

도시계획시설 용량 산정을 위한 확률적 수요 예측에 관한 연구

A Study on the Stochastic Demand Forecast for the Capacity Calculation of Urban Planning Facilities

강재영* · 김종진**

Jae Young Kang* · Jong Jin Kim**

Abstract

This study predicts the means sharing ratio of the urban air transportation (UAM) when the VertiHub of the UAM in the southern western part is built at Songjeong Station in Gwanju. Based on Monte Carlo simulation of the utility function and means selection logit model for each means of transportation, our findings indicate an average mode share of 0.95%, with a variability range from 0.07% to 4.7%. Moreover, 95% of the simulation outcomes fall below a 2.02% mode share. Sensitivity analysis, conducted via Tornado Plot, highlights that the mode share is principally influenced by factors such as the unit fare, cost parameter, basic fare, and the time required for takeoff and landing. Notably, a negative correlation exists for unit fare, basic fare, and takeoff and landing time, suggesting the necessity of setting an appropriate level of fair to enhance UAM utilization.

Keywords: Monte Carlo Simulation, Urban Air Mobility, Transportation Demand, Utility Function, Logit Model, Gwangju Songjeong Station

1. 서론

세계 주요 대도시에서는 교통 혼잡 문제를 해결하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 인구 과밀, 교통 인프라 부족, 교통정체, 대기오염 등 사회적 비용이 증가하고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 지상 및 지하교통수단의 개선 노력을 지속해왔다. 하지만 개선 노력에도 불구하고 교통 문제 해결에 한계를 보이고 있는 배경에서 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)의 개념이 등장하였다(Holden and Goel, 2016).

도심항공교통(UAM)은 개인용 항공기(Personal

Air Vehicle, PAV)를 활용하여 도심 내에서 사람, 화물 등을 운송하기 위한 교통 체계를 말한다. 개인용 항공기(PAV) 개념은 미국에서 처음 등장하였으며 교통체증을 해소하기 위한 소형 항공기 프로젝트에서 시작되었다. 이전까지는 대부분 지상 기반 교통 체계를 중심으로 교통 문제를 해결해왔지만, 이제는 공중운송수단을 통해 교통 문제를 해결하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

전 세계적으로 도심항공교통(UAM) 생태계 구축을 추진하고 있으며, 우리나라도 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵(관계부처합동, 2020)을 발표하는 등 이러한 흐름에 대응하고 있다. K-UAM 로드맵

*광주광역시 광산구도시재생공동체센터 팀장(주저자: innoray@nate.com)

**전주대학교 부동산국토정보학과 교수(교신저자: jongjink66@naver.com)

에 따르면 2025년까지 수도권 실증사업을 추진하고 전국적으로 확대하는 것을 계획하고 있다. K-UAM 그랜드챌린지에는 국내외 기업이 참가하는 7개 실증 컨소시엄이 참여하고 있으며 기체안정성, 운항 교통관리, 버티포트(Verti Port) 등 통합영능력을 실증하고 있다(국토교통부, 2023b). 이 외에도 국토부 미래형 복합환승센터(Mas Station)사업으로 대전역, 강릉역, 마산역, 평택지지역이 선정되어 미래형 모빌리티 복합환승센터를 추진중이다(국토교통부, 2023a).

한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵(관계부처합동, 2021)에서 제시하는 전국 5대 광역권 버티포트 건립계획을 살펴보면 2025년 4개소에서 2030년 24개소로 전국적인 확대를 계획하고 있으며, 이에 따라 광주전남권의 도심항공교통에 대한 기본 구상이 필요한 시점이다. 지역적인 차원에서 고려되어야 할 부분은 기체개발과 교통관제에 대한 영역보다는 버티포트의 입지와 건립에 관한 부분일 것으로 판단된다. 버티포트 건립을 위해서는 가장 먼저 고려되어야 할 부분은 입지와 수요이며, 합리적인 수요예측이 선행되어야 한다. 교통수요 예측시 수요예측 오차를 최소화하기 위한 대안으로서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 리스크 분석방안이 제시되고 있으며, 본 연구에서는 교통수요 예측의 리스크를 감안한 합리적 시설 투자결정을 위해서 교통수요 예측모형과 시뮬레이션을 결합한 도심항공교통 수요 추정 모형을 제안하였다.

2. 이론적 배경 및 선행연구 고찰

2.1 교통수요 예측 방법론

교통수요예측은 다양한 방법으로 추정할 수 있다. 개략적 수요예측방법, 직접 수요모형, 4단계 수요예측방법이 있으며 추정과정이 순차적이며 이해가 쉬운 4단계 교통수요 추정방법이 많이 활용되고 있다. 4단계 교통수요 예측방법은 다음과 같은 4단계를 거

친다(원재무, 2015: 100~105).

첫째, 통행발생(trip generation) 단계에서는 사회경제지표를 이용하여 교통존의 발생량(trip production)과 도착량(trip attraction)을 추정하는데, 증감률법, 원단위법, 회귀분석법, 카테고리분석법 등의 방법을 사용하여 통행 유출량과 통행 유입량을 산출하게 된다.

둘째, 통행배분(trip distribution) 단계에서는 교통존 사이의 통행량을 파악하기 위한 작업을 하게 된다. 통행분포는 교통존별 통행 유출량과 통행 유입량에 대해 기중점을 연결하는데, 기점과 종점 사이의 교통비용, 시간 등을 수학적 모형을 사용하여 설명하며, 추정방식에는 성장률법, 중력모형 등이 있다.

셋째, 통행수단선택(mode choice) 단계에서는 교통존간 통행량을 통행자가 선택 가능한 교통수단별로 세분화한다. 기중점간 분포된 통행량에 대해 선택 가능한 교통수단 중 통행자가 각 교통수단을 이용할 비율을 추정하게 되는데, 트립엔드(trip end) 모형, 트립인터체인지(O-D pair모형), 다항로짓모형 등이 있다.

넷째, 통행배정(trip assignment) 단계는 기중점간 교통수단별로 배분된 통행량을 도로망상의 노선에 배정하는 단계이다. 통행배정모형에는 최단시간 경로에 의한 모형과 다중경로에 대한 확률적 배정모형이 이용된다. 교통량의 노선배정 추정방법에는 최단경로(Min-Path) 또는 All-or Nothing방법, 용량제한최단경로방법, 다경로확률배정방법 등이 있다.

정부에서는 교통수요 예측과 관련하여 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」과 「교통시설 투자평가지침」을 제안하고 있으며, 국가교통DB(KTDB)의 O/D 및 네트워크 데이터를 이용하는 것을 권장하고 있다. 국가교통DB(KTDB)에서 현재와 미래 수단 O/D를 제공하므로 통행발생, 통행분포, 수단선택 과정이 실제로는 생략되어 교통수요 예측

이 진행되고 있다(김유찬 2018: 7). 본 연구에서는 수단선택 과정의 도심항공교통(UAM)의 이용 수요를 효용함수, 수단선택로짓모형, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 추정하고자 한다.

2.2 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 결정론적 모형과 대비되는 확률적 모형으로 도박으로 유명한 모나코의 마을 이름에서 유래하였다. 확정적 점 추정방식의 분석 모형을 결정론적 모형이라고 할 수 있는데, 입력 변수를 확정적 고정 변수값으로 입력하여 결과변수도 확정적 수치를 얻게 된다. 대조적으로 확률론적 모형은 입력변수를 확률분포로 인식하고 결과변수도 확률분포로 해석하게 된다. 확률분포의 범위와 특정 값에서의 확률을 알 수 있으므로 변동성을 반영한 모형으로 이해할 수 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 입력 변수의 확률분포를 도출하고 확률분포에 따른 난수를 발생시켜 입력변수에 대입하여 결과를 추정하는 방법이다. 본 논문에서는 수요예측을 위한 입력변수의 확률분포를 가정하고 난수를 발생시켜 최종 결과변수인 수단분담율을 산출하였다.

2.3 선행연구고찰

신교통수단인 UAM(도심항공교통)의 이용수요를 예측하기 위하여 KTX 도입 초기의 이용수요에 관한 연구, 도심항공교통 수요에 관한 연구, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 불확실성하 의사결정에 관한 선행연구를 살펴본다. 먼저 UAM 및 KTX 도입 시 이용수요에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

정해영·배정환(2013)은 서울, 광주간 대중교통 이용자를 대상으로 대중교통 수단별 선호도에 관한 선택 실험 설문을 이용하여 대중교통 수송분담률이 어떻게 영향을 받는지 분석하였다. 각 수단별 속성과 수준을 감안하여 호남선 KTX 완전개통 전과 후 운행시간, 요금 배차시간의 변화를 반영한 시나리오

를 제시하고 다항로짓모형을 이용하여 시나리오별 수송분담율을 추정하였다.

성현곤(2020: 11)은 다인 가구와의 비교를 통한 1인 가구의 차별적 교통수단 선택 특성은 성별, 혼인 상태, 신체활동 제약, 직업유형, 현재 거주지 거주 연수에 따라 뚜렷한 차별적 특성을 보인다고 하였다. 따라서 교통수요관리 정책을 추진할 경우 가구 특성에 따른 대안적 교통 수단의 필요성이 크다고 하였다.

송기한·김명현(2017)은 국가교통DB(KTDB)의 수단별 통행시간, 통행비용을 산출하고 수단별 효용함수를 기반으로 수단선택확률을 추정하였다. 수단별 효용함수의 파라미터는 예비타당성조사지침(한국개발연구원)에서 제시하는 파라미터를 적용하였다. 수도권 통행자들의 효용함수를 기반으로 무인항공기 운영시 수단분담율 계산을 위해서 통행시간, 통행비용, 수단특성상수에 대한 가정을 하고 수요추정을 진행하였다. 확률적 선택모형에 의한 수요예측이므로 선택확률이 0으로 나오지 않는 점과 수요예측을 위한 제반 가정사항들이 연구의 한계이다.

신성운·박정아(2022: 69~70)는 음이항 회귀분석을 활용하여 백화점 방문 및 교통수요에 대해 연구하였다. 분석결과 교통거점 지역과 함께 공항·터미널·기차역 여부 등 다양한 교통수단과 방문수요는 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

변상규(2021)는 에어택시 잠재 이용자들로부터 진술선호자료(SP stated preference)를 수집하고 실험계획법과 혼합로짓모형을 이용하여 수용도를 분석하였다. 4개의 교통수단 상품 대안으로 구성된 12개의 대안 세트를 도출하여 응답자에게 무작위로 3개의 세트를 제시하고 가장 선호하는 교통수단 하나를 선택하도록 요청하였다. 조사결과를 혼합로짓모형으로 분석하여 에어택시에 대한 수단분담율을 도출하였다.

박병탁 외(2021)은 K-UAM 로드맵에서 제시한 실

증노선의 침두시 UAM수요를 예측하고, 대기행렬이론으로 UAM의 평균대기시간을 계산하여 버티포트의 성능을 평가하였다. 다항로짓모형(Multinomial Logit)을 이용하여 UAM이 도입된 이후 UAM을 선택할 확률을 구하여 수단분담을 산정하였다.

채문현 외(2022)는 선행 연구의 한계(종합적인 수요 파악 한계, 승용차 통근 통행만 고려)를 보완하여 UAM의 잠재 수요 노선, 서비스 특성, 수요응답형 서비스 형태를 고려한 분석을 실시하여 3기 신도시 지구 9곳과 중심 업무 지구 3곳 간 통근 목적 통행에 대한 UAM 수단분담률과 수요를 예측하였다.

김현수·이관중(2022)은 Income Threshold 지표를 이용하여 UAM교통수요를 예측하였다. Income Threshold는 UAM을 이용할 경우 추가로 지불하게 되는 금전 비용을 절약되는 시간가치로 나눈 값을 뜻한다. UAM을 이용하여 단축되는 시간 비용이 추가로 지불하게 되는 교통수단 금전비용보다 큰 경우 이동수단을 UAM으로 변경할 것이라는 가정을 가지고 UAM수요를 예측하였다.

이종욱 외(2022)는 UAM에 대한 이용의사나 심리적 인식에 대하여 분석하였다. UAM이 운행될 것으로 예상되는 수도권 거주자를 대상으로 이용의사와 기반시설 수용성을 확인하고, 개인특성, 이동목적, 목적별 이용의사, 전반적 이용의사, 기반시설 수용성의 관계를 경로모형을 활용하여 분석하였다.

다음으로 교통수요 예측의 오류 발생을 최소화하고 리스크를 측정하고 관리하기 위한 대안적 연구는 다음과 같다.

김강수(2010: 17~18, 84~85)는 시뮬레이션을 통해 불확실성 하 다양한 O/D 교통량을 생성한 후 승객수를 추정하고 분산추정을 통해 리스크를 분석하였다. 이런 방식의 추정은 분석 결과가 점 추정치로 확정되기보다는 확률적 분포로 표현되므로, 수요 리스크를 고려한 보다 합리적인 의사결정이 가능해진다. 다시 말하면, 리스크를 분석하여 위험을 회피

할 것인지, 감당할 것인지, 감당한다면 위험을 감소시킬 수 있는 방안은 무엇인지에 대한 판단이 가능해진다.

김강수 외(2012: 28)는 도로사업의 교통량 변동성을 시뮬레이션 방법을 이용한 확률적 분포 분석을 통해 투자사업 가치의 변동성을 산정하였다. 도로사업 가치의 변동성이 교통량 추정의 리스크에 기인하며 민간투자사업의 가치 변동성은 교통량 추정 변동성에 따라 결정된다고 가정하여 프로젝트의 변동성을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다.

김유찬(2018)은 교통 분야의 수요예측 과정에서 발생할 수 있는 계획 가정의 리스크를 고려한 수요 추정모형을 제안하였다. 수요예측의 오류 원인을 측정 오류, 모형특성오류, 외생오류로 유형화하고 이를 보완하기 위한 모델을 제시하였다. 제안된 모델에서는 준공 확률을 Cox회귀모델, 다중회귀분석, 정규분포에 따라 제시하여 각각의 방식을 비교할 수 있도록 하였는데, 이에 따라 기대 수요를 추정하고 정책결정과 정에서 리스크 정보를 분석할 수 있게 하였다.

2.4 연구의 차별성

본 연구의 차별성을 세 가지 관점에서 제시한다. 첫째, 교통수요의 변동성을 반영한 확률적 수요예측 모형이다. 수요추정을 위한 입력변수를 수요의 영향요인으로 본다면 영향요인의 변화에 따른 수요의 변동성을 분석할 수 있으므로 리스크를 관리할 수 있는 의사결정 방안을 도출하는데 유용하게 활용될 수 있다. 구체적으로 운행시간, 요금, 대기시간 등 서비스 수준과 수요를 감안한 시설용량 산정 등 도심항공교통 도입을 위한 다양한 측면에서 활용될 수 있다. 둘째, 적은 시간과 비용으로 계획 수립이 용이한 보편적 수요 예측 모델이다. 기존 선행연구의 경우 대면 설문 설계와 진행 과정에서의 비용과 시간소요가 필요하며 확정적 결과추정으로 인한 적용과 해석상의 주의가 필요한 반면, 상대적으로 빠른 시간

에 수요의 전체적인 변동성을 파악할 수 있는 장점이다. 셋째, 비수도권 도심항공교통 수요 추정을 위한 선행 연구로서의 의미이다. 기존 도심항공교통 수요 예측에 관한 선행연구결과가 주로 수도권 실증 비행에 초점을 맞추고 있어 비수도권 광역단위 도심항공교통 추진을 위한 기초자료로서의 활용가능성이 기대된다.

3. 실증분석

상술한 바와 같이 본 연구는 도심항공교통의 변동성을 반영한 확률적 수요를 도출하여 리스크를 관리하고 도심항공교통 도입 의사결정에 유용한 정보를 제공함에 목적이 있다. 선행연구에서 도심항공교통 수요예측을 위하여 제시한 수단별 효용함수를 기반으로 수단선택확률을 추정하였으며, 확률적 수요 예측을 위하여 수단분담효용함수와 수단분담 로짓모형에 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하였다.

3.1 수단분담 효용함수

통행수단선택모형은 일반적으로 확률효용이론(Random Utility Theory)에 근거하여 여러 선택 대안중에서 이용자의 효용을 극대화시키는 대안을 선택하는 모형이다. 대안별 총효용(U_{ij})은 이용자(i)가 대안(j)로부터 얻는 관찰 가능한 확정적 효용(V_{ij} , deterministic utility)과 관찰할 수 없는 확률적 효용(ϵ_{ij} , random utility)으로 구성되며 다음과 같은 수식으로 표현된다(임용택, 2010: 132).

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

U_{ij} : 대안별 총효용

V_{ij} : 이용자(i)가 대안(j)로부터 얻는 확정적효용

ϵ_{ij} : 관찰할 수 없는 확률적 효용

대안별 총효용 함수를 수단분담 효용함수로 바꾸어 표현하면 다음과 같다(송기한·김명현, 2017: 7).

$$U_{ijk} = \alpha_1 T_{ijk} + \alpha_2 C_{ijk} + C_k \quad (2)$$

U_{ijk} : 수단 k의 교통존 i와 j간 효용함수

α_1, α_2 : 효용함수 파라미터

T_{ijk} : 수단 k의 교통존 i와 j간 통행시간

C_{ijk} : 수단 k의 교통존 i와 j간 통행비용

C_k : 대안특성상수

본 논문은 광주전남권 도심항공교통 이용수요를 추정하기 위하여 기종점을 광주송정역과 광주광역시 행정동 및 전라남도 22개 지자체의 행정관청이 위치한 소재지로 설정하였다. 현실적으로 해당 지자체의 행정관청 소재지가 도심의 중심지로서 해당 시설물을 입지시킬 수 있는 우선적 고려대상지로 판단되기 때문이다. 광주송정역과 전라남도 22개 지자체의 행

Table 1. Utility Function Parameter

| Classification | | Mean | Stdev |
|--------------------------|--------------|----------|----------|
| Time Parameter | | -0.03555 | 0.00462 |
| Cost Parameter | | -0.00021 | 0.00003 |
| Characteristic Constants | Car | 0 | 0 |
| | Taxi | -1.64506 | 0.22843 |
| | Bus | -0.46504 | 0.20492 |
| | Train/Subway | -2.18611 | 0.48632 |
| | UAM | -2.5 | 0.15198 |
| Classification | | Max | Min |
| Time Parameter | | -0.02028 | -0.05069 |
| Cost Parameter | | -0.00012 | -0.00033 |
| Characteristic Constants | Car | 0 | 0 |
| | Taxi | -1.05534 | -2.55838 |
| | Bus | 0.07769 | -1.2707 |
| | Train/Subway | -0.05794 | -3.25795 |
| | UAM | -2 | -3 |

Source : Kim et al. (2008) (in Korean)

정관청 소재지간 수단별 소요시간과 비용은 카카오 맵을 이용하여 조사하였다. 수단별 효용함수 파라미터는 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준 지침」에서 제시한 효용함수 파라미터와 대안특성상수를 이용하였으며, Table 1에 데이터를 제시하였다.

3.2 수단분담 로짓모형

수단별 효용함수를 이용하여 수단별 통행분담율을 구하기 위해서는 프로빗모형 또는 로짓모형을 사용한다. 확률밀도함수를 정규분포(Normal distribution)로 가정하면 프로빗모형(Probit model), 와이블분포(Weibull distribution)를 가정하면 로짓모형(Logit model)이다. 정규분포를 가정하는 프로빗모형이 현실적이지만 계산상의 어려움으로 일반적으로 로짓모형을 많이 사용한다. 효용함수를 이용한 수단분담 로짓모형의 형태는 다음과 같다(임용택 2010: 133).

$$P_k = \frac{\exp(U_k)}{\sum_i^n \exp(U_i)} \quad (3)$$

P_k : 수단 k를 선택할 확률

U_k : 수단 k의 효용

U_i : 수단 i의 효용

n: 수단의 개수

3.3 데이터 및 변수설정

수단분담 로짓모형과 시뮬레이션을 구현하기 위한 데이터를 크게 상수와 변수로 구분하였다. 상수는 운행시간, 비용과 같이 유동적일 수 있으나 일반적인 수준에서 예상 가능하여 고정적이라고 인식되는 데이터이다. 변수는 교통수단별 접근시간, 대기시간, UAM이착륙시간, UAM속도, UAM 기본요금, UAM 단위요금 등 도심항공교통(UAM) 도입시 결정

해야 하는 데이터로서 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 민감도 분석을 하기 위한 영향요인으로 볼 수 있으며 Table 2와 식 (4)~(8)에 표현하였다.

Table 2. Variables Description

| Name | Variable Description | Data Sources | |
|------|---------------------------|---|-------------------------------|
| v01 | car_time (minute) | Kakao Map (2023) (in Korean) | |
| v02 | car_cost (won) | | |
| v03 | car_distance (km) | | |
| v04 | taxi_time (minute) | | |
| v05 | taxi_cost (won) | | |
| v06 | taxi_distance (km) | | |
| v07 | bus_time (minute) | | |
| v08 | bus_cost (won) | | |
| v09 | bus_distance (km) | | |
| v10 | train_time (minute) | | |
| v11 | train_cost (won) | | |
| v12 | average_distance (km) | | |
| v13 | bus_access time | Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) (in Korean) | |
| v14 | bus_wating time | | |
| v15 | train_access time | | |
| v16 | train_wating time | Joint Government of Relevant Ministries (2021) (in Korean) | |
| v17 | UAM_access time | | |
| v18 | UAM_wating time | | |
| v19 | UAM_take off/landing time | | |
| v20 | UAM_unit cost | | |
| v21 | UAM_base rate | | |
| v22 | UAM_velocity | | |
| v23 | α1_time parameter | | Kim et al. (2008) (in Korean) |
| v24 | α2_cost parameter | | |
| v25 | car_constants | | |
| v26 | taxi_constants | | |
| v27 | bus_constants | | |
| v28 | train_constants | | |
| v29 | UAM_constants | Song and Kim (2017) (in Korean) | |

효용함수의 시간, 비용, 수단특성상수 파라미터는 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」에서 제시한 데이터를 이용하였다(김강수 외, 2008: 267). 수도권 및 광역권별로 시간, 비용 파라미터 및 수단특성상수를 제시하고 있는데 제시된 데이터를 기준으로 평균, 최대, 최소값, 표준편차를 산출하였다. 표준편차는 최댓값과 최솟값이 6.58σ 만큼 떨어져 있음을 가정하여 산출하였는데, 표준정규분포를 가정한다면 $-3.29\sigma \sim 3.29\sigma$ 사이의 확률은 전체의 99.9%에 해당하므로 (Max - Min)을 6.58로 나눈값을 표준편차로 개략 추정하였다. 관련 데이터는 Table 1과 같이 표현된다.

$$\exp(U_{Private Car}) = \exp(v_{23} * v_{01} + v_{24} * v_{02} + v_{25}) \quad (4)$$

$$\exp(U_{Taxi}) = \exp(v_{23} * v_{04} + v_{24} * v_{05} + v_{26}) \quad (5)$$

$$\exp(U_{Bus}) = \exp(v_{23} * (v_{07} + v_{13} + v_{14}) + v_{24} * v_{07} + v_{27}) \quad (6)$$

$$\exp(U_{Train}) = \exp(v_{23} * (v_{10} + v_{15} + v_{16}) + v_{24} * v_{11} + v_{28}) \quad (7)$$

$$\exp(U_{UAM}) = \exp \left[(v_{23} * (v_{12}/v_{21} * 60 + v_{17} + v_{18} + v_{19}) + v_{24} * (v_{21} + v_{12} * v_{20}) + v_{29}) \right] \quad (8)$$

버스 및 지하철의 접근시간, 대기시간은 「대중교통현황조사」(국토교통부, 2022: 160~163)에서 제시된 데이터를 적용하였으며 Table 3에 제시하였다.

“한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵”(관계부처합동, 2021: 105)에서는 주요 영향요인을 통한 UAM으로의 전환을 산출 시나리오를 제시하고

Table 3. Bus/Subway Access time and Waiting Time

| | Variable | Mean | Stdev |
|--------|--------------|-------|-------|
| Bus | Access Time | 7.92 | 5.053 |
| | Waiting Time | 15.42 | 7.723 |
| Subway | Access Time | 10.87 | 6.752 |
| | Waiting Time | 8.94 | 4.534 |

Source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) (in Korean)

Table 4. Distribution of Urban Air Traffic Variables

| Variable | Mean | Max | Min | Stdev |
|-------------------------------|------|-------|------|---------|
| Velocity (km/h) | 225 | 300 | 150 | 24.27 |
| Base Rate | 6000 | 10000 | 2000 | 1294.49 |
| Unit Cost | 1750 | 3000 | 500 | 404.53 |
| Access Time (m) | 10 | 15 | 5 | 1.618 |
| Waiting Time (m) | 5 | 7 | 3 | 0.64 |
| Take Off/ Landing Time (m) | 4 | 6 | 2 | 0.64 |

Source: Joint Government of Relevant Ministries (2021), Song and Kim (2017) (in Korean)

있는데, UAM의 영향요인으로서 속도, 접근시간, 기본운임, 단위운임(km당 운임)에 대한 데이터를 가정하고 있다. 속도 150~300km/h, 접근시간 5~20분, 기본운임 2~10천원, 단위운임(km당운임) 0~1천원을 제안하고 있으며, 송기한·김명현(2017: 6)은 대기시간 5분, 이착륙시간 4분을 제안하고 있다. 관련 데이터는 Table 4에 제시하였다. 본 연구에서는 선행연구에서 제안한 영향요인의 범위(최솟값~최댓값)를 이용하여 평균, 표준편차를 개략적으로 산출 적용하였다. 최댓값과 최솟값의 차를 6.58로 나눈값을 표준편차로 산출하였다.

효용함수 파라미터, 버스와 지하철/철도의 접근시간, 대기시간, 도심항공교통(UAM)의 속도, 기본운임, 단위운임, 접근시간, 대기시간, 이착륙시간을 각각 정규분포로 가정하고 효용함수와 로짓모형의 시뮬레이션을 구현하였다.

3.4 분석결과

몬테카를로 시뮬레이션 구현과 분석을 위하여 ModelRisk를 사용하였다. 시행횟수는 1,000회이며 시뮬레이션 결과 평균 도심항공교통(UAM)의 평균 수단분담율은 0.95%, 최소 0.07%, 최대 4.7%로 분석되었다. Table 5에서 관련 기초통계량을 제시하였다. Fig. 1 히스토그램을 통해 살펴본 수단분담율은 오른쪽분포(skewed to the right)이며 전체 분포의 95%가 수단분담율 2.02% 이하에 분포함을 볼

수 있다.

본 연구는 광주송정역에 버티허브(Verti Hub)를 건립하고 광주광역시 전체 행정동과 전라남도 22개 시군 행정청사 소재지 일원에 버티포트(Verti Port)가 설치될 경우 예상되는 도심항공교통(UAM)의 수단분담율을 효용함수, 로짓모형, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 추정하였다. 분석결과 도심항공교통(UAM)의 수단분담율 분포를 파악할 수 있었는데, 민감도 분석을 통하여 입력변수의 변화에 따른 결과 변수인 도심항공교통(UAM)의 수단분담률 변화를 분석할 수 있었다.

Table 5. Monte Carlo Simulation Statistics

| Classification | Statistics |
|--------------------|-------------|
| Mean | 0.00951443 |
| Min | 0.000714672 |
| Max | 0.047160564 |
| Standart Deviation | 0.005700817 |
| Skewness | 1.599588523 |
| Kurtosis | 7.406839737 |

ModelRisk에서는 민감도 분석을 위한 Conditional Mean, Conditional Cumulative Percentile, Regression, Rank Correlation 4가지 종류의 토네이도 차트를 제공하고 있는데, 본 연구에서는 Conditional Mean Tornado Plot과 Rank Correlation Tornado Plot 분석 결과를 다음과 같이 제시한다.

Fig. 2에서 Conditional Mean Tornado Plot을 보

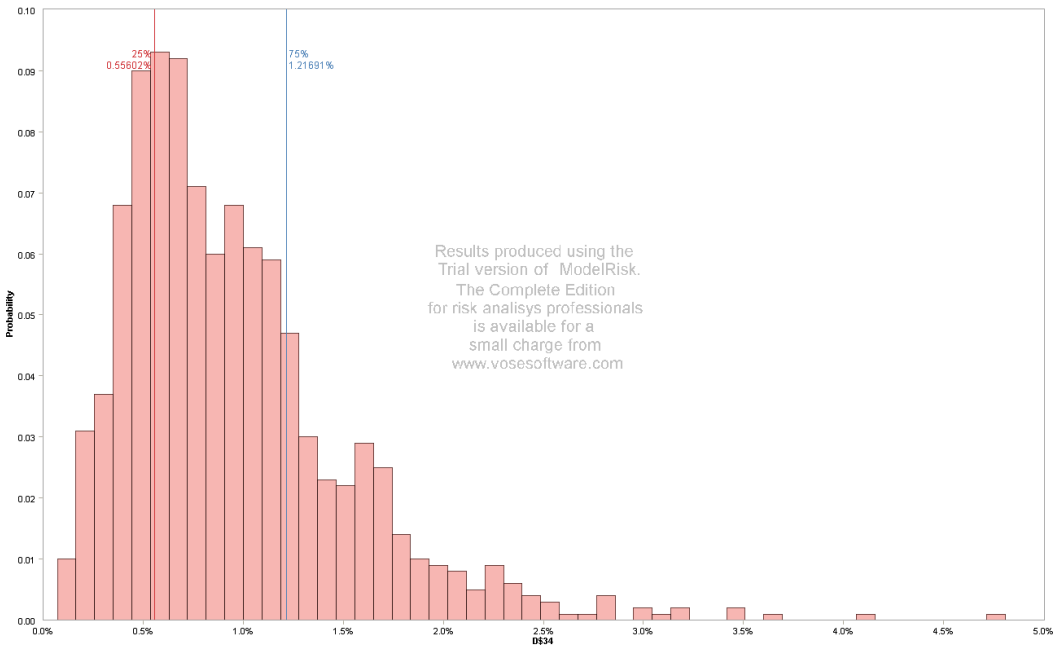


Fig. 1. Histogram of UAM Ratio

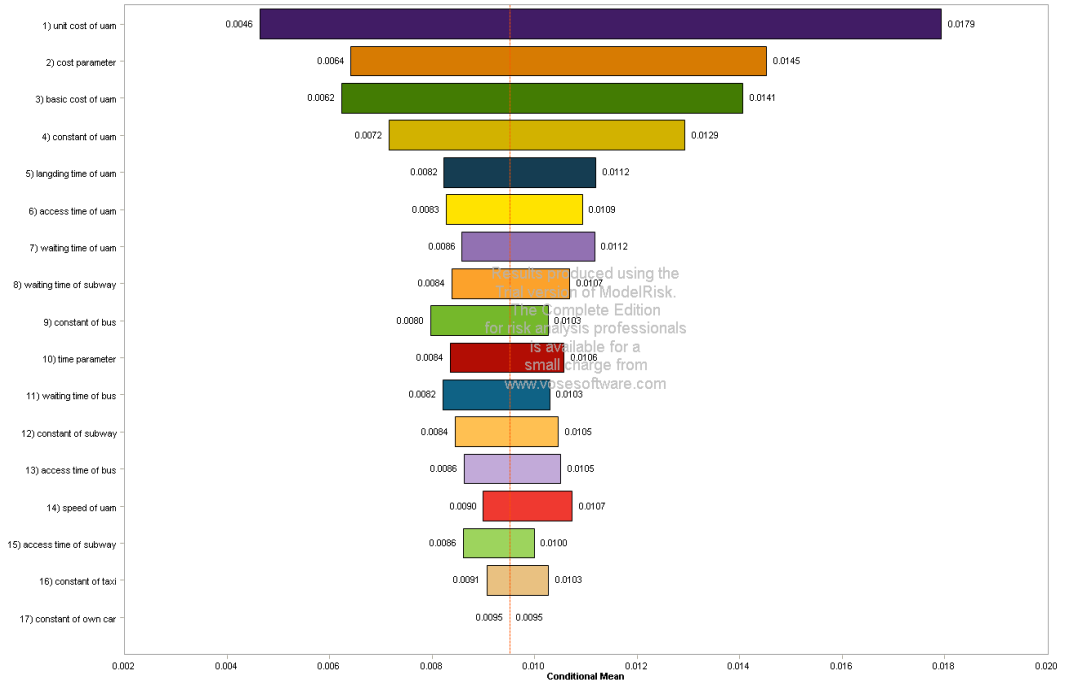


Fig. 2. Conditional Mean Tornado Plot

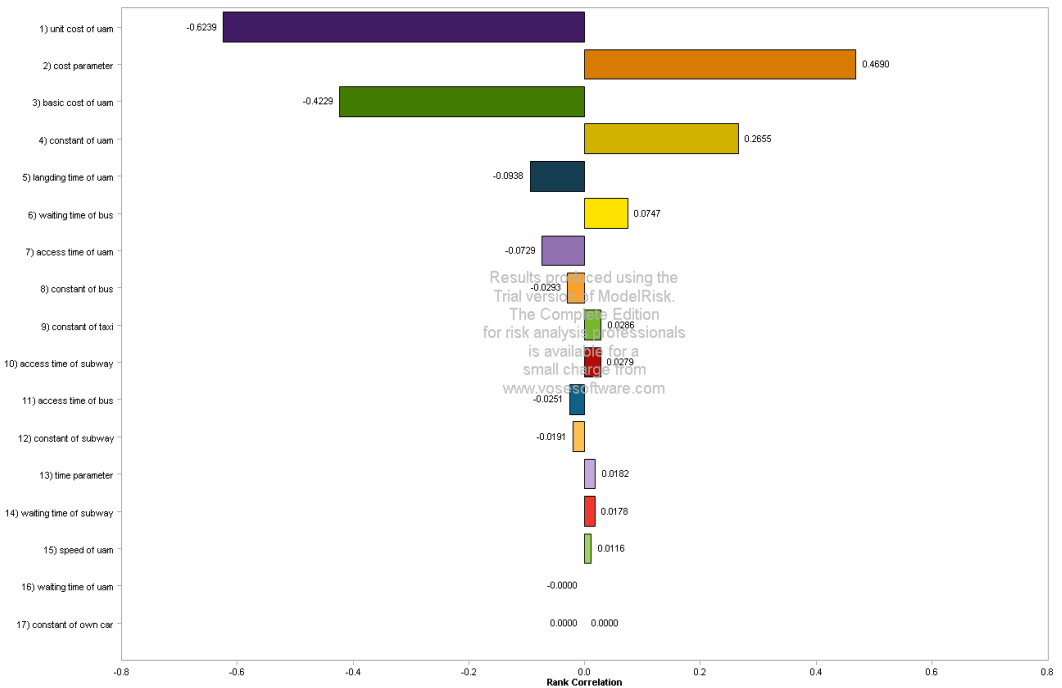


Fig. 3. Rank Correlation Tornado Plot

여주고 있다. Conditional Mean 유형에서 막대 길이는 입력변수의 최솟값과 최댓값을 입력했을 때의 결과변수 값인 수단분담율의 평균 차이를 나타낸다. 막대길이가 길수록 해당 입력변수의 영향력이 더 크음을 의미하며 영향력이 가장 큰 변수가 가장 위에 위치하고 영향력순으로 나열되고 있다. UAM 단위요금, 비용파라미터, UAM 기본요금, UAM 이착륙시간순으로 영향력이 크음을 볼 수 있다.

Rank Correlation Tornado Plot은 Fig. 3과 같이 표현된다. 입력변수와 결과변수의 서열상관계수의 크기를 위로부터 긴 순서대로 제시하고 있다. Conditional Mean Tornado Plot의 결과와 마찬가지로 주요 영향요인은 UAM 단위요금, 비용파라미터, UAM 기본요금, UAM 이착륙시간으로 나타났다. Rank Correlation Tornado Plot 유형에서는 양의 상관관계, 음의 상관관계를 살펴볼 수 있는데 UAM 단위요금, UAM 기본요금, UAM 이착륙시간, UAM 접근시간은 음의 상관관계를 보임을 알 수 있다.

본 연구의 분석 결과는 도심항공교통(UAM) 도입을 위한 정책 의사결정 과정에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

첫째, 도심항공교통(UAM), 버티허브(Verti Hub)의 시설 용량(Capacity) 산정을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 국가교통DB(KTDB, 2023)에서는 지역별/수단별 OD통행량을 제공하고 있다. 수단분담율과 지역별 총 기종점 통행량(OD통행량)을 이용하여 지역간 도심항공교통(UAM) 예상 통행량을 추정할 수 있으며 추정 데이터를 통해 버티허브(Verti Hub)의 시설용량을 위한 데이터로 활용이 가능하다.

둘째, 요금수준의 결정이다. 민감도 분석결과와 같이 도심항공교통(UAM)의 활성화를 위해서는 적절한 요금체계가 중요하다. 도심항공교통(UAM)의 요금수준에 대해서 정부는 “한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵”과 “한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵”에서 성장단계별 이용 운임을 제안하

고 있다. 도심항공교통(UAM)의 도입 초기를 거쳐 성장기와 성숙기로 갈수록 이용 운임을 인하하는 것을 목표로 하고 있으며, 이용자 운임은 자율비행이 실현될 경우 500원 수준으로 저감이 가능할 것으로 예상하고 있다. 시뮬레이션 분석을 통해 기본요금, 단위요금의 수준을 변화시키면서 단계별 수요목표와 시설용량 수준 결정을 위한 의사결정에 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

4. 결론

도심항공교통(UAM)은 대도시권 교통체증 완화를 위한 대안으로 제안되었으며, 모빌리티 산업의 전환, 인공지능, 자율주행, 2차전지, 수소연료 기술의 발전으로 점차 현실화되고 있다. 국내에서는 한국형 도심항공교통 실증사업(K-UAM 그랜드챌린지)에 국내의 46개사가 통합실증 7개 컨소시엄을 구성하여 참여하고 있으며, 그랜드챌린지 2단계(2024년 6월~2025년 06월) 기간에는 수도권 실증비행을 계획하고 있다. 이 외에도 제주, 대구, 충청광역시, 전남 등 광역지자체와 평택, 강릉, 마산 등 기초지자체에서도 도심항공교통(UAM)의 도입을 추진하는 등 실용화에 점차 다가서고 있다.

광주송정역은 광주광역시의 관문역으로서 이용객이 빠르게 증가하고 있으며, KTX, SRT, 버스, 지하철의 환승이 이루어지는 복합환승센터의 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 광주송정역에 대한민국의 서남권 도심항공교통(UAM)의 버티허브(Verti Hub)를 건립하였을 경우 예상되는 도심항공교통에 대한 수요를 수단로짓모형과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다.

신교통수단에 대한 수단분담율을 예측하는 선형 연구는 주로 진술선호에 의한 다항로짓모형을 사용하는 연구가 대다수이다. 반면 정부의 예비타당성 조사 수행에서는 현시선호에 의한 O/D데이터, 수단효

용합수를 이용한 로짓모형을 주로 제안하고 있다. 진술선호 기반의 설문조사 방식과 국가교통DB(KTDB, 2023) O/D데이터를 이용한 수단분담율 방식 모두 예측 한계가 발생할 수 있다. 이는 신교통수단에 대한 이해부족, 확정적 변수설정으로 인한 변동성을 반영하지 못하는 것이 주요 원인이다. 본 연구에서는 수단별 효용합수, 로짓모형과 확률적 변수분포를 가정하는 몬테카를로 시뮬레이션을 결합하여 불확실성 상황하 의사결정을 위한 교통수요추정 방식을 제안하였다.

분석결과 광주송정역에 광주전남권을 대상으로 하는 버티허브(Verti Hub)를 건립하였을 때 도심항공교통(UAM)의 평균 수단분담율은 0.95%수준이며, 수단분담율 2.02% 이하에 전체 시뮬레이션 결과의 95%가 분포하는 것으로 나타났다. 또한 수단분담율에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 UAM 단위요금, 비용파라미터, UAM 기본요금이 나타났으며, 수단분담률과 요금요인은 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

본 연구의 목적은 수단 효용합수와 수단선택 로짓모형을 기초로 광주송정역에 대한민국 서남권 버티허브(Verti Hub)를 건립하였을 경우 도심항공교통(UAM)의 수단분담을 추정하고 시설용량 계획과 요금체계 수립과정에 유용한 기초자료를 제공하기 위함이다. 타 지역의 도심항공교통(UAM) 도입시에도 본 연구에서 사용된 추정방식을 활용하여 수단분담율을 분석하고 몬테카를로시뮬레이션(MCS)에 의해 분석된 수요 분포를 진술선호방식(SP)에 의한 수요예측모형과 상호 보완적으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서는 선행연구에서 제시한 도심항공교통(UAM)의 대안특성상수인 -3를 감안하여 대안특성상수의 범위를 -2에서 -4의 범위로 정하고 시뮬레이션을 실시하였으나 도심항공교통의 대안특성상수에 대한 추가 연구는 향후 보완되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 관계부처합동(2020), “도시의 하늘을 여는 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵”, 세종.
2. 관계부처합동(2021), “한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵”, 세종.
Joint Government of Relevant Ministries (2021). “K-UAM Technology Roadmap”, Sejong. (in Korean)
3. 국토교통부(2022), 「대중교통 현황조사 종합결과 보고서」, 세종.
Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022), *Survey on Public Transportation Status*, Sejong. (in Korean)
4. 국토교통부(2023a), “미래형 환승센터 시범사업 4곳 선정”, 세종.
5. 국토교통부(2023b), “한국형도심항공교통 실증 첫 걸음...46개사 출사표”, 세종.
6. 김강수·우지원·이승현·김재영(2008), 「도로철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정보완 연구」, 세종: 한국개발연구원.
Kim, G. S., J. W., Woo, S. H. Lee and J. Y. Kim (2008), *Standard Guidelines for Preliminary Feasibility Studies of Road And Rail Sector Projects*, Sejong : Korea Development Institute. (in Korean)
7. 김강수·양인석·조성빈(2012), 「민간투자 도로사업의 교통수요 예측위험가치」, 세종: 한국개발연구원.
8. 김강수(2010), 「SOC 투자 의사결정 합리화 방안(II)」, 세종: 한국개발연구원.
9. 김유찬(2018), “계획 가정의 리스크를 고려한 교통수요예측방안 연구”, 박사학위논문, 서울시립대학교.
10. 김현수·이관중(2022), “서울 수도권의 UAM 수요 예측 분석”, 「한국항공우주학회 추계학술논문집」, 738~739.
11. 박병탁·김현미·김상현(2021), “초기 수도권 UAM 실증노선 예상 수요에 따른 버티포트 성능 연구”, 「대한교통학회 제85회 학술발표회」, 585~586.
12. 변상규(2021), “개인용 공중운송에 대한 수요의 특성 연구”, 박사학위논문, 부산대학교.
13. 성현곤(2020), “다인 가구와의 비교를 통한 1인가구의 통근수단 선택 결정요인의 차별적 특성의 파악”, 「LHI Journal」, 11(2): 1~14.
14. 송기한·김명현(2017), 「미래형 자율비행 개인항공

- 기 교통수요 예측 및 교통부문 적용방안 연구, 세종: 한국교통연구원.
 Song, K. H. and M. H., Kim (2017), *A Study on the Future Autonomous Airplane Traffic Demand Forecast and Application of the Transportation Sector*, Sejong: Korea Transportation Research Institute. (in Korean)
15. 신성윤·박정아(2022), “빅데이터(POS)를 활용한 백화점 방문수요 결정요인에 관한 연구”, 『LHI Journal』, 13(4): 55~71.
 16. 원재무(2015), 『도시교통론』, 서울: 박영사.
 17. 이종욱·최현정·홍성조(2022), “도시형 공중 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM) 이용의사 및 지상기반시설(버티포트)수용성의 영향요인”, 『국토계획』, 57(4): 25~36.
 18. 임용택(2010), “로짓 수단선택모형의 연구”, 『대한교통학회지』, 28(5): 132~133.
 19. 정해영·배정환(2013), “호남선 KTX 완전개통에 따른 장거리 대중교통 수송분담률예측”, 『산업혁신연구』, 19(4): 111~140
 20. 채문현·채홍아·강준구·김상현(2022), “3기 신도시와 중심 업무 지구 간 통근 목적의 UAM 수요 예측”, 『한국항공우주학회 추계학술 논문집』.
 21. Holden, J. and N. Goel (2016), *Fast Forwarding to a Future of on Demand: Urban Air Transportation*, San Francisco: Uber.
 22. 국가교통DB(KTDB), “여객통행수요분석”, 2023.12.11 읽음. <http://www.ktdb.go.kr>.
 23. 카카오맵(2023), “경로검색 서비스”, 2023.12.11. 읽음. <http://map.kakao.com>.
 Kakao Map (2023), “Path Search Service”, Accepted December 11, 2023. <http://map.kakao.com> (in Korean)

요 약

본 연구는 대한민국 서남권의 도심항공교통(UAM) 거점환승센터를 광주송정역에 건립하였을 경우 도심항공교통(UAM)의 수단분담률을 예측하는 것이다. 효용함수와 수단선택 로짓모형을 이용한 점 추정방식의 확정적 교통수요 예측모형은 미래의 변동성을 반영하는 못하는 한계점을 지니며 이를 보완하고자 본 연구에서는 효용함수와 몬테카를로 시뮬레이션 분석을 결합하여 확률론적 도심항공교통의 수단분담률을 추정하였다. 도심항공교통의 수단분담률을 결정하는 변수의 확률분포를 가정하여 시뮬레이션 결과 최소 0.07%, 최대 4.7%, 평균 0.95%의 수단분담률로 산출되었다. 수단분담률에 영향을 미치는 주요 영향 요인의 민감도 분석 결과 단위요금, 비용파라미터, 기본요금, 이착륙 시간이 중요 요인으로 나타났으며, 단위요금, 기본요금, 이착륙 시간은 음(-)의 상관관계를 보이는 것으로 나타나 도심항공교통의 이용 활성화를 위해서는 적정 수준의 요금 설정이 중요할 것으로 판단된다.

주제어: 몬테카를로 시뮬레이션, 도심항공교통, 교통수요, 효용함수, 로짓모형, 광주송정역