구역은 식 (2.7)을 통해 계산할 수 있으며, 이는 각 지역이 최소 거리 조건에 따라 특정 허브에 할당되는 방식을 정의한다.

$$\mathcal{R}_j = \left\{ v_i \in \mathcal{N} \mid c_j = \arg \min_{c_k \in \mathcal{C}} d_{c_j v_i} \right\}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2.7)$$

허브의 최적 위치는 각 관할구역에서의 최대 거리와 허브 간의 거리들을 고려하여, 문제 (2.8)과 같이 정의할 수 있다. 이 문제를 통해 네 허브 간의 거리와 각 허브의 관할구역 내 최대 거리를 동시에 최소화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } z = & \max_{c_1 \in \mathcal{R}_1, c_2 \in \mathcal{R}_2, c_3 \in \mathcal{R}_3} (z_{c_1}, z_{c_2}, z_{c_3}, z_{c_4}, d_{c_1 c_2}, d_{c_1 c_3}, d_{c_1 c_4}, d_{c_2 c_3}, d_{c_2 c_4}, d_{c_3 c_4}) \\ \text{subject to } & z_{c_1} = \max_{v \in \mathcal{R}_1} (d_{c_1 v}), \quad \forall c_1, v \in \mathcal{R}_1, v \neq c_1 \\ & z_{c_2} = \max_{v \in \mathcal{R}_2} (d_{c_2 v}), \quad \forall c_2, v \in \mathcal{R}_2, v \neq c_2 \\ & z_{c_3} = \max_{v \in \mathcal{R}_3} (d_{c_3 v}), \quad \forall c_3, v \in \mathcal{R}_3, v \neq c_3 \\ & z_{c_4} = \max_{v \in \mathcal{R}_4} (d_{c_4 v}), \quad \forall c_4, v \in \mathcal{R}_4, v \neq c_4 \end{aligned} \quad (2.8)$$

최적화 문제의 결과는 Table 2에 제시하였으며, 최적의 네 허브 위치와 최소화된 거리를 도출하였다. 최소 거리는 각 허브와 관할구역 내에 있는 다른 지역 이동, 그리고 허브 간의 이동이 모두 가능한 거리를 의미한다.

Table 2 Four hub operation result

z [km]	c1 (Hub1)	c2 (Hub2)	c3 (Hub3)	c4 (Hub4)
10.92	종로구	성동구	서대문구	동작구

Figure 10에 네 허브의 위치와 해당 허브의 관할구역을 시각적으로 나타내었다.

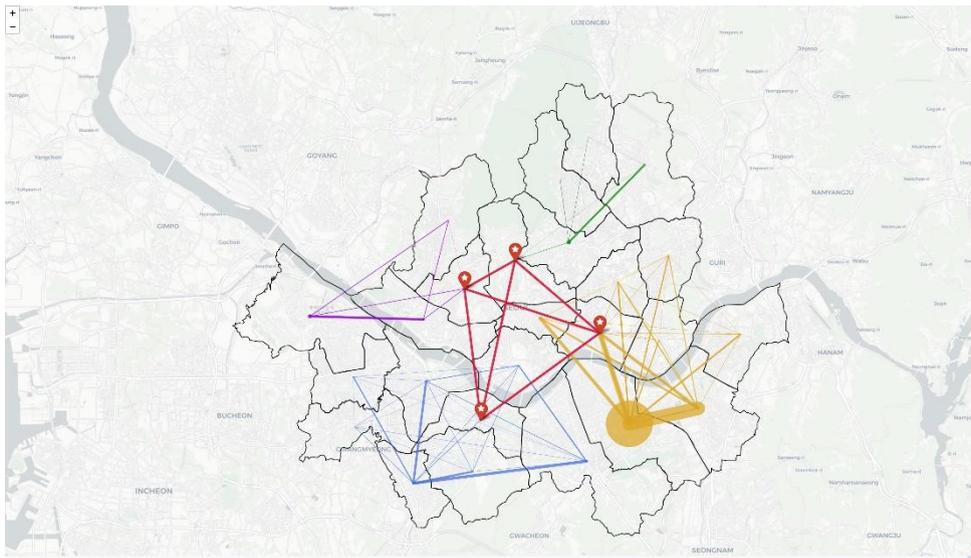


Figure 10 Four hub locations and their regions

2.3 경로 네트워크 물류 데이터 처리 방법

2.3.1 배송 경로 탐색 방법

본 연구에서는 경로 네트워크 내 배송 경로를 탐색하기 위해 DFS 알고리즘을 활용하였다. DFS 알고리즘은 허브에서 시작하여 가능한 모든 경로는 탐색한 뒤, 최적 경로를 찾기 위해 백트래킹을 수행하는 방식이다. 이 때, 백트래킹은 모든 가능한 경우의 수를 탐색하는 과정에서 특정 조건에 의해 알고리즘을 중지하는

기법으로 재귀 알고리즘을 사용한다. 이 방법은 메모리 사용 효율이 높고, 경로 탐색을 통한 배송 시스템 설계에 유용하다.

DFS 알고리즘에서는 다음과 같은 제약 조건을 설정하였다:

1. 출발지와 도착지가 같은 경우, 지역 중심점과 최외곽 지점까지의 거리로 계산
2. 허브에서 출발 후 허브로 복귀
3. 드론 비행 가능 거리는 단일 및 다중 허브 운영 시 최소화된 거리의 두 배로 설정

DFS 알고리즘은 드론 배송 경로 설정 시, 단일 및 다중 허브 운영에서 최소화된 거리를 기준으로 탐색을 진행하며, 종료 조건을 초과하지 않으며 알고리즘이 종료된다. Table 3은 각 허브 운영의 종료 조건을 요약한 것이다.

Table 3 Termination condition for DFS algorithm

Hub	Min distance [km]	Termination condition [km]
1	15.26	30.52
2	13.15	26.30
3	11.65	23.30
4	10.92	21.84

따라서, 경로 탐색 결과, 방문 지역의 수에 따라 경로를 Level을 구분할 수 있으며, 각 경로는 허브에서 출발하여 허브로 복귀하는 방식으로 비행 가능 거리를 초과하지 않도록 설정되었다. Figure 11은 DFS 알고리즘을 활용하여 생성된 Level별 경로 탐색 과정을 시각적으로 나타내었다. 추가적으로, Level 2 이상부터 두 지역 간의 거리가 종료 조건을 초과하는 경우가 존재한다. 이 경우에는, 허브를 경유하도록 경로를 설정하였다.

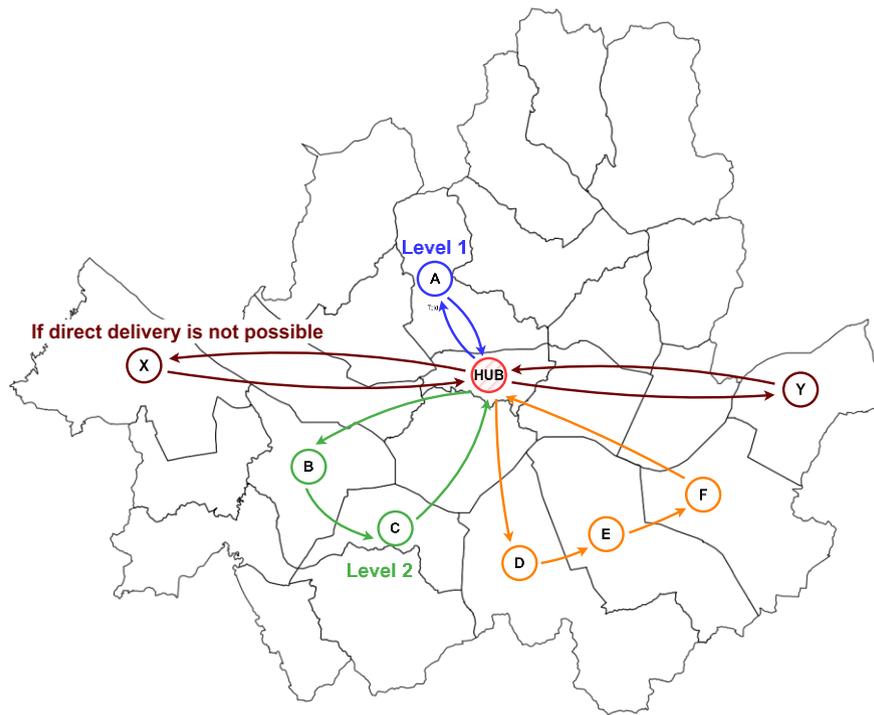


Figure 11 Route finding using DFS algorithm

Figure 12~15은 단일 및 다중 허브 운영 별 DFS 알고리즘 결과를 도시하였다. 분석 결과, 관할구역이 세분화됨에 따라 최대 Level이 감소하고, 전체 경로 수도 감소하는 경향을 확인하였다. 그러나 해당 결과는 관할구역 간 배송하는 경우를 고려하지 않은 결과이며, 서울시 전체를 대상으로 한 완전한 배송 경로를 구성하기 위해서는 허브를 경유해야 하는 추가적인 경로 설정이 필요함을 보여준다.

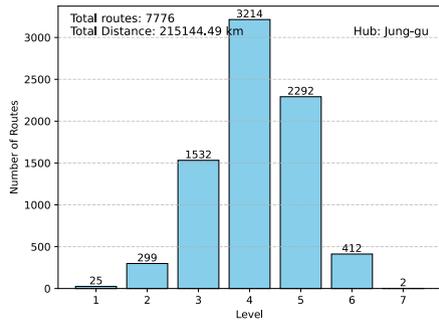


Figure 12 Number of one hub route by level

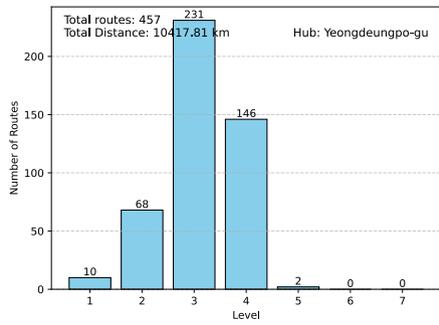
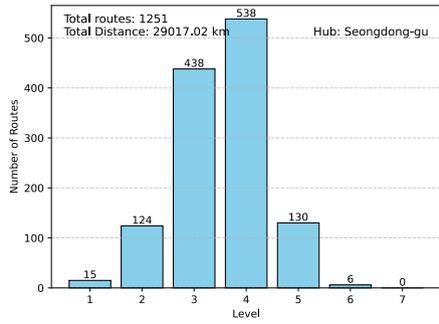


Figure 13 Number of two hub route by level

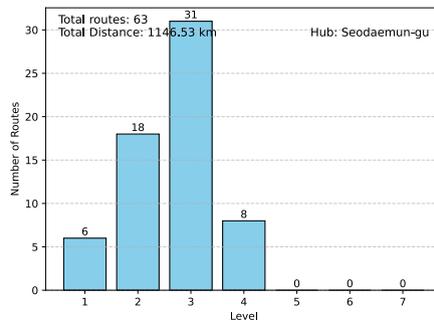
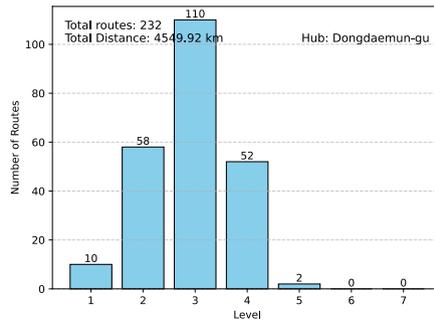
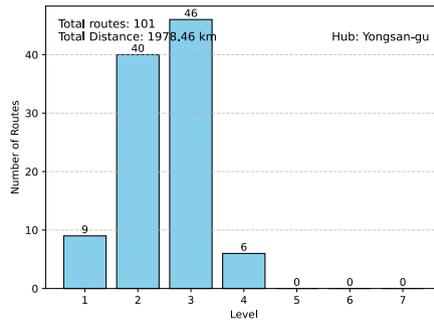


Figure 14 Number of three hub route by level

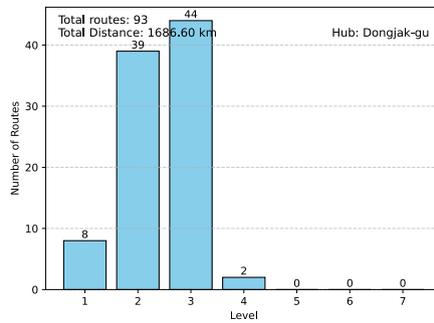
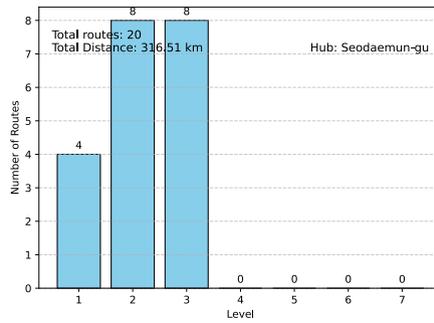
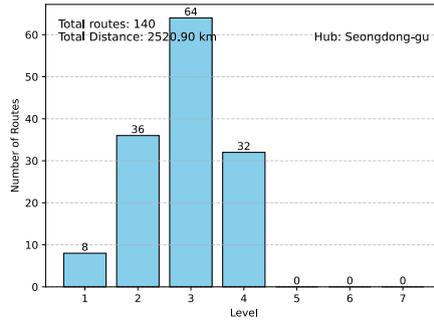
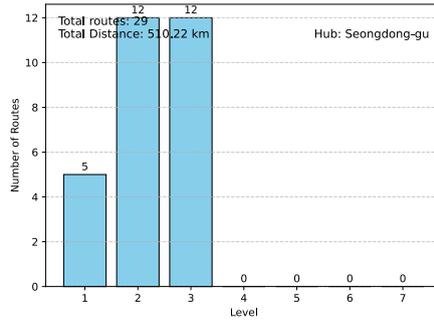


Figure 15 Number of four hub route by level

2.3.2 경로 사용 빈도 최적화

25개의 출발지 및 도착지로 전처리된 데이터를 바탕으로, 드론 배송 시스템을 적용하기 위해 한 달 동안 발생하는 물류량의 1%를 처리한다고 가정하였다. 이를 기반으로, 25개 지역에 대해 출·도착 조합 $OD \in \mathbb{R}^{625}$ 와 물류 데이터 $k \in \mathbb{R}^{625}$ 를 생성하였다. 생성된 각 경로는 지역 방문 횟수와 허브 복귀를 고려해 Level+1개의 데이터를 처리한다. Figure 16은 관할구역 내의 경로에서 데이터를 처리하는 방법을 보여준다.



Figure 16 Delivery method (Level 3)

다중 허브 운영에서는 관할구역 간의 배송은 허브를 경유하여 이루어지며, 드론 비행 가능 거리 조건에서 직접 배송이 불가능한 경우를 나타낸다. 대전제로, 허브의 수가 4개 이상인 경우 3개의 허브를 경유할 수 없음을 가정하였다. 이 경우 허브 간 경유 조건과 Level 1 경로 두 개를 결합하여 새로운 경로를 생성하였다. Figure 17은 A 지역과 C 지역이 다른 관할구역에 존재하는 경우, Hub1과 Hub2를 경유하여 데이터를 처리하는 방법을 시각적으로 나타낸다.

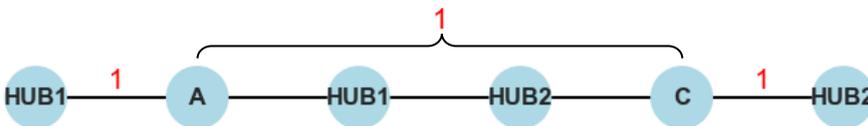


Figure 17 Delivery method through hubs

DFS 알고리즘으로 도출된 경로와 허브를 경유하는 경로를 포함하여 최종 경로 행렬 $R \in \mathbb{R}^{route \times 625}$ 을 생성하였다. R 행렬은 식 (2.9)와 같이 각 경로와 출·도착 조합 간의 관계를 정의한다.

$$R_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{if } OD \text{ exists in route} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9)$$

여기서 m 은 단일 및 다중 허브에 따른 경로의 개수, n 은 OD 의 조합인 625개를 의미한다. Figure 18은 생성된 경로 행렬의 예시를 보여준다.

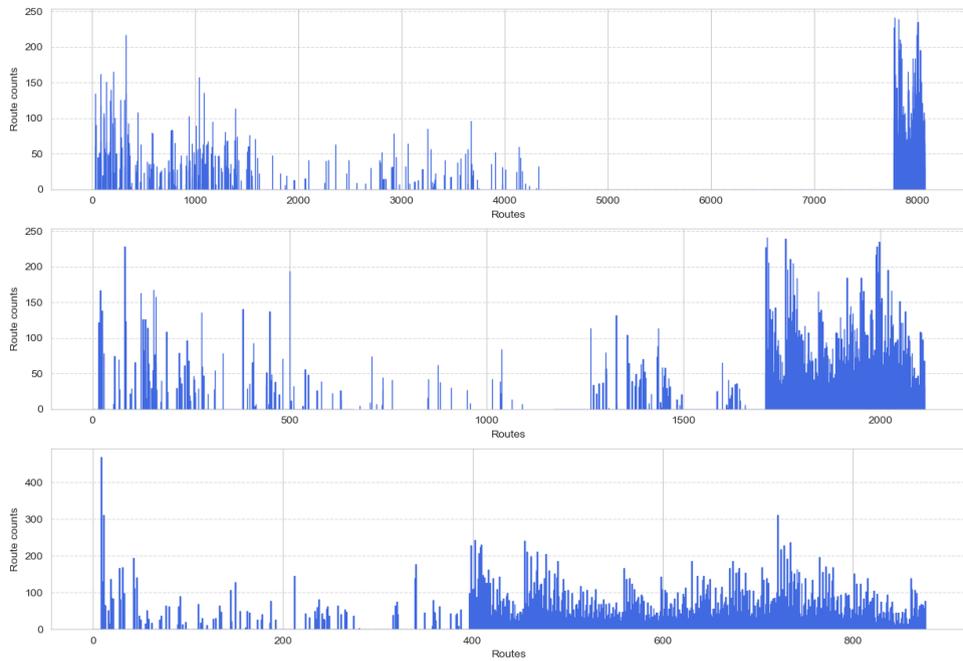
Route/OD	(강남구, 강남구)	(노원구, 강남구)	...	(영등포구, 중구)
Route₁	1	0		1
Route₂	0	0	0 or 1	0
Route₃	1	1		0
...	0	1		1
Route_m	1	0		1

Figure 18 An example R matrix

경로 이용 횟수를 최적화하기 위해 선형계획법(Linear Programming, LP) 문제를 적용하였다. LP는 선형 목적 함수와 제약 조건을 만족하는 최적의 해를 찾는 문제로, 본 연구에서는 모든 경로를 사용하지 않더라도 물류 데이터에 대한 처리가 가능하다. 결과적으로 경로 이용 횟수 최적화 문제는 문제 (2.10)과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } \mathbf{1}^T x \\
& \text{subject to } R^T x \geq k \\
& \quad x \geq 0
\end{aligned} \tag{2.10}$$

정의한 문제를 통해 단일 및 다중 허브 운영 모델에 적용하였고, 산출된 결과를 Figure 19에 도시하였다. x 축은 생성된 경로의 수이며, y 축은 경로 이용 횟수를 나타낸다. 결과를 통해 허브의 수가 증가함에 따라 전체 경로의 수는 감소하지만, 허브를 경유하는 경로가 더 많이 생성된 것을 확인할 수 있고, 해당 경로를 많이 사용되는 것을 확인하였다.



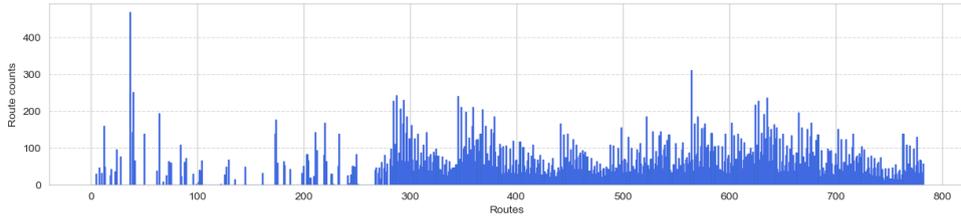


Figure 19 Route usage count by Linear Problem

Figure 20은 허브 운영 모델에 따라 경로 이용 횟수를 비교한 결과를 나타낸다. LP 문제를 통해 도출한 결과는 실수 범위로 계산되기 때문에, 모든 원소를 올림 처리하여 최종 경로 이용 횟수를 산출하였다.

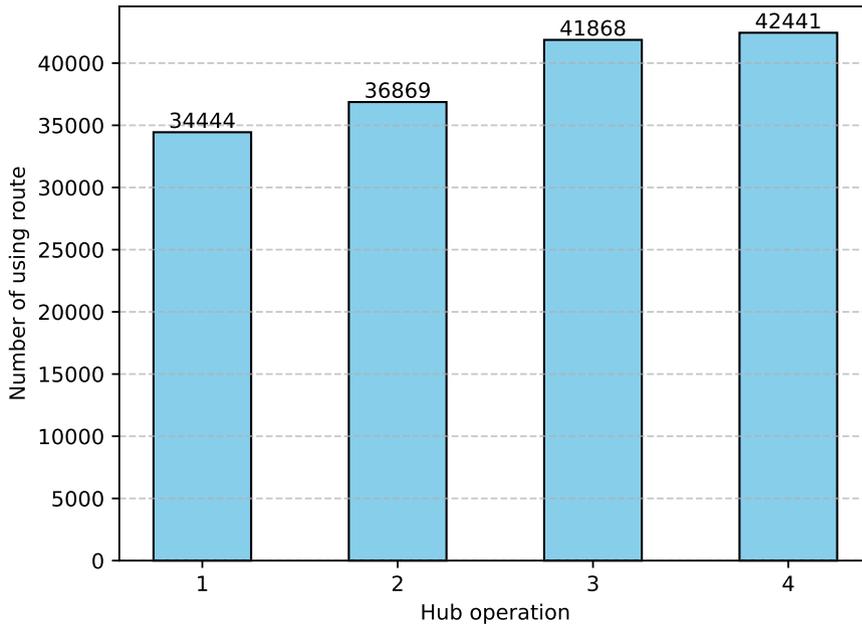


Figure 20 Route usage count

또한, 허브 운영 모델에 따라 최소화된 거리, 전체 경로의 수, 그리고 LP 문제를 통해 도출된 사용 경로 수를 비교하여 Figure 21에 나타내었다. 전체 생성된 경로의 수와 최소화된 거리는 선형적으로 감소하지만, 문제를 통해 산출된 최적 경로의 수는 허브의 수에 관계없이 일정한 경향을 유지하는 것을 확인하였다.

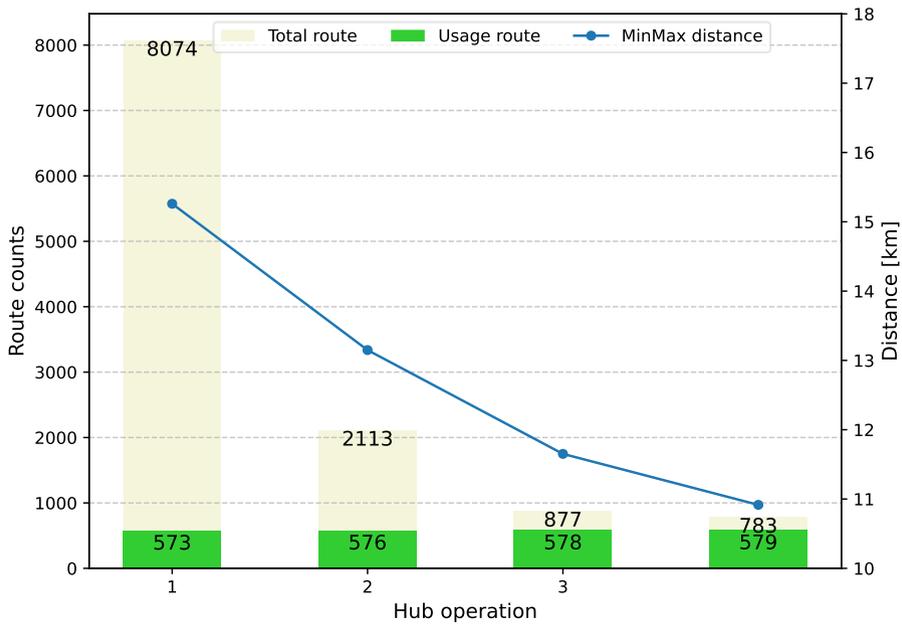


Figure 21 Comparison total route to using route

제 3 장. 물류배송 드론 설계

3.1 전기 추진 시스템 멀티로터 드론 설계

멀티로터 드론의 전기 추진 시스템은 프로펠러, 모터, 변속기(Electric Speed Controller, ESC), 배터리로 구성되며, 전체적인 동작 흐름은 Figure 22에 나타나 있다. ESC는 배터리로부터의 공급된 전압과 전류를 변환하여 모터가 요구하는 전압과 전류로 전달하는 장치이다. 모터는 전기 에너지를 기계적 회전 운동으로 변환하여 특정 회전속도(RPM)와 토크를 생성하며, 이를 통해 프로펠러를 회전시킨다.

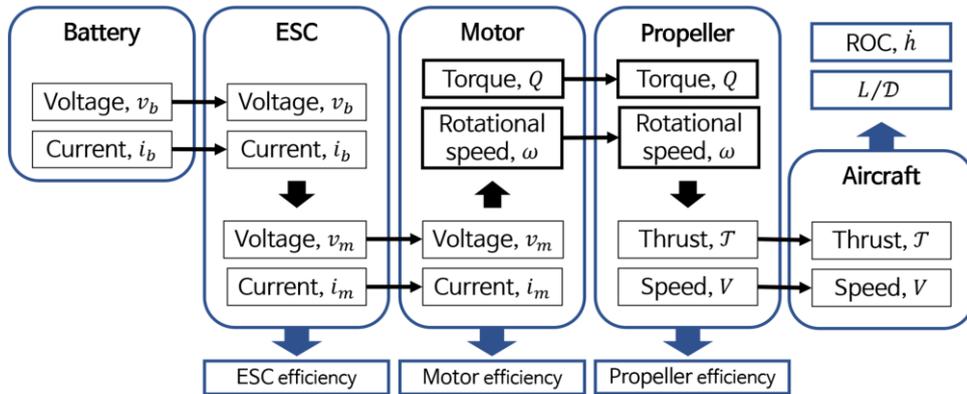


Figure 22 Electric propulsion system flow [10]

본 연구에서는 허브 운영 모델의 최소 비행 거리를 충족하는 멀티로터 드론을 설계하였다. 설계 과정에서 드론의 페이로드(Payload)는 1 kg으로 설정하였으며, 상용화된 모델을 참고하여 설계에 필요한 주요 파라미터를 도출하였다. 단일 허브 운영의 드론을 설계하기 위한 해당 파라미터는 Table 4에 제시하였고,

전체 드론의 무게는 식 (3.1)와 같이 계산된다.

Table 4 One hub drone design parameter

Parameter	Value
N_{prop}	4
N_{batt}	2
M_{batt}	2.57
M_{frame}	3
M_{motor}	0.35
$M_{payload}$	1
C_l	0.193
C_d	0.425

$$M_{drone} = N_{batt}M_{batt} + M_{frame} + M_{payload} + N_{prop}M_{motor} \quad (3.1)$$

Table 4에서 제시된 C_l 과 C_d 는 기체의 형상에 크게 의존하므로 초기 설계 과정에서 상수로 가정하여 단순화할 필요가 있다. 이를 위해 전진 비행에 최적화된 공기역학적 설계를 가진 SUI Endurance 드론 모델을 참고하여 초기 설계의 기준으로 활용하였다[11]. 또한, 설계할 드론의 세부 제원은 Table 5에 제시되어 있다.

Table 5 Detailed specification of the drone [12]

Component	Specification
Propeller	29 x 9.5 prop
Motor	KV100, Maximum power: 1873 W
Battery	6 Cell, 30 Ah Lithium-ion

배터리의 에너지 밀도는 배터리의 부피 대비 저장할 수 있는 에너지를 의미하

며 식 (3.2)과 같이 계산되며, 드론의 전력 용량은 식 (3.3)과 같다.

$$\rho_{batt} = \frac{Ah \text{ (capacity)} \times V \text{ (nominal voltage)}}{M_{batt}} \quad (3.2)$$

$$E_{batt} = \rho_{batt} M_{batt} N_{batt} \quad (3.3)$$

본 연구에서는 모터 제조사에서 제공된 정적 추력 측정 데이터를 활용하여 모터와 프로펠러의 성능을 계산하였다. T-motor사의 “MN8012 KV100” 모터와 “29x9.5 Prop” 프로펠러를 사용하여 측정한 RPM에 따른 추력과 토크를 Figure 23에 도시하였다.

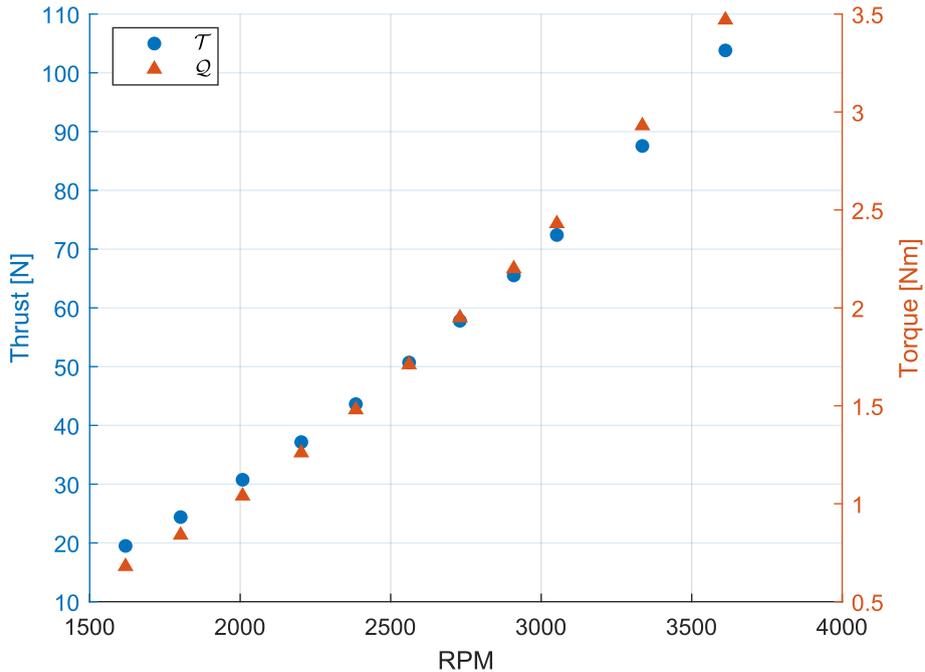


Figure 23 KV100 motor & 29x9.5 prop static data

드론은 크게 호버링(Hovering) 상태와 전진 비행 상태로 구분된다. 본 연구에서는 호버링 상태 드론의 성능을 분석한 후, 이를 기반으로 전진 비행 드론을 설계하였다.

3.1.1 호버링 성능 분석

전진 비행 상태의 드론은 높은 받음각에서 프로펠러 전진 계수(J)에 따른 추력계수(C_T)와 동력계수(C_P)의 변화가 미미하다[10]. 이를 기반으로, 본 연구에서 식 (3.4)과 같이 C_T 와 C_P 를 정적 상태의 상수로 단순화하여 가정하였다.

$$\begin{aligned} C_T(J) &\approx C_{T_0} \\ C_P(J) &\approx C_{P_0} \end{aligned} \quad (3.4)$$

측정 추력(\mathcal{T})과 토크(Q)를 이용해, 식 (3.5)를 통해 C_T 와 C_P 를 계산하였다. 해당 결과는 Figure 24에 시각적으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} C_T &= \frac{\mathcal{T}}{\rho n^2 D^4} \\ C_P &= \frac{P}{\rho n^3 D^5} \end{aligned} \quad (3.5)$$

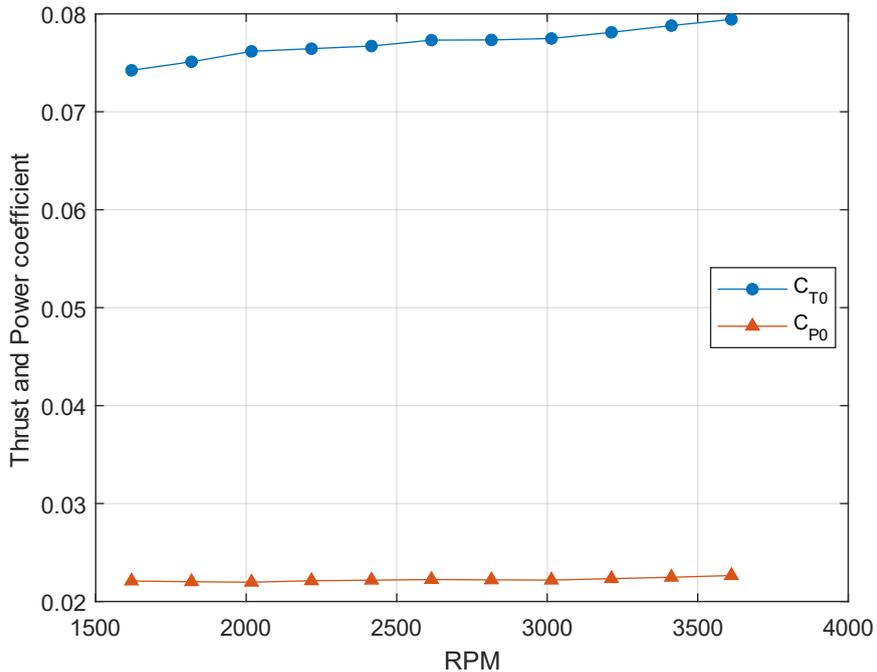


Figure 24 Thrust and Power coefficient

전기 추진 시스템에서 각 부품의 효율은 드론 성능에 큰 영향을 미치므로, 높은 효율을 유지하는 것이 중요하다. 호버링 상태에서는 비행 속도가 0이므로, 일반적인 프로펠러 효율을 정의할 수 없으며, Figure-of-Merit(FM)으로 대체하여 프로펠러 효율의 지표로 사용한다. FM은 프로펠러나 로터의 공기역학적 성능을 평가하는 간단하면서도 유용한 척도로, 설계 최적화 과정에서 중요한 역할을 한다. FM은 식 (3.6)과 같이 정의되며, 프로펠러 또는 로터에 의해 소모되는 전체 실제 전력 대비 추력을 생성하는 데 필요한 이론적인 유도 전력을 나타낸다. 일반적으로, 잘 설계된 프로펠러의 FM 값은 70%에서 80% 사이이다.

$$FM = \frac{P_{ind}}{P_{total}} \quad (3.6)$$

정적 추력 측정 데이터를 기반으로, 모터의 효율은 식 (3.7)을 통해 계산하였으며, RPM에 따른 모터 효율을 Figure 25에 나타내었다.

$$\eta_{motor} = \frac{Q\omega}{vi} \quad (3.7)$$

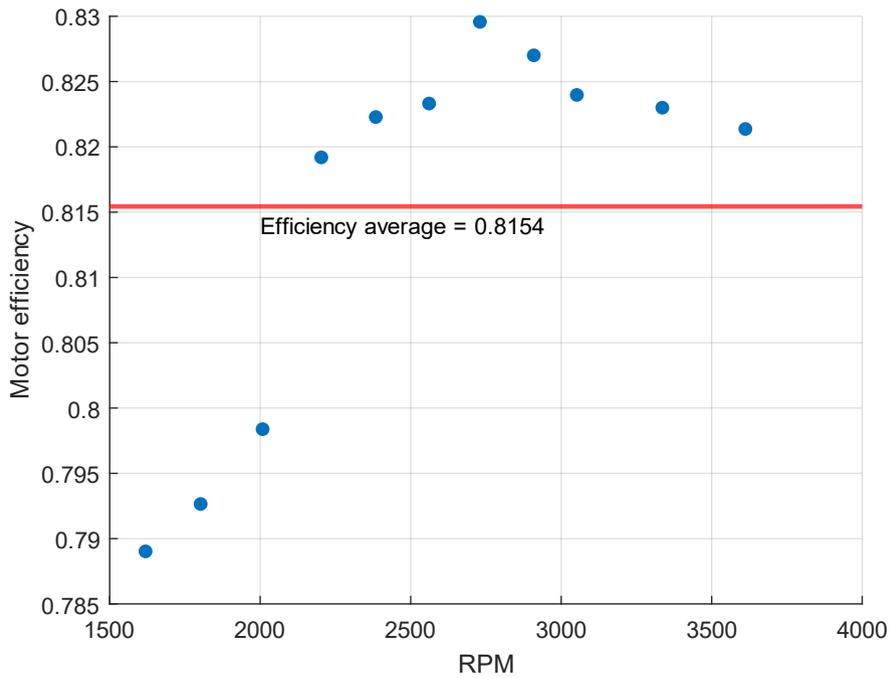


Figure 25 Motor efficiency

호버링 성능 분석에서 사용한 프로펠러 및 ESC 효율 값은 Table 6에 요약하였다.

Table 6 Hovering efficiency parameter

Parameter	Value
$\eta_{prop}(FM)$	0.7
η_{esc}	0.9

호버링 상태에서 드론은 중력과 추력이 힘의 평형을 이루어야 한다. 따라서, 호버링 상태의 힘 평형 방정식은 식 (3.8)과 같이 기술된다.

$$M_{drone} = \mathcal{T} = 2\rho A u_h^2 \quad (3.8)$$

여기서 A 는 프로펠러 디스크 면적이며, u_h 는 유도 속도이다. 계산된 추력을 기반으로 정적 추력 측정 데이터를 보간하여 호버링 상태에서 드론의 성능을 도출하였다. Table 7은 계산된 성능을 보여준다.

Table 7 Hovering operation performance

Parameter	Value
$\mathcal{T}[N]$	25.8494
RPM	1851
$Q[Nm]$	0.8851
$v[V]$	47.7068
$i[A]$	4.5371
η_{motor}	0.7927

드론이 호버링 상태에서 요구하는 전력은 식 (3.9)을 통해 계산되며, 이는 이론적으로 필요한 최소 전력을 나타낸다.

$$P_{hover} = \frac{N_{prop} T u_h}{FM \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{esc}} = 1030.2 [W] \quad (3.9)$$

3.1.2 단일 허브 운영 전진 비행 드론 모델

드론의 전진 비행 상태는 드론이 일정한 속도로 이동하면서 발생하는 공기역학적 힘과 에너지를 분석해야 한다. 이 상태에서는 추력이 수직 성분과 수평 성분으로 분리되며, 드론의 프로펠러 받음각(α)에 따라 추력의 분포가 달라진다. 전진 비행 중 드론에 작용하는 힘은 식 (3.10)~(3.11)로 기술할 수 있으며, 이를 Figure 26으로 시각화하였다.

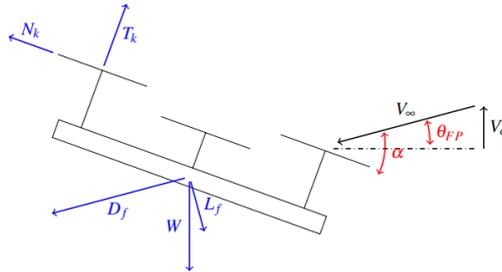


Figure 26 Quadcopter aerodynamic forces in forward flight

$$\sum_{k=1}^{N_{prop}} T_k \cos(\alpha - \theta_{FP}) + N_k \sin(\alpha - \theta_{FP}) - D_f \sin \theta_{FP} - W - L_f \cos \theta_{FP} = 0 \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{prop}} T_k \sin(\alpha - \theta_{FP}) + L_f \sin \theta_{FP} - D_f \cos \theta_{FP} - N_k \cos(\alpha - \theta_{FP}) = 0 \quad (3.11)$$

고정익 항공기와 달리 드론에서는 유도항력(Induced drag)보다 유해항력

(Parasite drag)이 매우 크고, 동체에 의해 생성되는 양력은 작기 때문에 이를 무시할 수 있다. 따라서, 힘 평형 방정식을 식 (3.12)~(3.13)과 같이 단순화하였다.

$$N_{prop}\mathcal{T} \sin(\alpha) = D_f = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_d \quad (3.12)$$

$$N_{prop}\mathcal{T} \cos(\alpha) = W + L_f = W + \frac{1}{2}\rho V^2 S C_l \quad (3.13)$$

식 (3.12)과 식 (3.13)을 결합하여 식 (3.14)을 도출할 수 있으며, 이를 통해 주어진 추력에 따라 수평 비행이 가능한 받음각을 도출하였다. 추력은 정적 추력 측정 데이터를 3차 스플라인 보간법을 사용해 데이터의 정밀도를 높였다. 이때, 받음각이 허수부인 경우는 물리적으로 비행 조건이 불가능한 상황을 의미하며, 음수인 경우 기체가 수평 비행을 하지 못하는 조건이기 때문에 결과에서 제외하였다.

$$\left[\left(\frac{C_l}{C_d} \right)^2 (N_{prop}\mathcal{T})^2 - W^2 \right] \tan^2 \alpha - 2 \left(\frac{C_l}{C_d} \right) (N_{prop}\mathcal{T})^2 \tan \alpha + [(N_{prop}\mathcal{T})^2 - W^2] = 0 \quad (3.14)$$

받음각은 드론의 이동 경로에 직면하는 동체 면적을 변화시킨다. 따라서, 드론의 윗면과 앞면에 Scaling law를 적용하여 받음각에 따른 동체 면적을 계산하였다. 참조 모델은 T-motor사의 “M1200”을 사용하였으며, 드론 앞면에 화물 탑재가 가능한 캐리어 면적을 반영하여 식 (3.15)~(3.16)을 통해 면적을 산출하였다.

$$S_{top} = S_{top,ref} \left(\frac{M_{drone}}{M_{ref}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$S_{front} = S_{front,ref} \left(\frac{M_{drone}}{M_{ref}} \right)^{\frac{2}{3}} + S_{front,carrier} \quad (3.15)$$

$$S = S_{top} \sin(\alpha) + S_{front} \cos(\alpha) \quad (3.16)$$

그 결과, 드론의 윗면 면적 S_{top} 은 0.2902 m^2 , 앞면 면적 S_{front} 은 0.3720 m^2 로 계산되었으며, Figure 27에서 드론의 세부 치수를 자세히 제시하였다.

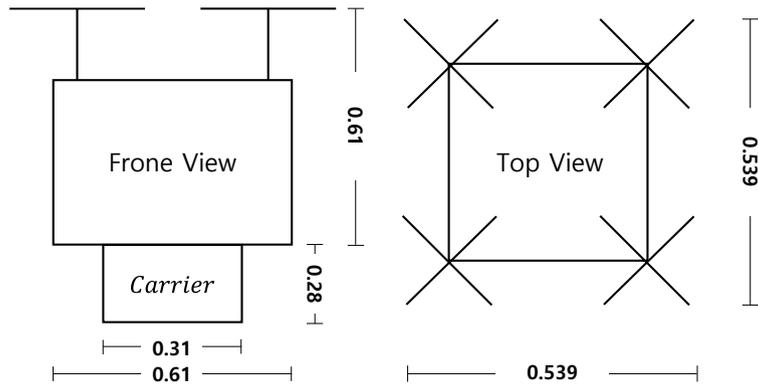


Figure 27 Drone front and top dimensions[m²] in 1 Hub

추력 데이터로부터 산출한 받음각은 Figure 28에 도시하였다. 허수부 및 음수인 받음각은 모두 제외하였다.

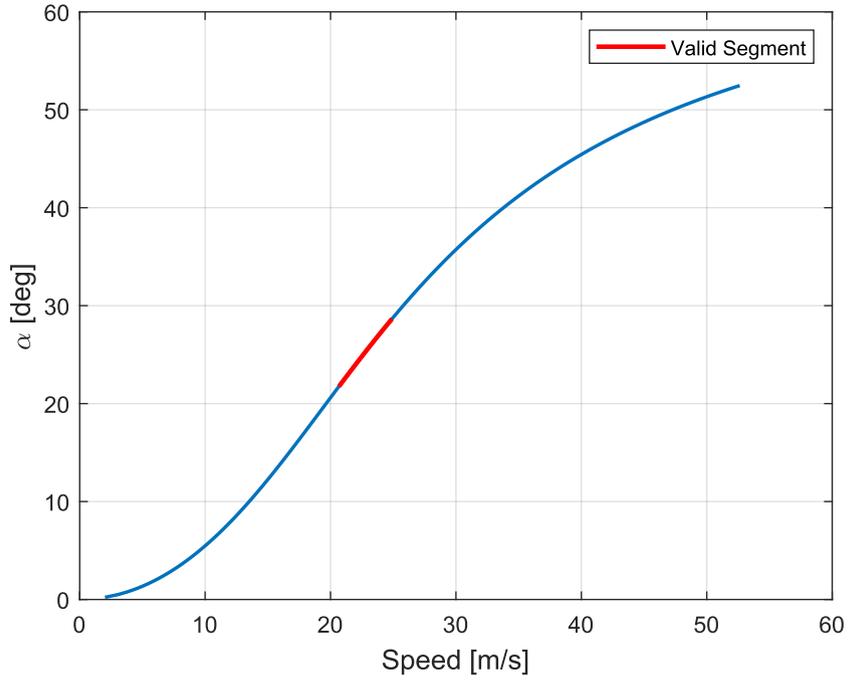


Figure 28 Incidence angle in level-flight condition

산출한 받음각과 추력을 이용하여 수평 비행 속도(V), 전력 소모량(P), 비행 시간(t_e), 그리고 비행 가능 거리(d_r)를 식 (3.17)으로 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 V &= \sqrt{\frac{2N_{prop}T \sin \alpha}{\rho S C_d}} \\
 P &= \frac{DV}{\eta_{motor}\eta_{esc}\eta_{prop}} \\
 t_e &= \frac{E_{batt}}{P} \\
 d_r &= Vt_e
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

설계 결과는 다음과 같은 제약 조건을 충족해야 한다:

1. 받음각은 음수가 아닌 실수여야 한다.
2. 단일 허브 운영 모델에서 요구되는 최소 비행 거리를 만족해야 한다.
3. 전력 소모량은 호버링 상태에서 요구되는 전력보다 크고, 모터의 최대 출력 전력보다 작아야 한다.

위 조건을 만족하는 전진 비행 상태의 드론 모델 설계 결과는 Figure 29에 나타나었다.

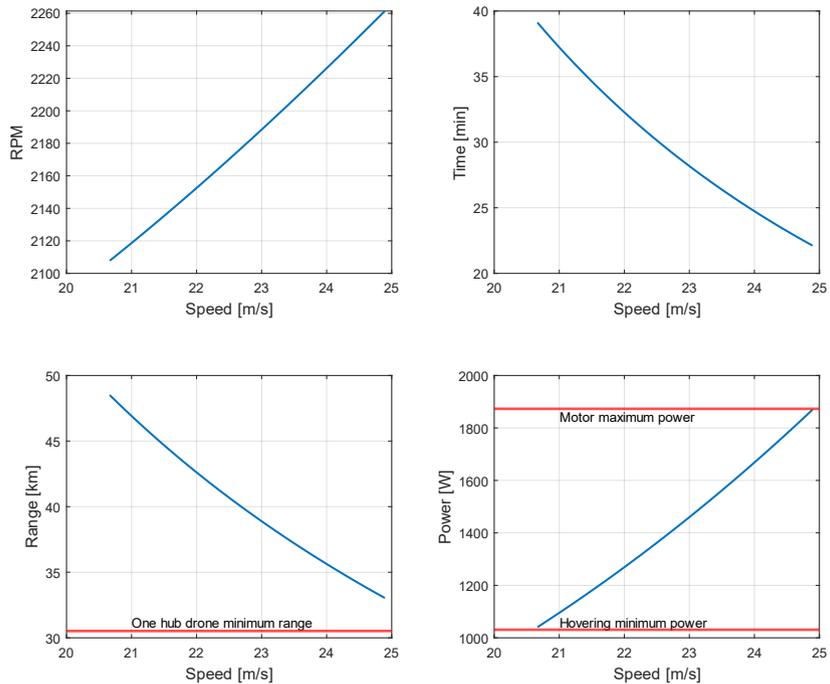


Figure 29 Forward flight drone results

3.1.3 세 허브 운영 전진 비행 드론 모델

본 절에서는 3.1.1~3.1.2절에서 제시한 드론 모델 설계 방법을 바탕으로, 세 허브 운영 모델에 적합한 드론 모델을 설계하였다. 허브의 수가 증가하면 단일 허브 운영에 비해 최소 비행 가능 거리가 감소한다. 결과적으로, 드론의 성능 요구가 줄어들어 드론 운용의 효율성을 높일 수 있다. 세 허브 운영 모델에서 최소 비행 가능 거리는 23.30 km이다. 본 연구에서는 참조 드론 모델은 동일하게 유지하면서, 드론 총 중량에 따라 크기를 조정하고 배터리 용량을 변화시켜 허브 운영 모델 간의 차이를 비교하였다. 변경된 배터리 성능과 설계 파라미터는 Table 8에 요약하였고, 드론의 세부 치수는 Figure 30과 같다.

Table 8 Battery specifications

Component	Specification
Battery	6 Cell, 22 Ah Lithium-ion
M_{batt}	1.98
$S_{top}[\text{m}^2]$	0.2681
$S_{front}[\text{m}^2]$	0.3503

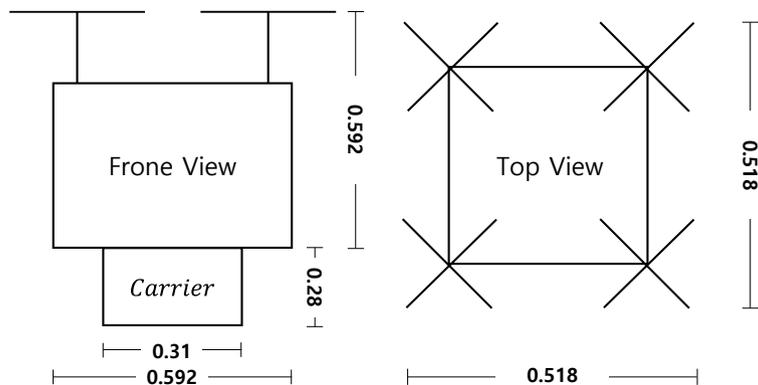


Figure 30 Drone top and front dimensions $[\text{m}^2]$ in 3 Hub

배터리 용량이 감소함에 따라 배터리의 총 용량과 무게가 감소하였다. 프로펠러와 ESC 효율을 Table 6을 바탕으로 호버링 상태에서 드론의 성능을 도출하여 Table 9에 요약하였다.

Table 9 Hovering operation performance in 3 Hub

Parameter	Value
T [N]	22.9554
RPM	1752
Q [Nm]	0.7949
v [V]	47.7142
i [A]	3.8498
η_{motor}	0.7938

전진 비행 상태의 드론 모델을 계산하여 비행 속도에 따른 받음각과 드론 성능을 Figure 31~32에 도시하였다.

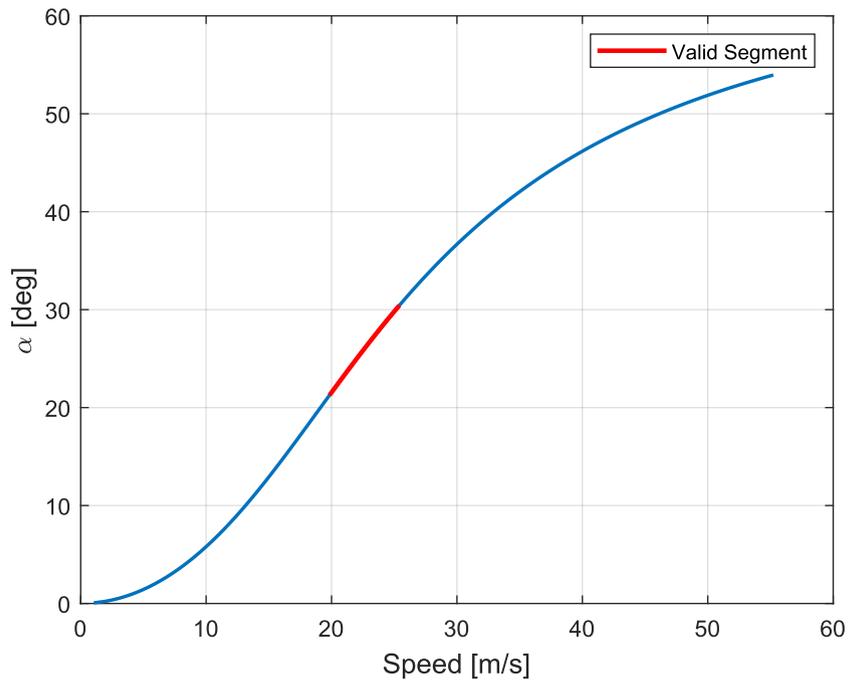


Figure 31 Incidence angle in 3 Hub

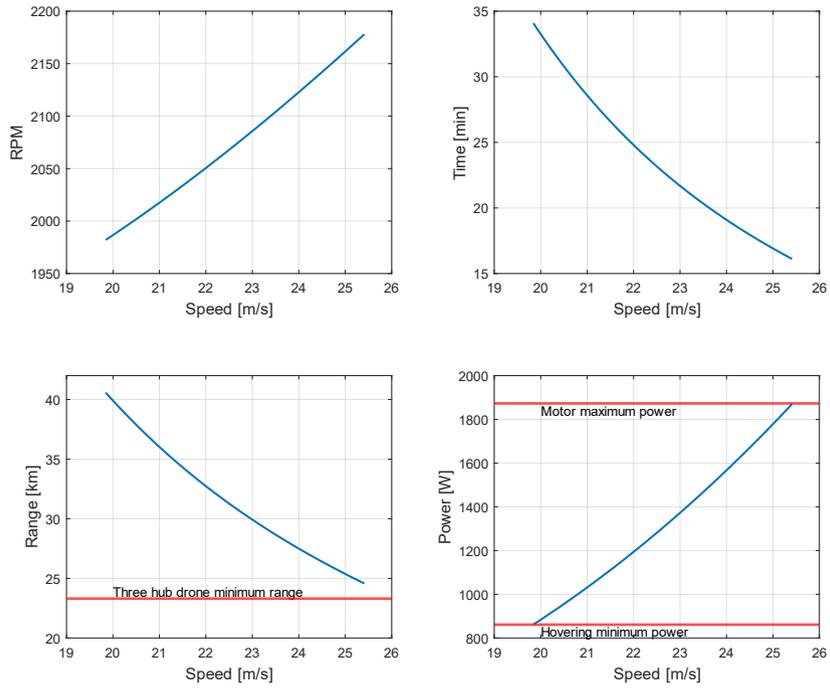
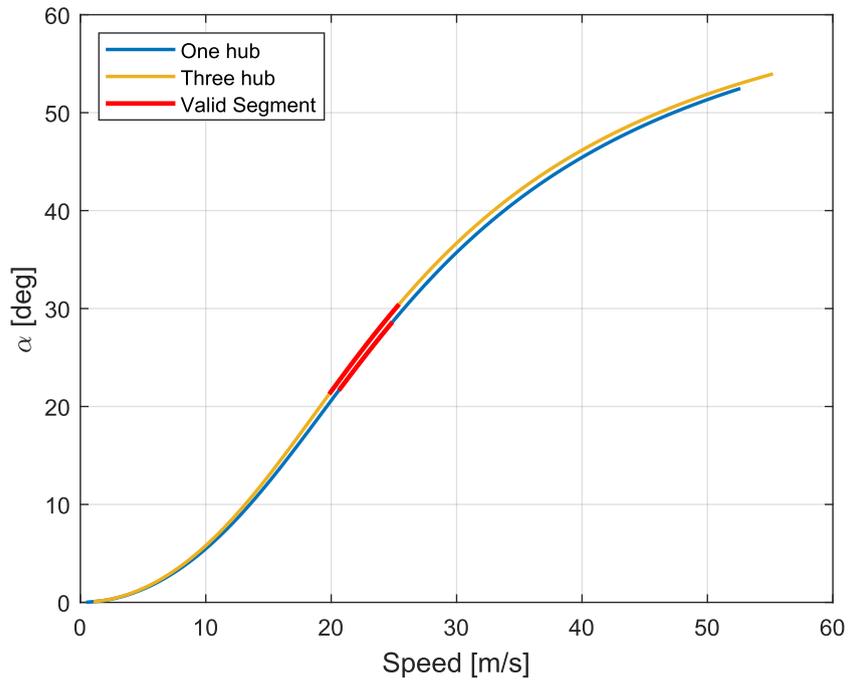


Figure 32 Forward flight drone results in 3 Hub

배터리 용량이 감소하면서 최대 비행 거리와 비행 시간이 감소하였다. 그러나, 배터리 무게의 감소로 호버링 상태의 요구 전력이 줄어들었고, 비행 속도 범위가 넓어진 것을 확인할 수 있다.

단일 허브와 세 허브 운영 모델에 따라 도출한 드론 모델의 성능을 비교하여 Figure 33에 시각적으로 나타내었다.



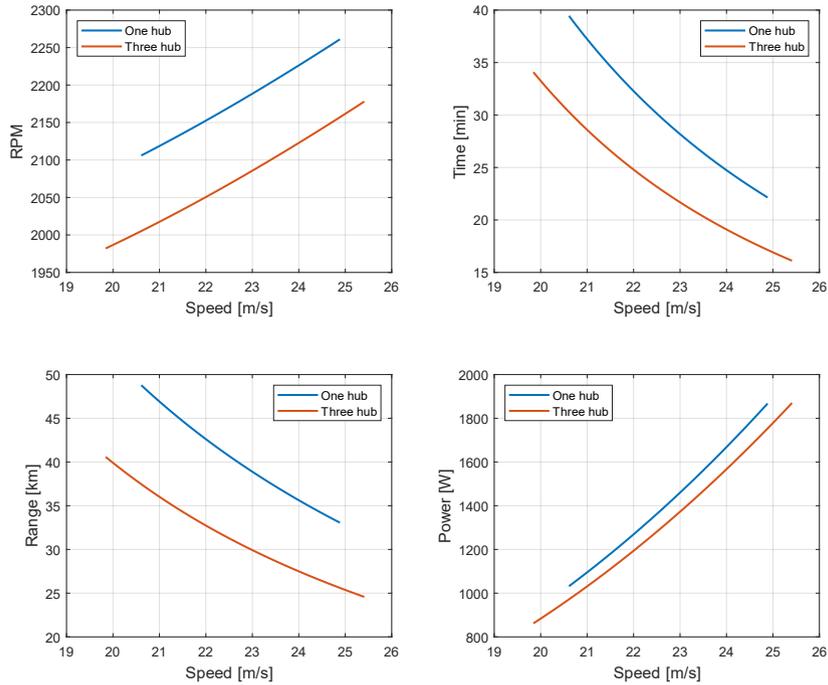


Figure 33 Comparison performance between 1 Hub and 3 Hub

Figure 33에서 세 허브 운영 모델이 더 넓은 속도 범위에서 비행이 가능함을 확인하였다. 허브의 수가 증가하면서 요구되는 최대 비행 거리가 단축되고, 비행 시간이 줄어들었다. 동시에, 배터리 무게의 감소로 드론의 총 중량이 가벼워졌으며, 이에 따라 넓은 RPM 영역에서의 운용이 가능해지고, 전력 소모량이 절감된 것을 확인할 수 있다.

Table 10은 두 허브 운영 모델에 적합하게 설계된 드론이 긴급 배송 목적으로 운용 가능한 최대 비행 속도에서의 주요 성능을 비교한 결과를 보여준다.

Table 10 Drone performance in 1 Hub and 3 Hub

Hub	$V[m/s]$	$T[N]$	$Q[Nm]$	$v[V]$	$i[A]$	$\alpha[deg]$	$P[W]$	$t_E[min]$	$R[km]$
1	24.9	39.2	1.33	47.6	8.05	28.6	1870	22.1	33.1
3	25.4	36.3	1.23	47.6	7.22	30.4	1870	16.1	24.6

도출된 결과에서 모두 운용 가능하기 때문에 기상 학화 또는 조류 충돌과 같은 돌발상황에서 비행 속도를 줄여 비행 거리를 연장함으로써 허브로 안전하게 복귀할 수 있는 가능성을 확인하였다.

제 4 장. 물류 배송 드론 비용 모델 산출

경로 네트워크 설계와 허브 운용 모델에 따른 드론 모델 설계를 반영하여, 물류배송 드론 운영을 위한 비용 모델을 산출하였다. 배송 드론 운영에는 초기 투자 비용, 운영 비용, 유지보수 비용 등 다양한 요인을 고려해야 한다. 이러한 요소를 바탕으로 드론 물류 시스템 프레임워크를 제시하기 위해 주요 비용 요소로 배터리 충전 비용, 배터리 및 모터 교체 비용, 그리고 드론 구입 비용을 주요 비용 항목으로 포함하였다.

특히, 드론 모델 설계 결과를 활용하여 운용 가능한 속도 범위에서 비용 모델을 비교하였다. 이를 통해 허브의 수와 드론의 운용 속도에 따른 비용 차이를 분석하였다. 비용 모델의 산출 기준을 구체적으로 제시한다:

배터리 충전 비용: 전기 요금 × 전기 사용량 × 보정 계수(Margin)

배터리 교체 비용: 500 cycle 교체

모터 교체 비용: 운용 800시간 교체

드론 구입 비용: 초기 구매

4.1 허브 수에 따른 배터리 충전 비용 산출

배터리는 드론의 비행 시간과 직결되며 물류 배송 시스템에서 중요한 역할을 한다. 일반 드론과 달리 배송을 위한 드론은 페이로드의 무게로 인해 비행 거리가 단축되고, 운용 범위를 늘이기 위해서는 더 많은 용량의 배터리를 요구한다. 이 때, 허브에 복귀한 드론의 배터리를 충전해야 하는데 충전 비용을 고려해야 한다. 본 연구에서는 배터리 충전 시 한국전력공사의 산업용전력 비용을 반영하였다. 전력량요금은 kWh당 금액으로 산정되어 계산된다.

드론 비행 속도와 경로 길이를 통해 경로 별 소모되는 전력량을 계산하였고,

이를 기반으로 경로 이용 횟수를 반영해 경로 전력 소모량(C_{route})를 도출하였다. 이후, 총 전력 소모량(C_{total})은 식 (4.1)을 통해 계산하였다.

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{N_{route}} C_i \quad (4.1)$$

계산 결과인 단일 허브와 세 허브 운영 시 비행 속도에 따른 총 전력 소모량은 Figure 34에 도시하였다.

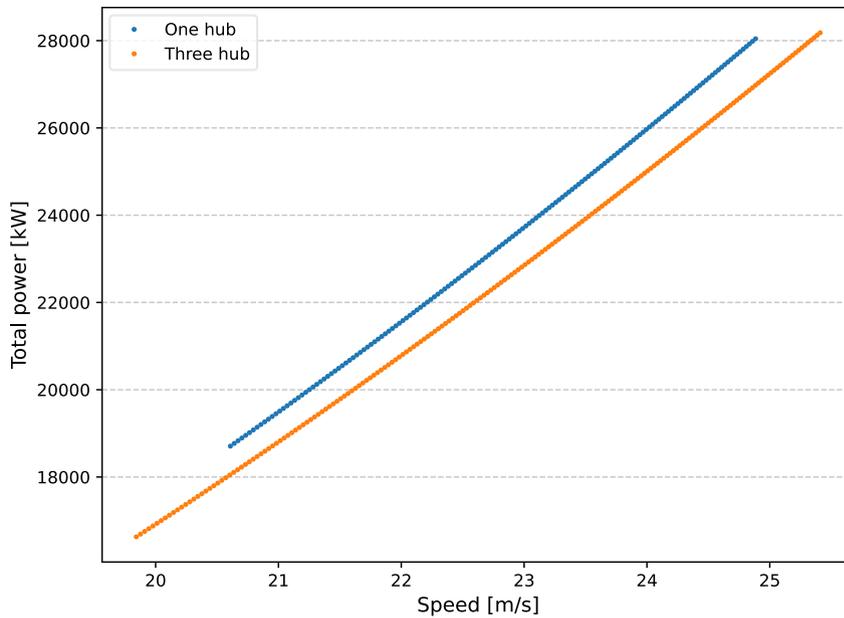


Figure 34 Total power consumption

비행 속도에 따른 배터리 충전 비용을 비교하기 위해 Figure 35에 시각적으로 나타내었다.

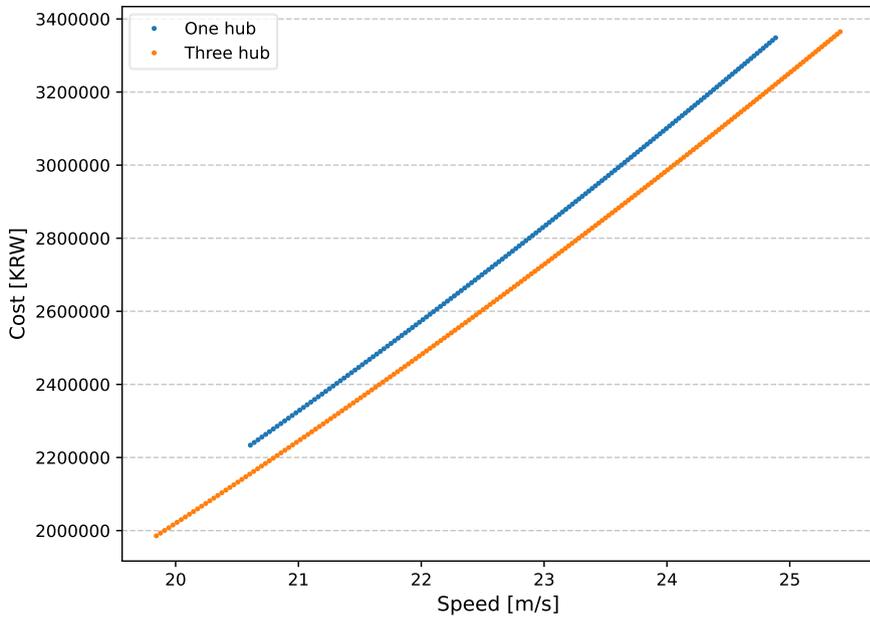


Figure 35 Battery charge cost

단일 허브 운영에 비해 세 허브 운영 시 전력 소모량에 따른 충전 비용이 더 저렴한 결과를 확인하였다.

4.2 배터리 교체 비용 산출

배터리는 사용 과정에서 성능이 저하되고, 일정 사용 주기 이후 교체가 필요하다. 배터리의 충·방전 사이클이 반복될수록 화학적 노화가 진행되어 배터리의

최대 용량이 감소하기 때문에, 제조사는 특정 사이클 수 이상 사용 후 배터리 교체를 권장한다. 일반적으로 배터리는 20% ~ 80% 범위에서 사용하는 것이 성능을 유지하는 효과적인 관리 방안으로 알려져 있다. 하지만, 본 연구에서는 배터리는 완전 충전 및 완전 방전되는 조건을 가정하였으며, 배터리 교체 주기를 500 사이클로 설정하여 비용 모델에 반영하였다.

총 전력 소모량과 드론에 탑재된 총 배터리 용량을 기준으로 충전 횟수를 계산하였고, 이를 통해 교체되는 배터리의 개수를 산출하였다. 산출 결과는 Figure 36에 보여준다.

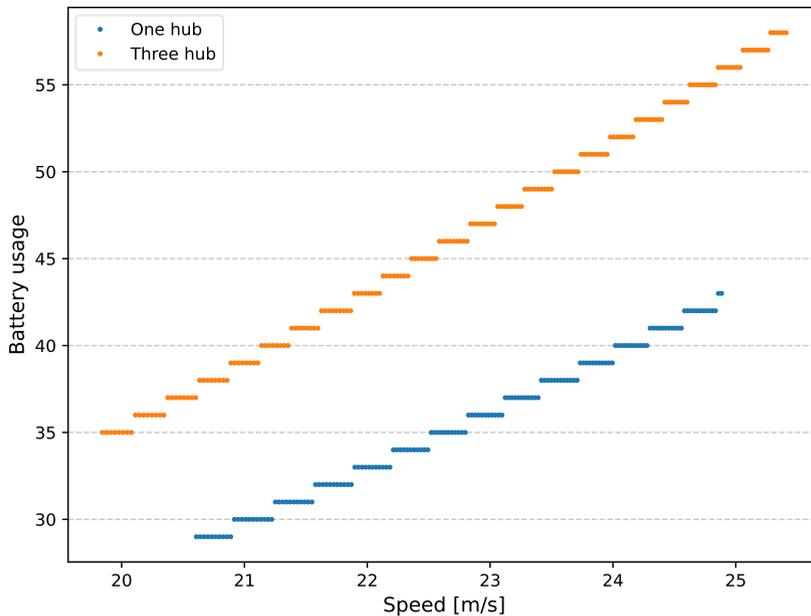


Figure 36 Number of battery replacement

단일 허브 운영 시 소모되는 배터리의 개수가 더 적은 것을 확인할 수 있고,

이는 용량이 큰 배터리를 사용한 결과임을 알 수 있다. 배터리 교체 개수에 따른 배터리 교체 비용을 산출하기 위해 T-drones사의 배터리 비용을 참고하였으며 Table 11에 요약하였다.

Table 11 Battery price reference

Model	Price
Ares 6S 30 Ah	619 USD
Ares 6S 22 Ah	549 USD

4.3 드론 초기 및 모터 교체 비용 산출

4.3.1 드론 초기 구매 비용

드론 비용을 산출하기 위해 상업용 물류배송 드론의 가격을 기반으로 가격 모델 계수를 도출하였다. 곡선 피팅을 사용하여 드론 가격 함수를 도출하였고 식 (4.2)과 같다.

$$f(x) = 0.91x^2 + 112.07x + 1526.01 \quad (4.2)$$

드론의 최대 이륙 중량(Max Take-off Weight, MTOW)이 증가할수록 드론 가격이 증가하는 경향을 보였다. 곡선 피팅 결과는 Figure 37에 보여준다.

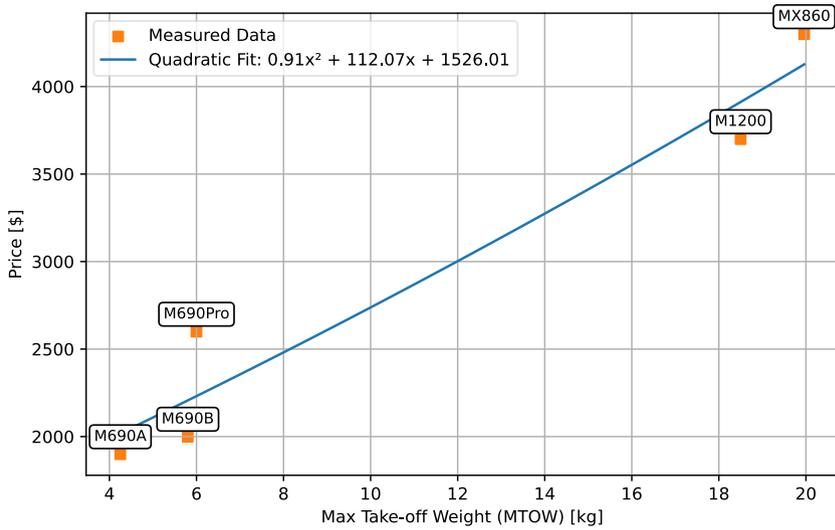


Figure 37 Drone price curve fitting result

단일 허브와 세 허브 운영 드론의 최대 이륙 중량과 가격 피팅 결과를 Table 12에 요약하였다. Table 12에서 드론의 경량화가 이루어질수록 드론 구매 비용이 감소하는 것을 확인하였다.

Table 12 Drone price

Hub	Max Take-off Weight	Price
1	10.54	2808.61 USD
3	9.36	2654.93 USD

4.3.2 모터 교체 비용

모터는 드론의 중요한 부품 중 하나로, 오랜 사용으로 인해 마모, 과열, 또는 외부 충격으로 인해 고장이 발생할 수 있다. 모터의 성능 저하는 추력 부족이

나 비행 안정성에 문제가 되기 때문에 적정 수명을 주기로 교체를 해주어야 한다. 본 연구에서 참고한 모터 제조사가 제공한 데이터는 Table 13을 통해 보여준다.

Table 13 Motor data provided by the manufacturer

Service life [hr]	Price
800	269.00 USD

각 허브 운영의 총 비행 시간을 기준으로 교체되는 모터의 개수는 Figure 38에 도시하였다.

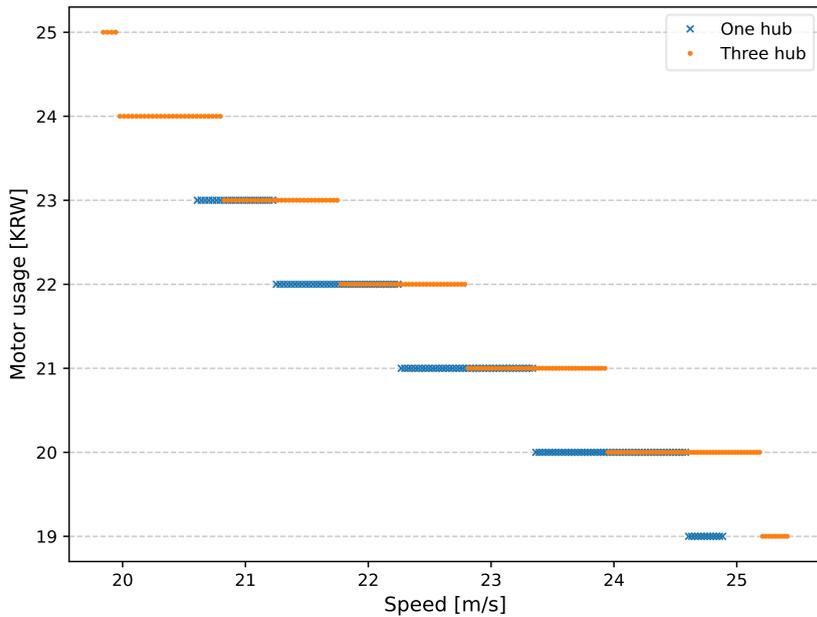


Figure 38 Number of motor replacement

드론 1회 구매 비용과 1개월 단위로 발생하는 모터 교체 비용을 비용 모델이 포함하였다.

4.4 운영 비용 모델 산출 결과

비용 산출 결과들을 종합하여 1개월 단위의 총 비용 모델을 산출하였다. 이는 서울시 1개월 물류 데이터 중 1% 이상을 드론으로 대체할 경우의 비용을 의미한다. 허브 수에 따른 총 운영 비용은 Figure 39에 제시하였으며, 단일 허브 운영이 세 허브 운영보다 낮은 비용을 요구하는 것을 확인할 수 있다.

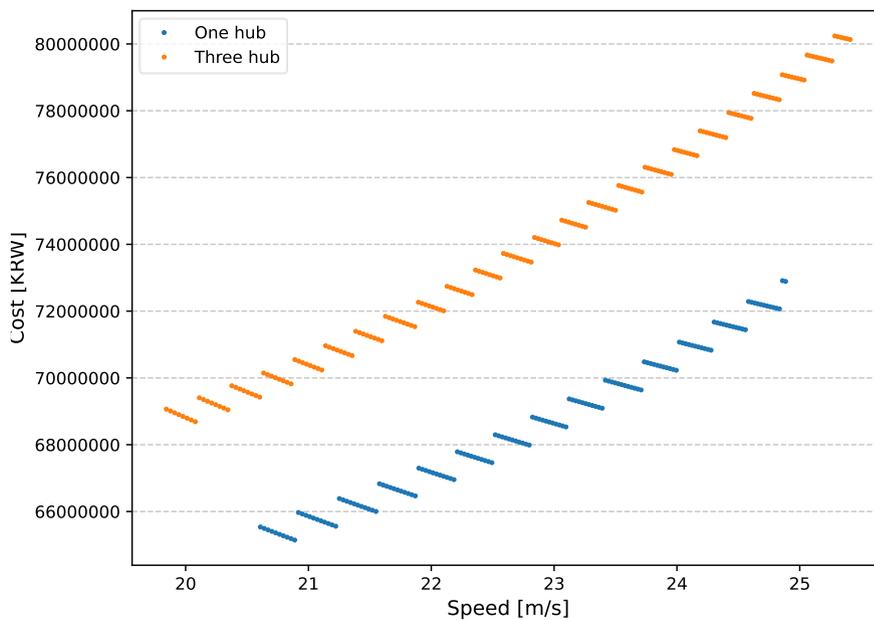


Figure 39 Total operating cost result

허브의 총 전력 소모량은 세 허브 운영에서 더 적게 소모되었으나, 배터리 교체 비용이 증가하면서 총 운영 비용은 상승하였다.

총 운영 비용과 경로 이용 횟수를 기반으로 단위 물류량당 비용을 비교하여 두 운영 모델의 물류량 대비 효율성을 확인하였다. Figure 40에서 드론의 1회 운임 비용이 세 허브 운영에서 더 낮은 것은 총 운임 횟수가 많아 고정 비용이 더 많이 분산된 결과로, 운임 비용을 기준 지표로 세 허브 운영이 더 경제적인 것을 알 수 있다. 특히, 비행 속도 24 m/s로 운용할 경우, 단일 허브 운영에 비해 운임비가 6.2%가 감소하는 것을 확인하였다.

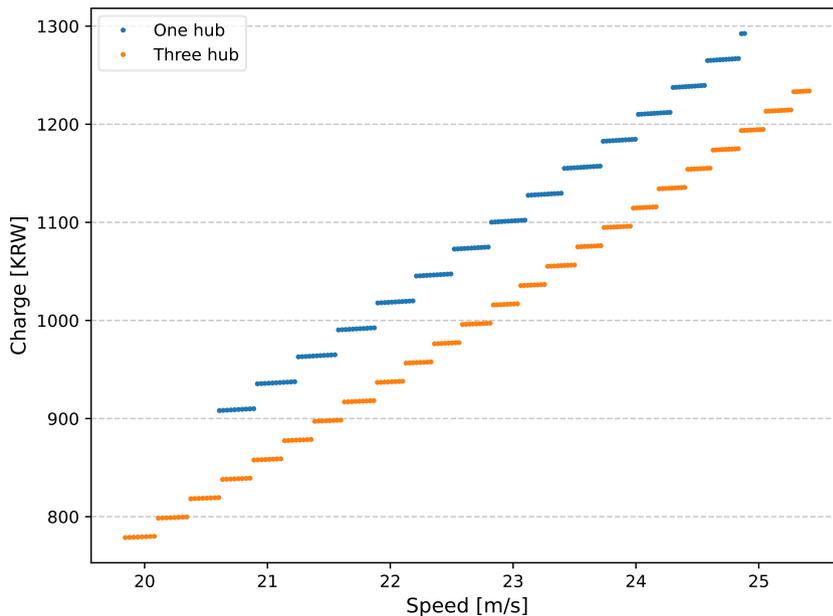


Figure 40 delivery cost of one drone flight

제 5 장. 결론

본 논문은 물류배송을 위한 드론 허브 운영 네트워크 설계와 효율적인 경로 탐색 기법, 그리고 배송 드론 모델 설계와 비용 모델을 산출하는 방법을 제시하였다.

첫째, 물류배송 운영의 효율성을 높이기 위해 Min-Max 알고리즘을 활용하여 단일 및 다중 허브 운영에 따라 최적의 허브 위치를 산출하였다. 허브 위치를 고려하여 드론의 최대 비행 가능 거리를 도출하였다. 허브의 수에 따라 DFS 알고리즘과 선형 최적화 방법을 결합하여 경로 이용 횟수를 최소화하는 경로 탐색 기법을 개발하여, 1개월의 1%에 해당하는 물류 데이터를 처리하기 위한 최적 경로 이용 횟수를 도출하였다. 이를 통해 허브 운영 수에 따라 드론 비행 거리 감소로 인해, 낮은 성능의 드론을 활용한 효율적인 운영이 가능함을 보였다.

둘째, 허브 운영 시 전 지역 배송이 가능한 물류배송 드론 설계 방법을 제안하였다. 단일 허브 운영과 세 허브 운영 모델에서 페이로드 1kg을 탑재할 수 있는 전진 비행 드론을 설계하였다. 이를 통해, 비행 속도에 따른 받음각, 비행 시간 및 거리, 전력 소모량을 도출하여 허브 운영 모델에 따라 드론의 성능을 비교하였다.

셋째, 경로 네트워크 결과와 드론 설계 결과를 통합하여 물류배송 드론 비용 모델을 산출하였다. 이 과정에서 배터리와 드론 비용을 이용해 허브 운영 시 초기 비용과 유지 비용 모델을 산출하는 방법을 제시하였다. 그 결과 허브의 수가 증가하였을 때, 배터리 교체 횟수는 증가하였지만, 배터리 충전 비용 및 드론 1회 운임 비용은 감소함을 확인하였다.

본 연구를 통해 드론을 활용한 물류배송 시스템의 효율성을 높이고, 운임 비용을 절감할 수 있는 가능성을 제시하였다. 향후 허브 수의 증가에 따른 이중

경로 네트워크 설계, DEM 데이터 기반 경로 네트워크 최적화, 그리고 인구 밀집 지역을 고려한 경로 추출 알고리즘 연구에 기초 자료로 활용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] IMARC, “Drone Package Delivery Market Report by Solution, Duration, Range, Capacity, Type, End Use Industry, and Region 2025–2033,” 2024.
- [2] CBS News., “Amazon Unveils Futuristic Plan: Delivery by Drone,” 2014.
- [3] Korea Transport Institute, “Global Logistics Industry Trend,” Vol. 3, No. 65, December 2024.
- [4] Seo, M. K., Kim, H. J., “A study on Possibility for Commercialization of Logistics Delivery utilizing Drone in Korea,” *The Journal of Internet Electronic Commerce Research*, Vol. 18, No. 6, 2018, pp.377~393.
- [5] 국토교통부, “드론배송·드론 상용화 적극 지원 나선다 [보도 자료],” 2024.
- [6] Sudbury, A. W. and Hutchinson, E. B., “A COST ANALYSIS OF AMAZON PRIME AIR (DRONE DELIVERY),” *Journal for Economic Educations*, Vol. 16, No. 1, 2016.
- [7] Agatz, N., Bouman, P., and Schimd, M., “Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone,” *Transportation Science*, Vol. 52, No. 4, 2018, pp.965~981.
- [8] Bhuiyan, T. H., Roni, M., and Walker, V., “Drone Deployment Optimization for Direct Delivery with Time Windows and Battery Replacements.” 2022.
- [9] Wang, D. H., Jung, H., and Yoon, D. S., “A Study on Drone Logistics Delivery Use Cases and Development Direction in Future,” *In Proceedings of The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 2016, PP.624~625.
- [10] Nam, H. S., Lee, S., and Lee, H. T., “Electric Propulsion System Analysis and Optimization for Multi-Rotor Drones,” *In 2024 IEEE Aerospace Conference*, 2024, pp.1~8.
- [11] Pollet, F., Delbecq, S., Budinger, M., and Moschetta, J. M., “Design optimization of multicopter drones in forward flight,” *In 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2021.
- [12] T-motor, Available: <https://uav-en.tmotor.com/>.