

에어 택시 이용률 최대화를 위한 수직이착륙장 위치 결정 문제⁺

(Vertiport Location Problem to Maximize Utilization Rate for Air Taxi)

김 광^{1)*}
(Gwang Kim)

요약 본 논문에서는 도시 내 교통 혼잡 문제를 해결하기 위한 새로운 혁신 기술 중 하나인 에어 택시 운영에 관한 연구를 다룬다. 성공적인 기술 도입과 합리적인 운영을 위해 초기에 고려해야 할 문제 중 하나인 수직이착륙장(vertiport) 위치 결정 문제를 다룬다. 교통수단 이용에 따른 비용과 이동시간을 고려하여 각 경로에서의 교통수단 예측 수요 확률을 이산 선택 모형을 활용하여 구하고, 이를 반영하여 에어 택시 이용률의 최대화를 목적으로 하는 수리적 모형을 제안한다. 본 수리적 모형은 NP-난해(NP-hard) 문제로, 위치 결정 문제를 해결하기 위한 효과적이면서 효율적인 문제 해결 방법론이 필요하다. 단순히 최적화 모형을 제안한 기존 연구와 달리 본 연구에서는 교차-엔트로피 알고리즘(cross-entropy algorithm)을 활용한 문제 해결 방법론을 제안하고, 수치 실험을 통해 알고리즘의 효과성과 효율성을 확인한다. 문제 해결 방법론의 학술적 우수성 외에도, 실제 데이터 및 에어 택시 활용 계획을 고려한 의사결정의 제시는 실무적인 활용 가능성을 높일 수 있음을 시사한다.

핵심주제어: 에어 택시, 수직이착륙장 위치 결정 문제, 교차-엔트로피 알고리즘, 조합최적화

Abstract This paper deals with the operation of air taxis, which is one of the latest innovative technologies aimed at solving the issue of traffic congestion in cities. A key challenge for the successful introduction of the technology and efficient operation is a vertiport location problem. This paper employs a discrete choice model to calculate choice probabilities of transportation modes for each route, taking into account factors such as cost and travel time associated with different modes. Based on this probability, a mathematical formulation to maximize the utilization rate for air taxi is proposed. However, the proposed model is NP-hard, effective and efficient solution methodology is required. Compared to previous studies that simply proposed the optimization models, this study presents a solution methodology using the cross-entropy algorithm and confirms the effectiveness and efficiency of the algorithm through numerical experiments. In addition to the academic excellence of the algorithm, it suggests that decision-making that considers actual data and air taxi utilization plans can increase the practical usability.

Keywords: Air taxi, Vertiport location problem, Cross-entropy algorithm, Combinatorial optimization

* Corresponding Author: gwangkim91@chosun.ac.kr

+ 이 논문은 2023학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

Manuscript received August 01, 2023 / revised August 29, 2023 / accepted September 10, 2023

1) 조선대학교 경영학부, 제1저자, 교신저자

1. 서론

세계적으로 도시에 인구가 증가하고, 규모가 커짐에 따라 교통, 범죄, 물류대란 등 도시 내 해결해야 할 문제의 범위와 중요성이 대두되고 있다. 특히, 인구 1,000만 명 이상의 메가시티와 같이 대도시 내 제한된 도로 상황과 차량의 증가는 교통 혼잡 문제가 발생할 수밖에 없다. 2023년 Inrix 보고서에 따르면, 미국인들은 2022년 한 해 평균 51시간 교통 혼잡 속에서 보냈으며, 이는 810억 달러 이상의 손실로 환산할 수 있다고 밝혔다 (Pishue, 2023).

교통 혼잡 문제를 해결하기 위한 도로 확장은 단기적으로는 문제를 해결한 것처럼 보일 수 있으나, 장기적으로는 인구 및 차량의 증가와 주행거리의 증가 등으로 오히려 역효과를 일으킬 수 있다 (Wu & Zhang, 2021). 산업/학계 전문가들은 표면적인 정체를 피하고 근본적인 혼잡 문제 해결을 위해 도심 항공 모빌리티(urban air mobility)라 불리는 ‘전기 에어 택시(electronic air taxi)’를 대중교통 시스템에 활용하고자 연구하고 있다. 에어 택시는 전기 수직 이착륙 차량(electric vertical take-off and landing vehicles)이라는 유형의 전기 항공기를 도시 내 대중교통 시스템에 활용한다. 이는 공항, 철도, 건물 옥상 등 도시 내 여러 지점을 연결해 기존 대중교통의 육로가 아닌 공중으로 사람 및 물자를 운송한다 (Choi & Park, 2022).

본 연구는 성공적인 에어 택시 운영을 위해 초기에 고려해야 할 문제인 수직이착륙장(vertiport) 위치 결정 문제를 다룬다. 수직이착륙장은 에어 택시의 이착륙을 위해 지정된 정류장과 같은 역할을 하는 시설로, 에어 택시 운영에 필수적인 의사결정 중 하나이다 (Duvall et al., 2019). 전기 항공기, 자동화 등 최신 기술이 접목된 공중 대중교통수단의 도입과 도시 내 시스템 구축은 초기 비용이 막대하다. 그러므로, 합리적인 수직이착륙장의 위치 결정은 제한된 예산 내 에어 택시 이용자 수를 늘려 교통 체증 해결에 도움이 되어 효과적/효율적 교통 시스템 운영이 가능하게 한다.

수직이착륙장의 위치를 결정하기 위해서는 이

용자들의 예측 수요를 고려해야 한다. 대중교통 이용자들은 다양한 교통수단 중 하나를 선택하게 되는데, 기존의 교통수단을 사용했던 승객이 에어 택시로 변경하도록 하는 여러 요인이 존재한다. 본 연구에서는 비용과 이동시간을 예측 수요에 고려한다 (Toro-González et al., 2020; Choi & Park, 2022). 두 가지 요인에 따라 이용자들의 교통수단 선택의 확률을 이산 선택 모형(discrete choice model)을 활용하여 구하고, 이를 수리적 모형에 반영하여 에어 택시 이용률을 최대화하는 에어 택시 수직이착륙장 위치 결정 문제를 제시한다.

본 위치 결정 문제는 조합 최적화(combinatorial optimization)로 표현되며, 에어 택시 이용객들의 이동 경로까지 고려하는 문제이다. 이러한 조합 최적화 문제는 NP-난해(NP-hard) 문제이다 (Nemhauser et al., 1978; Fisher et al., 1978). 즉, 후보 수직이착륙장 및 이용객들의 가능 이동 경로 수가 커질수록 계산 복잡도(time complexity)가 기하급수적으로 증가하여, 최적해를 구하기 위한 효율적인 알고리즘을 찾기 어렵다. 이를 해결하기 위해 휴리스틱 기반의 문제 해결 방법론으로 근사 최적해를 구하는 방법을 진행하는데(Yun et al., 2019; Zhong & Chen, 2023), 본 연구에서는 교차-엔트로피 알고리즘(cross-entropy algorithm)을 활용하여 해결하고자 한다. 본 알고리즘은 정보이론(information theory)에서 등장한 개념이나, 조합 최적화 문제를 효율적으로 해결하기 위한 휴리스틱 기반 문제 방법론으로 알려져 있다 (Le Thi et al., 2012; Cabo & Possani, 2015; Kim, 2022). ‘쿨백-라이블러 발산(Kullback-Leibler divergence)’ 값이 최소가 되는 매개변수를 구하고, 이를 고려해 더 나은 해를 찾아가는 방식의 수리적 이론 개념이 반영된 방법론이다.

실용화 단계 전인 에어 택시 운영과 관련된 연구는 현재 시작 단계에 있으며 (Wu & Zhang, 2021; Shin et al., 2022), 최근 연구된 합리적인 운영을 위한 최적화 모형을 제시한 논문은 다음과 같다. Rath & Chow (2022)는 에어 택시 이용자 수의 최대화를 위한 허브(hub) 위치 결정 문제의 수리적 모형을 활용하여 제시하

였으며, Wu & Zhang (2021)은 지리정보시스템을 활용하여 예상 수요를 기반으로 운영 비용을 최소화하는 정수 최적화 모형을 제안하였다. Shin et al. (2022)는 에어 택시 충돌 위험을 비용으로 환산한 후 운영 비용 최소화를 위한 비선형 정수 최적화 모형을 제안하였고, 유전 알고리즘 기반의 휴리스틱을 개발하여 문제를 해결하였다. 최근 최적화 모형을 고안한 연구들이 제시되고 있으나, 각 경로의 예측 수요의 반영 및 NP-난해 문제의 어려움을 해결하기 위한 휴리스틱 기반의 문제 해결 방법론을 다루는 논문은 미흡하였다. 예측 수요를 반영한 합리적인 에어 택시의 운영을 위해 최적화 기반의 운영 관리 문제 제시와 효과/효율적인 문제 해결을 위한 알고리즘 기반 방법론을 제안은 본 연구의 필요성을 강조한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이산 선택 모형을 활용한 교통수단 선택 확률 결정 및 이를 반영한 수직이착륙장 위치 결정의 수리적 모형을 제시한다. 3장에서는 본 위치 결정 문제를 풀기 위한 효율적인 문제 해결 방법론을 설명한다. 4장에서는 다양한 수치 실험을 통해 문제 해결 방법론의 우수성을 보인다. 마지막 5장에서는 본 연구의 결론에 대해 논한다.

2. 에어 택시 수직이착륙장 위치 결정 문제의 수리적 모형

2장에서는 에어 택시 수직이착륙장 위치 결정 문제에 대한 수리적 모형을 제시한다. 현실적인 수리적 모형을 구성하기 위해 이용자들의 교통수단 선택 확률을 반영한다. 교통수단 선택 확률은 2.1절에서 이산 선택 모형을 활용한 방법을 설명한다.

2.1 이산 선택 모형을 활용한 교통수단 선택 확률 결정

이산 선택 모형은 효용 극대화의 원칙에 따라 선택행위를 한다는 로짓 모형(logit model)에 근간을 두고, 선택지의 속성을 기반으로 개인이

내린 선택을 예측하는 통계 모형이다(McFadden, 1973). 본 모형에서는 각 이용자의 이동 경로가 존재할 때, 이용할 이동 수단으로 육로 교통수단($m=1$)과 에어 택시($m=2$) 두 가지가 있다고 가정한다. 이용자 n 이 교통수단 m 을 이용해 이동할 때 얻는 효용(utility)을 U_{nm} 이라고 하자. 효용 U_{nm} 은 추정 효용 V_{nm} 과 임의추정오차 ϵ_{nm} 로 구성된다. 변동성을 나타내는 ϵ_{nm} 은 표준 Gumbel 분포를 따른다고 가정한다. 효용 U_{nm} 을 표현하면 다음과 같다.

$$U_{nm} = V_{nm} + \epsilon_{nm} \quad (1)$$

이용자 n 이 교통수단 m 을 선택할 확률 P_{nm} 은 선택된 교통수단의 효용이 가장 클 때 발생하고, 이는 로짓 모형에 기반하여 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{nm} &= P(U_{nm} > U_{nm'}, m \neq m') \quad (2) \\ &= \frac{e^{V_{nm}}}{e^{V_{nm}} + e^{V_{nm'}}} \end{aligned}$$

식 (2)에서 사용되는 추정 효용 V_{nm} 은 이용자 n 이 시작점 i 에서 도착점 j 로 이동할 때, 교통수단 m 을 선택을 하는 데 있어 비용과 이동시간 두 가지 요소에 의해서만 영향을 받는다고 가정한다. 두 가지 요소를 고려한 V_{nm} 은 기존 연구에서 제안된 선형함수로 표현되고, 이는 식 (3)과 같다 (Choi & Park, 2022; Rath & Chow, 2022). c_{ij}^m 과 t_{ij}^m 은 교통수단 m 을 이용하여, 시작점 i 에서 도착점 j 로 이동하는 데 드는 비용과 이동시간을 의미하고, β_c 와 β_t 각 요인에 미치는 정도를 나타내는 계수를 의미한다. 두 가지 계수는 실제 에어 택시 운영 데이터를 통해 각 요소의 중요성에 따라 값이 추정된다.

$$V_{nm} = \beta_c c_{ij}^m + \beta_t t_{ij}^m \quad (3)$$

본 연구에서는 이산 선택 모형을 통해 구한

확률 P_{nm} 을 이용하여, 각 교통수단 이용에 대한 예측 수요를 반영한 수직이착륙장 위치 결정 문제에 대한 수리적 모형을 2.2절에서 제시한다.

2.2 예측 수요를 반영한 위치 결정 문제의 수리적 모형

$$\text{Max} \sum_{r \in R} \sum_{p \in S} \sum_{q \in S} D_r \bar{W}_{pq}^r y_{pq}^r \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{p \in S} x_p = K \quad (5)$$

$$\sum_{p \in S} \sum_{q \in S} y_{pq}^r = 1, \forall r \in R \quad (6)$$

$$y_{pq}^r \leq \min(x_p, x_q), \forall p, q \in S, r \in R \quad (7)$$

$$x_p \in \{0, 1\}, \forall p \in S \quad (8)$$

$$y_{pq}^r \in \{0, 1\}, \forall p, q \in S, r \in R \quad (9)$$

이용자들의 교통수단 선택 확률을 반영한 에어 택시 수직이착륙장 위치 결정 문제의 수리적 모형을 제시한다. 수리적 모형에 사용되는 인덱스, 모수, 결정변수 및 가정사항은 다음과 같다.

Indices:

$N(i, j \in N)$: 위치(노드)의 집합

$R(r \in R)$: 이동경로(시작-도착)의 집합

$S(p, q \in S)$: 수직이착륙장 설치 후보의 집합
($S = N$)

Parameters:

D_r : 경로 r 의 수요 ($r = (i, j)$)

W_{pq}^r : $p \rightarrow q$ 의 에어 택시 경로가 존재할 때, 경로 r 인 이용자가 육로 교통수단을 선택할 확률

\bar{W}_{pq}^r : $p \rightarrow q$ 의 에어 택시 경로가 존재할 때, 경로 r 인 이용자가 에어 택시를 선택할 확률

($W_{pq}^r + \bar{W}_{pq}^r = 1, \forall r, p, q$)

K : 설치할 수 있는 수직이착륙장의 수

(* P_{nm} 을 이용하여 W_{pq}^r, \bar{W}_{pq}^r 을 구함)

Decision variables:

x_p : 위치 p 에 수직이착륙장이 설치되면 1, 아니면 0인 이진 변수

y_{pq}^r : 경로 r 인 이용자가 $p \rightarrow q$ 의 에어 택시 경로를 이용할 때 1, 아니면 0인 이진 변수

Assumptions:

- 교통수단 선택 확률은 비용과 이동시간을 고려하여 이산선택모형을 통해 결정된다. 각 경로에 해당하는 육로 교통수단/에어 택시의 비용과 이동시간은 정해져 있다.
- 경로 r 인 이용자 중 에어 택시를 선택한 이용자는 비용과 이동시간을 고려하여 에어 택시 경로 $p \rightarrow q$ 하나만을 합리적으로 선택해 이동한다.
- 에어 택시 경로 $p \rightarrow q$ 를 이용해 이동하는 경로 $r(r = (i, j))$ 인 이용자의 총 이동 경로는 $i \rightarrow p \rightarrow q \rightarrow j$ 이고, $i \rightarrow p$ 와 $q \rightarrow j$ 는 육로 교통수단을 이용한다.
- 시작점과 도착점이 같은 경로는 존재하지 않는다. ($(i, i) \notin R$ and $(p, p) \notin S$)

에어 택시 이용률을 최대화하는 수직이착륙장 위치 결정 문제의 수리적 모형은 다음과 같다. 식 (4)는 본 모형의 목적함수로, 에어 택시의 이용률을 최대화를 의미한다. 식 (5)는 설치 가능한 수직이착륙장 위치 중 K 개 설치를 의미하는 제약조건이다. 식 (6)은 각 경로 r 에서의 에어 택시 경로는 하나로 결정됨을 의미하는 제약조건으로, 본 문제의 2번째 가정을 반영하였다. 식 (7)은 p 와 q 에 수직이착륙장이 모두 설치가 되어야, $p \rightarrow q$ 의 에어 택시 경로를 이용할 수 있다는 제약조건이다. 식 (8) - (9)는 이진 변수로 표현되는 결정변수를 의미한다.

본 위치 결정 문제는 이진 결정변수로 이루어진 정수 최적화(integer programming)이자, 설치된 수직이착륙장의 조합을 찾는 문제로 조합 최적화로 표현된다. 더불어, 이동 경로에 대한 제약조건이 있는 문제로 본 문제는 NP-난해 문제이다 (Wandelt et al., 2021). 최적해 혹은 최적에 근사한 해를 빠른 시간에 찾기 위한 효율

적인 문제 해결 방법론이 필요하다. 3장에서 본 문제를 해결하기 위한 교차-엔트로피 알고리즘 기반의 문제 해결 방법론을 제시한다.

3. 문제 해결을 위한 교차-엔트로피 알고리즘

3장에서는 수직이착륙장 위치 결정 문제의 해를 효율적으로 구하기 위해 문제 해결 방법론을 제시한다. 본 연구에서 사용한 알고리즘은 교차-엔트로피 알고리즘으로 위치 결정 문제와 같은 조합 최적화 문제를 다루는 데 사용되는 효율적인 방법론 중 하나이다.

교차-엔트로피 알고리즘은 매 반복 시 데이터 샘플을 활용해 ‘쿨백-라이블러 발산’값이 최소가 되는 매개변수를 구한다. 구한 매개변수에 따라 새로운 데이터 샘플을 구하고, 다시 매개변수를 업데이트하는 방식으로 반복된다. ‘쿨백-라이블러 발산’값을 최소화하는 것은 매개변수 업데이트 시 정보의 손실을 최소화하는 방향으로 진행한다. 이는 더 나은 데이터 샘플을 생성할 가능성을 높여, 효과적인 가능해를 찾을 수 있다. 이에 대한 수리적 내용 및 구체적인 증명은 Le Thi et al. (2012) & Huang et al. (2018) 논문에서 다룬다.

수직이착륙장 위치 결정 문제를 해결하기 위한 교차-엔트로피 알고리즘은 다음과 같다. s_p 는 p 에 수직이착륙장이 설치될 확률을 의미하고, 교차-엔트로피 알고리즘에서 필요한 파라미터인 ρ 는 구한 데이터 집합 내 상위 $\rho\%$ 샘플을 뽑기 위한 값으로, 0에서 1 사이이다.

[위치 결정 문제를 위한 문제 해결 방법론]

Step 1. (초기화)

$$s_p \leftarrow \frac{1}{|S|} \forall p \in S; \text{ (균일분포)}$$

$$\rho \leftarrow (0, 1);$$

Step 2. (sample 추출)

s_p 로 구성된 확률분포를 이용, H 개의 가능해

샘플($data^1, data^2, \dots, data^H$)을 추출;

Step 3. (각 sample의 목적함수 값 구하기)

For $i = 1, 2, \dots, H$

$data^i$ 의 수직이착륙장 위치 확인;

For $r = 1, 2, \dots, |R|$

경로 r 의 y_{pq}^r 와 \overline{W}_{pq}^r 구하기;

y_{pq}^r 와 \overline{W}_{pq}^r 을 이용, $OBJ(data^i)$ 계산;

Step 4. (상위 $\rho\%$ 샘플 추출)

$OBJ(data^i)$ 값에 따라 내림차순으로 정렬;

$L \leftarrow \lfloor \rho H \rfloor$; L 개의 best 샘플 추출;

$(data^{\sigma(1)}, data^{\sigma(2)}, \dots, data^{\sigma(L)})$ (σ : 순열)

Step 5. (s_p 값 업데이트)

$$s_p \leftarrow \frac{\text{card}\{l \in \{1, 2, \dots, L\} : p \in data^{\sigma(l)}\}}{L};$$

Step 6. (반복 및 종료)

종료 조건을 만족하지 않는다면,

Step 2. - Step 5.를 반복;

Step 3.에서 $data^i$ 에서 비롯된 수직이착륙장 위치를 기반으로 각 경로에 따른 y_{pq}^r 와 \overline{W}_{pq}^r 구한다. 이 때, 두 번째 가정을 기반으로 가장 합리적인 에어 택시 경로를 결정한다. y_{pq}^r 와 \overline{W}_{pq}^r 값을 이용해 목적함수 값을 구하고 이를 $OBJ(data)LSUP_i$ 고 하자. Step 5.의 $\text{card}(B)$ 는 집합 B 의 크기(원소의 개수)를 의미한다. L 개 샘플의 결과에서 p 위치에 수직이착륙장이 설치되었는지의 정도에 따라 s_p 값을 업데이트한다. Step 6.에서의 제시한 종료 조건은 알고리즘 반복 횟수가 일정 횟수 이상이거나 혹은 목적함수 값이 일정 횟수 이상 변동이 없을 때 적용된다.

4. 수치실험

4.1 실험 설정

이용자들의 예측 수요를 고려한 수직이착륙장의 위치 결정 문제를 풀기 위해 본 연구에서는 교차-엔트로피 알고리즘을 활용한 문제 해결 방법론을 제안하였다. 4장에서는 다양한 dataset을 이용하여 문제 해결 방법론의 성능을 확인한다. Table 1은 수치 실험에 사용될 dataset의 정보, 최적화 문제에 사용되는 모수 및 알고리즘 구성을 위한 모수를 제시한다.

본 연구에서는 무작위로 생성된 데이터를 활용하여 실험을 진행하였다. 실제 운영 계획 시 도시 혹은 국가 내 수직이착륙장의 후보군의 지형지물과 도로 상황을 반영해 비용과 이동시간을 추정하고, 기존 교통 데이터를 활용하여 특정 지역에서 다른 특정 지역으로 이동하는 수요를 반영할 수 있다면 본 연구의 모형의 적용 가능성은 증가할 것이다.

노드의 위치는 $[0, 20]^2$ 의 2차원 공간 내 무작위로 설정하였으며, 시작점 i 에서 도착점 j 로 이동하는 데 드는 이동시간과 비용은 거리에 비례하도록 설정하였다. 에어 택시와 육로 교통수단의 시간 비율(c_{ij}^1/c_{ij}^2)은 0.1로, 에어 택시가 10배 더 빠름으로 설정하였고, 비용의 비율(t_{ij}^1/t_{ij}^2)은 5로, 에어 택시 이용이 5배 더 비싸므로 설정하였다. β_c 와 β_t 는 Choi & Park (2022) 논문의 값을 사용하였다. D_r 은 경로 r 의 수요로 모든 교통수단을 이용하는 고객의 수를 의미하며, 본 실험에서는 특정 구간 내 임의의 수로 진행한다. (U[a, b]: 폐구간 [a, b]에서의 균일 분포(uniform distribution)) 교차-엔트로피 알고리즘의 종료 조건(TC)은 알고리즘 반복 횟수가 1,000회 혹은 200회 이상 연속적으로 목적함수 값의 개선이 일어나지 않을 때로 설정하였다.

Table 1 Parameter setting

Parameter	Setting Value
$ N (= S)$	8
K	$0.25 * N $
$ R $	$ N * (N - 1)$
D_r	U[0, 50]
β_c	-0.0722
β_t	-0.0827
TC	# of iterations : 1,000 or # of iterations not updated: 200
H	$5 * N $
ρ	20%

4.2 실험 결과분석

이용자들의 예측 수요를 고려한 수직이착륙장의 위치 결정 문제에 대한 수치 실험은 본 컴퓨터 환경(CPU: Intel(R) Core(TM) i5-10500, RAM: 16GB, OS: Windows 10)에서 진행되었다. ‘Cplex’ 최적화 소프트웨어를 이용한 수리적 모형 해결과 ‘Python 3’ 프로그래밍 언어를 사용해 교차-엔트로피 알고리즘을 구성하였다.

$|N|$ 값이 20 이하인 작은 dataset에서의 실험 결과는 Table 2에서 제시된다. $Ratio_{OBJ}$ 는 알고리즘을 통해 구한 해의 목적함수 값과 최적화 문제의 최적 목적함수 값의 비율로, 1에 가까울수록 최적해에 근접한 가능해를 알고리즘이 도출하였음을 의미한다. $Ratio_{TIME}$ 는 알고리즘의 계산 시간과 최적화 문제의 계산 시간의 비율로, 0에 가까울수록 최적화 문제의 계산 시간 대비 알고리즘이 효율적으로 문제 해결을 하였음을 나타낸다. 표 안의 값은 무작위로 생성된 열 개의 data의 평균 결과를 나타낸다. DF 는 10개 data 중 최적해를 찾지 못한 경우의 수를 나타낸다.

Table 2 Experiment Results (small size)

$ N $	K	$Ratio_{OBJ}$	$Ratio_{TIME}$	DF
8	2	1.00	0.85	0
12	3	1.00	0.53	0
16	4	0.99	0.24	1
20	5	0.99	0.07	1

$|N|$ 값이 20 이하인 dataset에서의 결과를 보면, $|N|=8, 12$ 에서는 10개 data 모두 최적해와 동일한 해를 알고리즘에서 찾을 수 있었다. $|N|=16, 20$ 에서는 최적해를 못 찾은 1개 data의 경우에서도 $Ratio_{OBJ}$ 이 0.99 이상으로 근사 최적해를 찾았음을 의미한다. 또한, $|N|$ 값이 커질수록 NP-난해 문제인 본 최적화 문제를 풀기 위해 계산 시간이 지수적으로 증가하게 되고, 그에 반해 알고리즘은 합리적인 계산 시간 내에 구할 수 있음을 $Ratio_{TIME}$ 을 통해 확인하였다. $|N|=20$ 인 경우, 최적화 문제의 계산 시간은 평균적으로 650초가 넘고, 알고리즘의 경우 평균적으로 45초 내 해를 찾았음을 확인하였다. 그 이상의 크기를 갖는 dataset에서는 3,600초 이내에 최적해를 구하기가 어려웠다. 이는 효율적인 문제 해결을 위해 새로운 문제 해결 방법론 제안의 필요성을 강조할 수 있다.

좀 더 큰 사이즈의 dataset에서는 알고리즘을 이용한 결과를 제시한다 (Table 3). Table 3에 제시된 값은 10개 data의 평균 계산 시간을 나타낸다. $|N|$ 이 증가할수록 계산 시간이 증가하지만, 본 연구에서 제안한 알고리즘을 이용할 경우, 합리적인 시간 내 근사 최적해를 구할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

Table 3 Experiment Results (large size)

$ N $	Computation Time (sec)
20	44.67
40	68.14
60	104.41
80	162.23
100	252.06

4.3 시사점

본 연구를 통해 제시할 수 있는 학술적 시사점은 다음과 같다. 첫째, 에어 택시에 관한 연구는 시작 단계에 있으며 최적화 모형을 제시한 운영 관리 연구는 추후 에어 택시 상용화에 합리적인 의사결정을 도울 수 있다는 점에 의의가 있다. 둘째, 최적의 의사결정을 내릴 수 있는 객

관적인 수리적 모형을 제시하였으나, 이는 NP-난해 문제로 문제의 크기에 따라 계산 시간이 기하급수적으로 증가한다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 조합 최적화의 특성에 맞는 교차-엔트로피 알고리즘을 활용한 방법론을 제안한 부분이다. 마지막으로, 수치 실험을 통해 제안한 알고리즘의 효과성과 효율성을 보임으로써 수직 이착륙장 위치 결정에 있어 실질적인 도움을 줄 수 있는 활용 가능성을 시사한다.

실무적 시사점으로는 도시 및 국가의 규모가 커질수록 수직이착륙장의 후보군 및 설치 수가 증가할 것이고, 이에 따라 최적의 위치 결정에 있어 효율적인 문제 해결 방법론의 필요성에 의의가 있다. 에어 택시의 경우, 대중화가 되기까지 많은 대수의 도입이 필요하다. 만약 대수의 제약이 불가피하다면, 이용자들의 편의를 위해 에어 택시의 이용 비율을 조절하는 것도 필요할 것이다. 이는 본 모형에서 이산 선택 모형을 활용한 교통수단 선택 확률을 활용하여 비용에 따라 에어 택시 이용 비율의 조절을 객관적으로 진행할 수 있다. 또한, 본 문제 해결 방법론을 이용하는 데 필요한 모수 정보를 실제 지리정보 체계를 활용한 데이터와 이용자의 수요를 객관적으로 추정해 반영한다면, 의사결정에 정확도를 높일 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 도시 내 교통 혼잡 문제를 해결하기 위한 새로운 혁신 기술 중 하나인 에어 택시를 다루었다. 성공적인 기술 도입을 위해 초기에 고려해야 할 문제인 수직이착륙장 위치 결정 문제를 제시하였다. 비용과 이동시간을 반영하여 각 경로에 따른 교통수단의 예측 수요 확률을 이산 선택 모형을 활용하여 구하였고, 이를 반영하여 에어 택시 이용률의 최대화를 목적으로 하는 수리적 모형을 제시하였다. 최근 수리적 모형을 제시한 기존 연구들이 있으나, 본 수리적 모형은 NP-난해 문제로 최적화 소프트웨어를 이용한 최적해를 구하는 방식이 아닌 효율적인 문제 해결 방법론이 필요하다.

본 연구에서는 조합 최적화 문제를 다루는 데 사용되는 효율적인 방법론 중 하나인 교차-엔트로피 알고리즘을 활용한 문제 해결 방법론을 제안하였다. 본 알고리즘은 정보의 손실을 최소화하는 것을 기반으로 매 반복 시 추출한 데이터의 결과를 바탕으로 매개변수를 구해 해를 업데이트한다. 이론적인 근거를 갖는 것뿐만 아니라, 수치 실험을 통해 합리적인 계산 시간 내에 근사 최적해를 구해 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 최적화 모형 및 문제 해결 방법론은 실제 지리정보체계를 활용하여 의사결정에 정확도를 높일 수 있고, 비용에 따른 에어 택시 이용 비율의 조절로 현실적인 운영에 도움을 줄 수 있음을 시사한다. 또한, 문제 해결 방법론은 조합 최적화 문제로 표현된 다양한 수리적 문제에 적용이 가능하다는 측면에서 활용성이 높은 알고리즘이다. 다만, 샘플 추출 수 및 종료 조건에 따라 알고리즘의 성능과 계산 시간이 상이할 수 있어, 문제 상황에 맞는 알고리즘 초기 설정이 필요하다. 또한, 이산 선택 모형을 활용하여 예측 수요 확률을 구하는 데 있어, 확률에 영향을 주는 요인의 다양성을 반영하여 좀 더 현실적인 추후 연구 방향이 될 수 있다.

References

- Cabo, M., & Possani, E. (2015). Considerations on applying cross entropy methods to the vehicle routing problem. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 6(3), 22-33.
- Choi, J. H., & Park, Y. (2022). Exploring economic feasibility for airport shuttle service of urban air mobility (UAM). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 162, 267-281.
- Duvall, T., Green, A., Langstaff, M., & Miele, K. (2019). Air-mobility solutions: What they'll need to take off. *McKinsey Capital Projects & Infrastructure*.
- Fisher, M. L., Nemhauser, G. L., & Wolsey, L. A. (1978). An analysis of approximations for maximizing submodular set functions—II. Berlin, Heidelberg. *Polyhedral combinatorics*, pp. 73-87.
- Huang, L., Qu, H., & Zuo, L. (2018). Multi-type UAVs cooperative task allocation under resource constraints. *IEEE Access*, 6, 17841-17850.
- Kim, G. (2022). Multi agents-multi tasks assignment problem using hybrid cross-entropy algorithm. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 27(4), 37-45.
- Le Thi, H. A., Nguyen, D. M., & Dinh, T. P. (2012). Globally solving a nonlinear UAV task assignment problem by stochastic and deterministic optimization approaches. *Optimization Letters*, 6(2), 315-329.
- McFadden, D. (1973). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior.
- Nemhauser, G. L., Wolsey, L. A., & Fisher, M. L. (1978). An analysis of approximations for maximizing submodular set functions—I. *Mathematical programming*, 14(1), 265-294.
- Pishue, B. (2023). 2022 inrix global traffic scorecard. In *Inrix*.
- Rath, S., & Chow, J. Y. (2022). Air taxi skyport location problem with single-allocation choice-constrained elastic demand for airport access. *Journal of Air Transport Management*, 105, 102294.
- Shin, H., Lee, T., & Lee, H. R. (2022). Skyport location problem for urban air mobility system. *Computers & Operations Research*, 138, 105611.
- Toro-González, D., Cantillo, V., & Cantillo-García, V. (2020). Factors influencing demand for public transport in Colombia. *Research in Transportation Business & Management*, 36, 100514.
- Wandelt, S., Dai, W., Zhang, J., Zhao, Q., & Sun, X. (2021). An efficient and scalable

- approach to hub location problems based on contraction. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106955.
- Wu, Z., & Zhang, Y. (2021). Integrated network design and demand forecast for on-demand urban air mobility. *Engineering*, 7(4), 473-487.
- Yedavalli, P., & Mooberry, J. (2019). An assessment of public perception of urban air mobility (UAM). *Airbus UTM: Defining Future Skies*, 2046738072-1580045281.
- Yun, Y.S. & Chuluunsukh, A. (2019). Green Supply Chain Network Model: Genetic Algorithm Approach. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 24(3), 31-38.
- Zhong Y.M & Chen, X. (2023). (Optimization of Zero-carbon Supply Chain Network by Redistribution of E-scooter Sharing. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 28(3), 21-29.



김 광 (Gwang Kim)

- 서울대학교 산업공학과 공학사
- 서울대학교 산업공학과 공학박사
- (현재) 조선대학교 경상대학 경영학부 조교수

- 관심분야: 생산운영관리, 최적화, 문제 해결 방법론 및 알고리즘 개발 등