

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2022.30.4.023>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

도심항공모빌리티의 운용효율성에 관한 연구

송재두*

A Study on the Operational Efficiency of UAM(Urban Aerial Mobility)s

Jaedo Song*

ABSTRACT

Prototype UAMs are shown to us in the market. When the complete product is delivered to market, the efficiency of each UAMs can be compared by default. Before the complete product is shown to us, the comparative study on efficiency of UAMs is performed under the product cost estimation. The efficiency analysis result reveals that both of Lift & Cruise type and vectored thrust type show good efficiency at the initial stage of product. At the near terms stage, five years later from initial stage end, efficiency gets some change. Vectored thrust type of UAMs show best efficiency at the near term stage of product. Because UAMs will be used in urban area, Seoul is the place where the UAMs will be used first. The flying route from Seoul City Hall to Yongsan Park, National Assembly in Yeouido, and City Airport is no more than 10 km distance. For this short distance route, efficiency will make multi-rotor type UAM be preferred to other types. For long distance route or commuting route, life & cruise type and vectored thrust type of UAMs will be preferred on account of operational efficiency.

Key Words : UAM(도심항공모빌리티), Flying Taxi(드론택시), PAV(개인항공운송수단), Commuting Vehicle(노선운용 기체), On-demand Vehicle(승객요구형 기체)

1. 서 론

현재의 교통 운송시스템은 포화상태에 있고 각 도로의 정체는 극심하다. 한국교통연구원의 발표 자료에 따르면 2018년 교통혼잡비용은 67조 원을 상회하고 있으며 전년 동기대비 13.66%의 증가를 보이고 있다[1].¹⁾ 또한 교통혼잡비용은 2018년 명목 GDP의 3.57%에 달할 정도로 국가 경제활동에 큰 영향을 미치고 있다.

미국의 경우 Moore의 NASA보고서에서 미국의 교통 운송시스템의 문제를 해결할 대안으로 도심항공 모빌리티(UAM: urban aerial mobility)를 제시하고 있다 [2]. 우리나라 정부에서도 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵을 2020년 5월에 발표하였다[3]. 우리 정부는 도시 지상교통 혼잡의 해결수단으로서 도심항공 모빌리티를 제시하고 있으며 2025년 상용화를 목표로 거시적인 로드맵을 마련하였으며, 일관된 정책의 추진이 필요함을 밝히고 있다.

Received: 14. Jul. 2022, Revised: 08. Aug. 2022,

Accepted: 10. Aug. 2022

* 중원대학교 드론운용전공 주임교수, 대학원 국제물류통상학과 주임교수

연락처 E-mail : jjdsong@jwu.ac.kr

연락처 주소 : 충청북도 괴산군 괴산읍 문무로 85, 중원대학교 M2-904

1) 한국교통연구원의 정의에 의하면 교통혼잡비용(traffic congestion cost)이란 도로상을 주행하는 차량들이 교통 혼잡으로 인하여 정상속도(교통혼잡비용 추정 기준속도) 이하로 운행하게 됨으로 발생하는 시간가치의 손실, 차량운행비의 증가와 같이 추가적으로 발생하는 총체적인 비용을 말한다.

보잉과 에어버스와 같은 기존 항공업계에서도 도심 항공 모빌리티에 대한 접근을 하고 있으며 기체를 개발하고 있다. 보잉과 에어버스 이외에 벨(Bell), 볼로콥터(Volocopter), 릴리움(Lilium), 조비(Joby), 이항(eHang)과 같은 회사에서 도심항공 모빌리티를 개발하고 있으며 시범운행을 한 결과를 발표하고 있다. 우리나라에서도 한화, 현대, 대한항공, 한국항공우주연구원 등에서 기체를 개발 중에 있다. 모건스탠리의 예측으로는 글로벌 UAM 시장규모가 2040년경에는 1조 5,000억에 이를 것으로 전망하고 있으며, 2050년경에는 UAM의 승객이 4억 5,000만 명에 달할 정도로 UAM은 대중화될 것으로 전망하고 있다[4].

UAM에 대한 수요와 공급은 증가할 것으로 예견되고 있는데, 기체를 개발하고 있는 업체에 따라서 기체의 모양이 다르다. 멀티콥터형의 기체를 개발하는 곳도 있고, 비행기형태의 기체를 개발하는 곳도 있기 때문이다. 기체의 형태가 이렇게 달리 개발되는 이유는 기체의 형태에 따라서 장단점이 존재하며, 기체의 특징 중 어떠한 점을 더욱 부각시킬 것인가에 따라서 기체의 형태를 결정해야하기 때문이다. 도심지 안에서만 이동할 것인가, 아니면 외곽지역까지 포함하여 비교적 먼 거리까지 운항할 것인가에 따라서 기체의 형태가 달라져야 하기 때문이다.

이 연구를 진행하게 된 배경은 바로 여기에 있다. 업체별로 다른 형태의 기체를 개발하고 있는데, 운항을 하게 되면 어떠한 형태의 기체가 더욱 경제적 효율성이 있는지를 확인하고자 하는 것이 연구의 목적이자 의의이기 때문이다. 기체의 형태별로 일반적인 경제적 효율성은 어떠한지 비교하고, 운항의 방법에 따라서 경제적 효율성이 달라질 수 있는지를 살펴볼 필요가 있다.

현재 우리가 이용하고 있는 자동차가 지금처럼 대중화될 수 있었던 것은 경제적 효율성이 있었기 때문에 가능하였다. 1900년대 초에 자동차산업이 크게 흥성할 수 있었던 것은 경제적 효율성이 매우 좋은 자동차를 포드에서 출시하였기 때문에 가능하였다. 자동차처럼 도심항공 모빌리티산업이 향후에 크게 흥성할 수 있기 위해서는 경제적 효율성이 충분히 좋아야 한다. 따라서 이 연구에서는 현재 개발 중인 UAM의 경제적 효율성을 살펴보고자 한다.

II. UAM의 분류와 선행연구

2.1 UAM의 종류와 분류

지금까지 개발되었거나 개발 중인 도심항공 모빌리

티들을 이착륙의 방식과 추진방식으로 분류하면 다음과 같이 네 가지의 유형으로 분류할 수 있다. 나는 자동차의 형태, 멀티콥터의 형태, 수직이륙 후 전진추력으로 전진하는 형태, 수직이륙 후 로터부위가 회전하여 전진하는 형태와 같이 나눌 수 있다. 나는 자동차의 형태는 flying car로 표현되며, 멀티콥터형의 기체는 multicopter로, 수직이륙 후 전진추력을 이용하는 기체는 Lift and Cruise configuration으로, 수직이륙 후 로터부위가 회전하는 기체는 Vectored Thrust configuration으로 표현된다.

Flying car의 형태는 2000년대에 들어와서는 모두 날개를 접고 퍼는 방식이다. 도로를 주행할 때에는 고정익 또는 회전익을 접고 주행하며, 하늘로 날기 위해서는 접었던 날개를 퍼는 방식이다. multicopter형의 기체는 싱글로터(single rotor) 헬리콥터가 아닌 멀티로터(multi rotor) 헬리콥터의 일종으로서 여러 개의 회전날개를 이용하여 이착륙은 물론 공중기동까지 할 수 있도록 하는 기체이다.

Lift and Cruise 형태의 기체는 전체적으로 고정익 비행기의 형태를 보이며, 수직 추력을 담당하는 작은 로터를 이용하여 수직이착륙을 하고, 전진 추력을 담당하는 큰 로터를 이용하여 비행을 하는 방식이다. 공중에서 이동을 할 때에는 추력을 담당하는 큰 로터만을 이용하며, 수직 추력을 담당하는 작은 로터는 이륙 시와 이륙 후 전진추력을 온전히 발생시킬 때까지 그리고 착륙 전 전진 추력을 온전히 멈출 때까지 추력을 담당한다.

Vectored Thrust 형태의 기체도 전체적으로 고정익 비행기의 형태를 보이지만, Lift and Cruise형태의 기체와 달리 수직 추력을 담당했던 로터가 공중에서 이동할 때에는 전진추력을 담당하는 점이 특징이다. 이착륙 시 수직 추력을 담당했던 로터가 전진 추력을 담당하도록 회전하는 틸트로터(tiltrotor)형의 방식이 있고, 로터가 부착되어 있는 날개 전체가 회전하여 전진 추력을 담당하도록 하는 틸트날개(tiltwing)형의 방식이 있다.

이 연구에서는 원활한 분석을 위해서 flying car형태는 분석에서 제외하기로 한다. multicopter형태 중에서는 Volocopter만이 분석의 대상에 포함하기로 한다. Lift and Cruise 형태에서는 Wisk Cora, Aurora PAV, Uber eCRM-003을 대상에 포함하기로 하며, Vectored Thrust 형태에서는 Lilium Jet, A³ Vahana, Joby S4를 대상에 포함하여 분석을 진행하기로 한다. Table 1에서 UAM의 분류와 이에 따르는 기체들을 확인할 수 있다.

Table 1. Category of modern UAMs

Flying Car	Multicopter
지상주행 가능 활주로를 이용한 STOL 방식	PopUp만 지상주행 가능 도심지 vertiport이용 VTOL방식
<ul style="list-style-type: none"> Transition AeroMobil 3.0 4.0 Liberty Pioneer 	<ul style="list-style-type: none"> BlackFly Volocopter Ehang 184 Comorant PopUp CityAirbus
Lift and Cruise	Vectored Thrust
지상주행 불가능 멀티콥터와 고정익 비행기의 결합 도심지 vertiport 이용 VTOL방식	지상주행 불가능 로터부위 회전을 통한 멀티콥터와 고정익 비행기의 결합 도심지 vertiport 이용 VTOL방식
<ul style="list-style-type: none"> Wisk Cora Aurora PAV Uber eCRM-003 SA-1 	<ul style="list-style-type: none"> Lilium Jet A³ Vahana Joby S4 Nexus 4EX

2.2 선행연구

도심항공 모빌리티에 관한 연구는 크게 3가지의 방향으로 분류된다. 법률적인 문제, 이착륙장과 같은 기반시설에 관한 문제, 모빌리티 자체에 관한 문제가 그것이다. 하지만 모빌리티에 관한 문제 중에서 비용이나 효율성과 관련한 연구는 매우 제한적이다.

도심항공 모빌리티에 대한 개념이 대중에게 알려지기 전인 2007년에 Hawang and Ahn(2007)는 회전을 바탕으로 하는 도심항공 모빌리티의 플랫폼을 제시하였다[5]. 이후에 소개된 Yun and Huh(2009)의 연구는 기체의 추진시스템에 대하여 살펴보았는데, 현재 도심항공 모빌리티의 개발추세와 일치하는 방향을 제시하였다[6]. 현재 개발 중인 도심항공 모빌리티의 모습과 조금 더 비슷한 모습의 개념설계를 보여준 연구는 Byun et al.(2014)와 Lim et al.(2017)의 연구에서 찾아볼 수 있다[7][8].

Lee et al.(2020)의 연구는 이 연구가 시도하고자 하는 연구에 다소 근접한 연구결과를 보여주고 있다[9]. eVTOL 방식의 도심항공 모빌리티를 이륙 후 로터의 추진방식에 따라서 분류한 뒤 각각의 유형에 대

한 에너지 소모량을 추정하였다. Kim and Yee(2021)은 eVTOL 도심항공 모빌리티의 제작비용 예측 방법을 제시하고 있다[10]. 엔진을 이용하는 항공기에 대한 가격 예측의 방법은 다양하게 존재하지만, eVTOL UAM의 가격 예측 방법은 제시된 바가 없기에 이들의 연구는 도심항공 모빌리티의 가격을 예측할 수 있는 매우 훌륭한 방법을 제시하고 있다는 점에서 큰 의의가 있다.

Song(2021)는 도심항공 모빌리티를 형상과 추진방식에 따라서 네 종류로 분류하고 종류별 운항 효율성을 비교하였다[11]. 그는 도심항공 모빌리티를 플라이카형, 자이로플레인형, 멀티콥터형, 복합형/틸트형과 같이 네 종류로 분류한 뒤 운항에 따르는 경제적 효율성을 비교하였다. 연구에서는 운행비용과 구매비용을 고려한 경제적 효율성의 비교에서 고정익을 활용한 기종의 형태가 가장 경제적 효율성이 좋다는 것을 확인하고 있다. 멀티콥터 형태의 모빌리티가 가장 효율성이 낮다는 것을 또한 확인하고 있다.

이상에서 확인한 것처럼 소수의 연구에서 비용과 효율성을 확인하고 있는데, 이들 선행연구는 이 연구를 수행하기 위한 기본 바탕을 제시해주고 있다. Kim and Yee(2021), Lee et al.(2020), Song(2021)의 연구는 이 연구를 수행하기 위한 가장 직접적인 바탕이 되는 연구이다. 따라서 이 연구에서는 이들의 연구를 바탕으로 종합적인 관점에서 연구를 진행하도록 한다.

III. 연구방법론과 비용추산

3.1 연구방법론

이 연구에서는 비모수적인 방법(non-parametric method)으로 효율성을 측정한다. 비모수적인 방법은 생산함수를 특정하지 않고 효율성을 측정하는 방법으로써, 대표적인 효율성측정 방법인 자료포락분석(DEA: data envelopment analysis)을 많은 연구들에서 사용하므로 이 연구에서도 DEA를 활용하여 효율성을 측정하도록 한다. DEA를 활용하여 효율성을 측정함에 있어서 기준을 어느 변량에 정하는가에 따라 두 가지의 방법으로 나눌 수 있다. 동일한 투입량을 기준으로 산출변량의 차이를 파악하여 효율성을 측정하는 output oriented의 방법은 Fare et al.(1994)의 연구에서 제시되고 있다[12]. 동일한 산출량을 기준으로 투입변량의 차이를 파악하여 효율성을 측정하는 input oriented의 방법은 Charnes et al.(1978)의 연구에서 등 산출량 곡선(iso-quant curve)을 예시하여 설명하고 있다. 이 연

구에서는 Charnes가 예시한 방법대로 input oriented 에 기초한 효율성 측정방법을 사용하도록 한다.

Input oriented DEA의 방법은 Charnes의 예시 이후 많은 연구에서 이를 인용하여왔고 현재도 이를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다. Coelli(1996)과 Song (2012)이 이용한 방법을 인용하여 다음과 같이 대수적인 효율성 측정방법을 확인할 수 있다[14][15]. S와 같은 생산기술을 가지고 있으면 양의 실수(R_+)인 투입변량 x_1 과 x_2 를 투입하여 산출물 y 를 식 (1)과 같이 생산할 수 있다. 또한 투입변수 조합을 바탕으로 식 (2)와 같이 input oriented 효율성을 측정할 수 있는 거리함수를 도출할 수 있다.²⁾

$$S = \{(x, y) : y \in R_+ \text{ can be produced by } x \in R_+\}, \quad (1)$$

$$x = (x_1, x_2)$$

$$D_h(x_h, y_h) = \min \tau \quad (2)$$

$$\text{subject to } \tau : (\tau x_h, y_h) \in S, \quad h = 1, \dots, n$$

$$\tau x_h \geq \sum_{h=1}^n \lambda_h x_h \wedge y_h \leq \sum_{h=1}^n \lambda_h y_h \wedge \lambda_h \geq 0$$

$$\wedge 0 < \tau \leq 1$$

최고의 효율성을 가진 투입산출조합을 (x^*, y^*) 라고 할 때, 거리함수 D는 산출량조합 (x^*, y^*) 을 얻기 위해서 x 에 스칼라 τ 를 곱해주었을 때 도출된 값을 산출한다. λ 는 산출량조합 (x^*, y^*) 을 얻기 위해서 각 변량에 곱하여지는 $n \times 1$ 의 열벡터이다. h 는 효율성을 측정할 때의 decision making unit을 의미하는데, 이 연구에서는 각각의 UAM 기체를 의미한다.

이 연구에서 운용 효율성은 각 UAM이 운행하는데 소요되는 비용을 기준으로 산출된다. 고정비용과 가변비용으로 표현되는 두 가지의 비용을 투입변수로 하며, 운항거리를 산출변량으로 하여 효율성을 측정한다. 고정비용은 UAM을 제작하는데 소요되는 비용으로서 UAM의 판매가격 혹은 구매비용이다. 가변비용은 UAM을 운항(operation)하는데 소요되는 비용이다. 운항거리는 단거리, 중거리, 장거리로 나누어 살펴볼도록 한다. 다수의 UAM에 대한 각각의 제작비용을 추산하고, 또한 배터리 교체비용 및 충전비용과 같은 운항에 소요되는 비용을 추산하여 고정비용과 가변비용을 산출한다. 투입비용을 고정비용과 가변비용으로 나누어서

살펴보는 것은 경제학적인 분석방법의 오랜 전통이므로, 이에 따라서 기체에 대한 고정비용과 가변비용을 나누어서 추산하도록 한다.

3.2 비용의 추산

항공기 순기비용(life cycle cost)은 항공기비용, 운용비용, 처리비용으로 나눌 수 있다. 항공기비용은 구매비용으로서 항공기 개발, 생산, 판매이윤이 포함된 판매가격이다. 운용비용(operating cost)은 항공기가 운항하면서 필요로 하게 되는 정비비, 보험료, 연료비를 의미한다. 처리비용(disposal cost)은 항공기를 폐기처분하면서 발생하는 비용으로서 이 연구에서는 고려하지 않는다. 구매비용은 앞서 설명하였던 고정비용에 해당하는 부분인데, 고정비용을 추산하기 위해서 Kim and Yee(2021)의 연구를 크게 참고할 수 있다. 이들의 연구는 eVTOL 도심항공 모빌리티의 제작비용 예측 방법을 제시하고 있으므로 이를 참고하여 각 기체의 제작비용을 추산할 수 있다.

구매 및 판매가격적인 항공기비용을 계산하기 위해서는 우선 기체의 생산시점을 결정해야 한다. UAM의 산업단계를 기체를 제작하기 시작하는 시점인 생산 1단계(initial stage), 생산 2단계(near term stage), 생산 3단계(long term stage)로 나눌 수 있다. Uber Elevate (2016), Booz, Allen and Hamilton(2018), NASA et al.(2018), Porsche Consulting(2018)이 추정한 시점과 기체생산량을 종합하면 다음과 같다[16][17][18][19]. 생산 1단계는 양산 시작을 기점으로 약 5년 동안의 기간을 말하는데, 이 기간에는 연 생산량이 약 100대로 추정된다. 생산 2단계는 생산 1단계가 종료된 후 5~8년 동안의 기간을 말하는데, 연간 500대의 생산 시기다. 생산3단계로 접어들면 UAM의 생산 자동화로 인하여 대폭적인 생산량 증가와 가격하락이 이어질 것이며, 이 시기에는 연간 5,000대의 생산량을 보일 것으로 추정된다. Kim and Yee(2021)은 생산 1단계에서는 500번째 생산되는 UAM의 비용을 기준으로 추정 제작비용을 산출하였고, 생산 2단계에서는 2,500번째 생산되는 UAM의 비용을 기준으로 추정 제작비용을 산출하였다 [10].

운용비용(operating cost)은 앞서 설명한 것처럼 항공기가 운항하면서 필요로 하게 되는 비용으로서 정

2) 거리함수를 이용하여 측정된 값은 이 연구에서 계산하고자 하는 효율성(EF)을 나타내는 값이다:

$EF_h(x_h, y_h) = D_h(x_h, y_h), \quad 0 < EF \leq 1.$

비비, 보험료, 연료비를 의미한다. 기체 구매비용은 고정비용에 해당하지만, 운용비용은 가변비용에 해당한다. 현재 제품이 출시되지 않은 상황에서 정비비와 보험료를 정확히 산출할 수 없는 실정이다. 저속으로 운행하는 기체의 경우 기체의 정비는 크게 문제가 될 것이 없으므로, 이 연구에서는 기체 정비비는 배터리 교체비용만을 산출해서 적용하기로 한다.³⁾ 연료비는 화석연료를 사용하지 않는 도심항공 모빌리티의 특성에 맞추어 전기요금으로 대체하기로 한다.

IV. 효율성 분석 결과

4.1 항공기비용과 운용비용을 고려한 효율성

각 UAM의 제원자료를 DAPCA에 입력하면 항공기 비용을 추정할 수 있다. 공개되지 않은 제원자료는 사진을 통하여 추정하고 중량 추정식을 통하여 기체 외관의 중량을 추정하여 항공기비용을 추정할 수 있다. 랜딩기어는 고정식 랜딩기어를 적용하여 비용을 추정한다. 배터리용량의 경우에는 공개된 로터의 제원과 프로펠러의 직경 그리고 항속거리를 바탕으로 배터리용량을 추정할 수 있다. 이상과 같은 기준에 따라서 Kim and Yee(2021)의 연구에서는 각 UAM의 항공기비용을 추정하였고, 이 연구에서는 이들의 연구결과를 사용하기로 한다.

UAM에 사용되는 배터리의 경우에는 기체의 일부분으로 간주되므로, 배터리의 수명주기에 따르는 교환은 기체의 정비에 해당한다.⁴⁾ 배터리는 기체의 다른 부분처럼 지속적으로 사용할 수 있는 부품이 아니므로 배터리의 수명손실에 따르는 교환비용을 산출해야 한다. 배터리수명은 현대자동차의 HMG Journal에서 발표한 자료에 의거하여 100% 충전과 방전을 반복하였을 때 1,000회 사용가능한 것으로 산출하였다.⁵⁾ 하루 30km의 거리를 24회 운항하는 것으로 가정하여 1년간 운항한 결과를 기준으로 산출하였다. 배터리비용은 BloombeGENF에서 2021년 11월 30일에 발표한 가격인 \$132/kWh를 적용하였다.

연료비는 UAM의 충전비용으로 연료비를 산출할 수 있다. 충전비용은 KEPCO의 전기요금계산기를 활용하여 계산할 수 있다.⁶⁾ 산업용(을)과 고압A의 요금을 기준으로 계산하였다. 원화로 계산되기 때문에 배터리교체비용에서 2021년을 기준으로 산출한 것과 같이 2021년 11월의 매매기준을 달러당 1193.4원을 적용하였다.

보험료의 경우 현재로서는 내연기관을 사용하는 항공기의 보험료만을 산출할 수 있을 뿐 eVTOL항공기의 보험료에 관한 정보는 확인할 수 없다. 이 연구에서는 미국 연방항공규정 14 CFR 205에 제시된 air taxi에 대한 항공 책임보험기준 그리고 EU에서 2005년부터 발효된 Regulation (EC) 785/2004 항공보험기준에 의거하여 최소보험료를 가정하였다. 보험요율은 Kim(2015)이 확인한 것처럼 배상보험의 경우 대형항공사 보험요율 중 가장 높은 요율인 0.46%를 적용할 수 있지만, 기체보험의 경우 매우 고비용의 보험료가 예상되므로 현행 우리나라의 경량항공기 보험요율 12%를 가정하기로 한다.

이상에서 설명한 비용추정방식과 Table 2에서 확인할 수 있는 기체의 사양을 고려하여 UAM의 비용을 추정할 수 있다. Table 3에서는 생산 1단계에서의 항공기비용을, Table 4와 Table 5에서는 각각 생산 2단계와 3단계에서의 항공기비용을 나타내었다. Table 5와 Table 6는 배터리비용과 보험료를 나타내었다.

이제 항공기 순기비용(life cycle cost) 중 앞서 확인하였던 항공기비용과 운용비용을 고려한 UAM의 효율성을 비교해볼 수 있다. 항공기비용과 운용비용을 동시에 고려하여 식 (2)의 거리함수를 구하는 효율성분석을 실시하면 Fig. 1과 2에서의 각 점과 원점과의 거리를 기초로 하는 효율성을 계산할 수 있다. 가장 높은 효율성을 가진 기체는 best efficiency curve상에 있는 기체들이다. Fig. 1의 기하학적 표현을 보고 이해할 수 있는 것은 생산 1단계에서 Wisk Cora, Joby S4, Lilium Jet가 가장 효율성이 높은 기체라는 것이다. 그림은 좌석 한 개를 위해 소요되는 항공기비용을 횡축에 운영비용을 종축에 표시하였다. 따라서 각 축과 원

3) 정비비 중 감항과 기체의 오버홀에 관한 정보는 현재 밝혀진 자료로는 추정이 가능하지 않다. 감항과 기체 오버홀에 관한 기준이 정립되어있지 않기 때문이다. 기체의 수명에 대해서도 저속의 기체에 관하여는 특별한 수명이 제시되고 있지 않다. 제트엔진을 사용하여 고속으로 운영되는 기체의 경우에는 기체의 수명에 대한 기준이 있지만, 저속으로 운항하는 내연기관 항공기에 대한 기체 수명은 별도로 제시되고 있지 않기 때문이다.

4) 배터리가 기체의 일부분에 해당된다는 자세한 설명은 Song(2022: 127)에서 확인할 수 있다.

5) <https://news.hmgjournal.com/Group-Story/%EC%A0%84%EA%B8%B0%EC%B0%A8%EC%97%90-%EB%8C%80%ED%95%9C->

6) <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/J/A/CYJAPP000NFL.jsp>

Table 2. Brief specifications of UAMs

Model Specifications	Wisk Cora	Aurora PAV	Uber eCRM- 003	A ³ Vahana
Number of seat	2	2	5	2
Battery cap.(kWh)	63	67.18	150	67.18
Total weight(kg)	576	575		695
MTOW(kg)	757	800		815
Cruise speed(km/h)	180	180	241	230
Max. range(km)	100	80	96	100
Model Specifications	Lilium Jet	Joby S4	Volo- copter	
Number of seat	2	5	2	
Battery cap.(kWh)	38	150	50	
Total weight(kg)	440	1,434	450	
MTOW(kg)	640	1,815	610	
Cruise speed(km/h)	300	322	100	
Max. range(km)	300	241	27	

Source: Vegh et al.(2019), Garrett-Glaser(2020), Aurora Flight Science homepage, Electric VTOL News homepage.

Table 3. Aircraft cost of UAMs at initial stage

Model	Min. Cost	Max. Cost	Type
Wisk Cora	442	534	Lift & Cruise
Aurora PAV	469	553	Lift & Cruise
Uber eCRM-003	1,403	1,728	Lift & Cruise
A3 Vahana	572	672	Vectored Thrust
Lilium Jet	1,182	1,373	Vectored Thrust
Joby S4	1,287	1,500	Vectored Thrust

Note: Unit of Min. Cost and Max. Cost is US\$1000.
Source: Kim and Yee(2021).

Table 4. Aircraft cost of UAMs at near term stage

Model	Min. Cost	Max. Cost	Type
Wisk Cora	291	326	Lift & Cruise
Aurora PAV	327	361	Lift & Cruise
Uber eCRM-003	902	1,020	Lift & Cruise
A ³ Vahana	296	335	Vectored Thrust
Lilium Jet	630	700	Vectored Thrust
Joby S4	666	743	Vectored Thrust

Note: Unit of Min. Cost and Max. Cost is US\$1000.
Source: Kim and Yee(2021).

Table 5. Battery exchange cost and electric rate per year

Model	Battery Consumption (kWh)	Recharg- ing Count	Replace- ment Cost (US\$)	Electric Rate (US\$ 1,000)
Wisk Cora	410,625	2,738	54,203	2,868
Aurora PAV	165,564	2,628	21,854	1,157
Uber eCRM-003	220,095	3,285	29,053	1,537
A ³ Vahana	176,076	2,628	23,242	1,230
Lilium Jet	33,288k	876	4,394	233
Joby S4	163,568	1,090	21,591	1,143

Table 6. Annual insurance premium

Model	Liability	Hull 1	Hull 2
Wisk Cora	1,898	58,560	37,020
Aurora PAV	1,898	61,320	41,280
Uber eCRM-003	2,674	187,860	115,320
A3 Vahana	1,898	74,640	37,860
Lilium Jet	1,898	153,300	79,800
Joby S4	2,674	167,220	84,540

Note: Hull 1 stands for hull insurance premium at initial stage, while Hull 2 for near term stage.

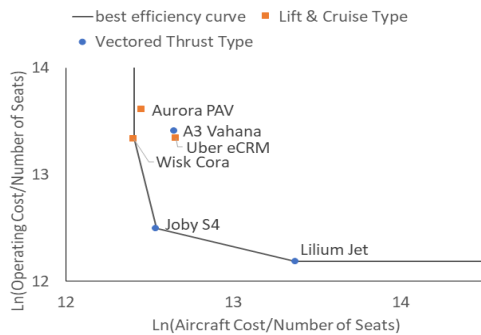


Fig. 1. Efficiency of UAMs at initial stage

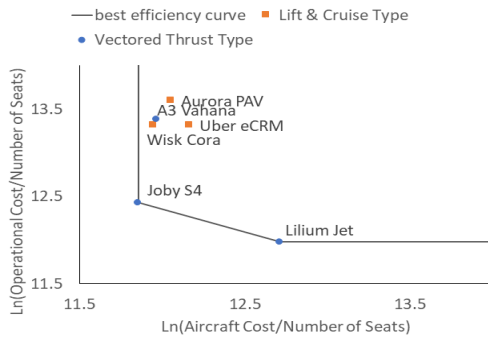


Fig. 2. Efficiency of UAMs at near term stage

점에 가까울수록 비용이 절감되는 효율적인 기체인 것이다. 특히 Joby S4는 탑승자를 5명까지 허용할 수 있으면서 항공기비용과 운용비용이 저렴한 기체임을 알 수 있다. 탑승자가 5명인 Uber eCRM은 Joby S4의 효율성에 미치지 못함을 알 수 있다.

생산 1단계를 지나서 생산 2단계에 접어들었을 때는 효율성이 조금 달라진다. 생산 2단계에서는 Joby S4와 Lilium Jet가 가장 효율성이 높은 기체인 것으로 나타나고 있다. Joby S4와 Lilium Jet가 생산 2단계에 이르러서는 항공기비용을 더욱 낮추는데 성공하게 되기 때문인 것으로 파악된다. 이러한 현상은 두 기체에 만 국한된 것이 아니라, A³ Vahana의 경우도 마찬가지로 다른 Lift and Cruise 유형의 기체보다 좌측으로 더욱 이동하였다.

Vectored Thrust 유형의 기체들은 생산 1단계에는 복잡한 구조로 인하여 비용의 상승하는 측면이 있지만 생산단계가 길어지면 이러한 비용을 절감하여 Lift and Cruise 유형의 기체들보다 효율성이 있는 기체가 될

수 있다는 것을 알 수 있다. 항공기비용과 운용비용을 좌측수로 나누어 1명을 수송하기 위한 비용의 효율성으로 계산하여보면 Vectored Thrust 유형의 기체들이 전반적으로 효율성이 있는 기체임을 확인할 수 있다.

4.2 유형별 비행거리와 에너지소비의 효율성

각 기체의 유형별로 대표적인 기체에 대해서 운행시간 당 소요에너지와 운행거리당 소요에너지를 확인하여 효율성을 비교할 수 있다. Lift and Cruise 유형은 Aurora PAV를, Vectored Thrust 유형은 A³ Vahana를, 멀티콥터유형은 volocopter를 대표적인 기체로 하여 소요 에너지를 산출하였다. 다만 멀티콥터유형의 기체는 운항속도가 느리기 때문에 항력은 고려하지 않기로 한다.

Table 7에서 Aurora PAV와 A³ Vahana의 데이터는 Lee et al.(2020)의 자료를 바탕으로 작성하였다[9]. Volocopter의 자료는 공개된 기체의 사양 중 모터의 추력은 순항 시 최대출력의 65%를 사용하는 것으로 가정하여 소요에너지를 산출하였다. 한국에서 UAM을 운용하기 위해서는 UAM Team Korea가 제시한 ‘한국형 도심항공교통(K-UAM) 운용개념서 1.0’에 의거하여야 한다. 동 개념서에 의하면 국내에서 도심항공 모빌리티는 상공 300~600m 사이에서 운용된다. 따라서 도심항공 모빌리티의 국내에서의 운용효율성을 비교하는 연구목적에 따라 이륙고도를 450m로 가정하여 분석을 진행하기로 한다. 고도 300m까지는 수직이착륙을 하고 이후 150m를 상승과 전진비행을 동시에 진행하거나 하강과 전진비행을 동시에 진행하여 사다리꼴 형태로 이륙과 착륙을 할 수 있다.⁷⁾ 총 상승고도 450m와 상승속도 500ft/min에 의하여 이착륙 시 소모시간이 계산된다.

비행거리를 매우 근거리인 4km로부터 서울 중심에서 외곽 거리에 해당하는 27km까지의 운항에 걸리는 시간과 소모에너지를 확인함으로써 각 비행체의 운용 효율성을 확인해볼 수 있다. 비행거리는 4, 10, 17, 27km로 설정하여 비교하였다. 서울시청에서 출발하여 직선거리로 용산공원까지가 4km 거리이며, 용산공원을 거쳐 여의도 국회의사당까지의 직선거리가 10km, 용산공원과 국회의사당을 거쳐 김포공항역까지의 직선거리가 20km이다. 서울시청에서 출발하여 용산공원을 거쳐 도심공항터미널까지의 직선거리는 11km이며, 이 두 곳을 거쳐 성남 서울공항까지의 거리가 19km이다. Fig.

7) UAM의 이착륙방법의 자세한 그림은 Song(2022: 85)에서 확인할 수 있다[22].

Table 7. Energy consumption of each UAM

Items	Aurora PAV	A ³ Vahana	Volocopter
E.C. at cruising	83.86kW	57.68kW	16.43kW
Cruise speed	180km/h	230km/h	100km/h
Available energy of battery	67.18kWh	67.18kWh	50kWh
Time for T.L.	6min	6min	6min
Energy for T.L.	7.55kWh	7.61kWh	3.61kWh

Note: E.C. stands for Energy Consumption; T.L. stands for Takeoff and Landing.

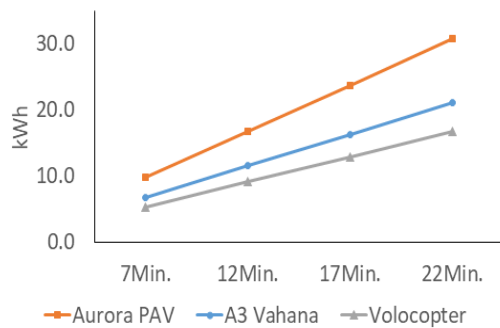


Fig. 3. Energy consumption by time passage

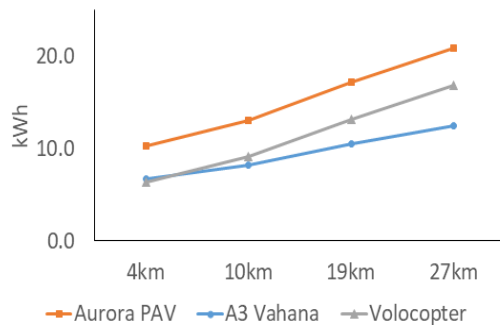


Fig. 4. Energy consumption per distance

3과 Fig. 4에서 시간당 소모 에너지와 거리당 소모 에너지를 확인할 수 있다. 비교 대상인 세 기체 모두 좌석 수가 2개이므로 좌석 당 시간과 소모에너지를 비교 하지는 않는다.

비행거리에 따르는 비행시간이 증가할수록 기체별 소모에너지의 차이가 커지고 있다. Volocopter의 비

행한계인 27km의 거리를 확인해 보면 Volocopter의 경우 22분, Aurora PAV의 경우 15분, A³ Vahana의 경우 13분이 소요된다. 따라서 운행시간인 분당 소모에너지를 Fig. 3에서 확인할 수 있다. Volocopter의 경우 운행시간당 소모에너지는 가장 적은 것으로 나타나며 A³ Vahana가 그 뒤를 따르고 있다. 운항거리를 고려하지 않고 운항시간만을 고려할 경우에는 멀티콥터 형태의 비행체가 가장 효율적이며 Vectored Thrust 형태의 기체가 다음으로 효율적이다. 따라서 호버링 위주의 공중체공을 목적으로 운항할 경우에는 멀티콥터 형태의 기체를 사용하는 것이 좋다.

거리별 소모 에너지를 보면 초 단거리에 있어서 멀티콥터형의 기체가 매우 낮은 에너지소모를 하는 것을 알 수 있다. 4km의 거리를 비행할 때 Volocopter는 6.39kWh를 소모하고, A³ Vahana는 6.77kWh를, Aurora PAV는 10.25kWh의 에너지를 소모한다. 하지만 27km의 거리를 비행할 때에는 각각 16.88kWh, 12.54kWh, 20.97kWh의 에너지를 소모한다. 단순히 소모에너지만을 비교하면 초 단거리인 4km 이내의 거리는 멀티콥터형의 기체를 운용하는 것이 운용효율성이 좋다.

소모에너지는 탑승요금으로 직결되므로 10km 이내의 매우 단거리만을 운행하는 노선이라면 Volocopter와 같은 멀티콥터형태의 도심항공 모빌리티의 운용을 고려할 수 있다. 도심지만을 운행해야 한다면 멀티콥터 특유의 안정성과 기동성을 고려하여 멀티콥터형태의 도심항공 모빌리티가 유리할 수 있다. 그러나 서울 도심에서 출발해서 서울시내 각 지역을 운행하고 인천공항, 수원공단, 안양공단, 정부과천청사 등을 순환하거나 정부세종청사까지 운행하여야 한다면 멀티콥터형태의 기체로는 운행이 어렵다. 도심내의 매우 근거리만을 운행해야 한다면 멀티콥터형태의 기체를 운용해야 하지만, 순환노선을 운행하거나 비교적 멀리까지 운행해야 한다면 Lift and Cruise 형태 또는 Vectored Thrust 형태의 기체를 운용하는 것이 합리적이다.

V. 결 론

현재 우리가 접할 수 있는 도심항공 모빌리티들은 시제품(prototype)에 불과하다. 근 시일 내에 우리들이 사용할 수 있을 것으로 기대하고 있지만, 우리들이 사용하게 되더라도 이제 막 양산을 시작하는 단계에 불과하다. 따라서 양산을 시작하는 단계에서 기체를 운용할 때 기체별 운용효율성과 양산을 본격적으로 진행

하는 단계에서 기체를 운용할 때 운용효율성을 비교할 필요가 있다. 각 단계별로 기체를 제작하기 위한 비용이 다르기 때문이다.

항공기비용과 운용비용을 모두 고려하였을 때, 개발을 마치고 양산을 시작하는 단계에 진입하면 Wisk Cora, Lilium Jet, Joby S4의 효율성이 가장 뛰어나다. 한 개의 좌석 혹은 한 명의 승객을 위한 기체구매비용과 운용비용을 고려해 보았을 때에는 이들 기체들의 운용효율성이 가장 뛰어난 것으로 확인되었다. 하지만 Aurora PAV의 효율성도 이들에 비해 크게 뒤지지 않기 때문에 양산을 시작하는 단계에서는 Lift and Cruise형태와 Vectored Thrust 형태의 UAM이 모두 좋은 효율성을 보인다.

양산을 시작한 뒤 5년 정도 지난 후, 생산2단계에 진입하면 상황에 다소 변화가 생긴다. 한 개의 좌석 혹은 한 명의 승객을 위한 기체구매비용과 운용비용을 고려해 보았을 때 Joby S4와 Lilium Jet가 가장 효율성이 뛰어나며 그 뒤를 Wisk Cora가 뒤따르고 있다. 결국 양산이 크게 이루어지고 UAM이 널리 사용되는 시점에 이르면 Vectored Thrust 형태의 UAM이 가장 효율성이 좋은 기체가 된다는 것이다.

UAM은 도심에서의 운송을 위한 비행체이다. 따라서 가장 먼저 그리고 널리 사용될 서울 지역의 중심지로부터의 비행을 고려할 수 있다. 서울시청으로부터 용산공원, 여의도 국회의사당, 도심공항터미널까지 운항하는 노선만을 고려한다면 10km 이내의 비행 노선이므로 도심에서의 기동성까지 고려한다면, 멀티콥터형태의 UAM이 적합하다. 하지만 서울 시내를 순환해야 하거나, 외곽의 인천공항과 수원, 안양, 시흥과 같은 공단지역을 운항하거나, 정부세종청사까지 운항하기 위해서는 Lift and Cruise형이나 Vectored Thrust형의 UAM을 채택해야 한다.

도심항공 모빌리티는 도심지역에서 이착륙을 하며 도심지역에서 운행을 해야 한다는 특징이 있다. 현재 지상에서 운행되고 있는 지하철 또는 버스와 같은 운행방식을 택하여 운행되기도 하며, 택시와 같은 운행방식을 택하여 운행되기도 할 것이다. 택시와 같은 운행방식을 택하면서 가까운 거리를 운항하기 위해서는 멀티콥터형태의 UAM을 운용하는 것이 운용비용에 있어서 효율적일 것이다. 하지만 운항거리를 길게 하고, 여러 vertiport를 거치면서 멀리까지 운행을 해야 한다면 Lift and Cruise형이나 Vectored Thrust형의 UAM을 채택해야 한다.

Acknowledgement

This study is the revised version of master's thesis of author.

References

1. e-Nara Index, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, July 14, 2022, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1248
2. Moore, M. D., "Personal Air Vehicle: A Rural/Regional And Inter-Urban On-Demand Transportation System," AIAA Paper 2003-2646, 2003.
3. Government Departments, "A Road Map for Korean Urban Aerial Mobility of Flying Urban Sky", 2020. 5.
4. Kim, B., "Commuting on UAM by 2030...Rising Urban Aerial Mobility", Asian Economy, 2021. 8. 18.
5. Hwang, C., and Ahn, B., "Overview on high speed rotorcraft concepts for the personal aerial vehicle (PAV) applications", Aerospace Engineering and Technology, 6(1), 2007, pp.6-13.
6. Yun, D., and Huh, H., "Technical survey on propulsion systems for personal air vehicles", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 13(6), 2009, pp.56-63.
7. Byun, Y., Song, J., Kim, J., Jeong, J., Song, W., and Kang, B., "Conceptual design and development test of an unmanned scaled-down quad tilt prop PAV", Journal of The Korean Society Aeronautical and Space Sciences, 42(1), 2014, pp.37-46.
8. Lim, E., Hwang, H., Cha, J. Kim, S., and Park, B., "The overseas research trends for the on demand mobility and domestic application plan using PAV", Journal of Advanced Navigation Technology, 21(4), 2017, pp.313-324.
9. Lee, B., Yun, J., and Hwang, H., "Flight range

- and time analysis for classification of eVTOL PAV", *Journal of Advanced Navigation Technology*, 24(2), 2020, pp.73-84.
10. Kim, H., and Yee, K., "A novel cost estimation method for UAM eVTOLs", *Journal of The Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 49(3), 2021, pp.233-241.
 11. Song, J., "Development status and economic efficiency of PAV", *Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation*, 29(1), 2021, pp.61-73.
 12. Fare, R., Grosskopf, S., Norris, M., and Zhang, Z., "Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries", *The American Economic Review*, 84(1), 1994, pp.66-83.
 13. Charnes, A., Cooper, W. W., and Rhodes, E., "Measuring the efficiency of decision making units", *European Journal of Operational Research*, 2(6), 1978, pp.429-444.
 14. Coelli, T. J., "A guide to DEAP version 2.1: A data envelopment analysis (Computer) program, center for efficiency and productivity analysis", Department of Econometrics, University of New England, Armidale, 1996.
 15. Song, J., "Returns to scale of Chinese cities, 2002-2009", *International Journal of Urban Sciences*, 16(2), 2012, pp.169-185.
 16. Uber Elevate, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation", October 2016.
 17. Booz, Allen, and Hamilton, "UAM market study - Technical Out Brief, Presented to National Aeronautics and Space Administration - Aeronautics Research Mission Directorate, October 2018.
 18. NASA, Crown Consulting Inc., Ascension Global, Georgia Tech Aerospace Systems Design Lab, and McKinsey & Company, "Urban Air Mobility Market Study", November 2018.
 19. Porsche Consulting, "The Future of Vertical Mobility", 2018.
 20. Vegh, J. M., Botero, E., Clark, M., Smart, J., and Alonso, J. J., "Current capabilities and challenges of NDARC and SUAVE for eVTOL aircraft design and analysis", *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, 2019.
 21. Garrett-Glaser, B., "Will wisk's straight-to-autonomous air taxi strategy pay off?," *Aviation Today*, July 2, 2020, <https://www.aviationtoday.com/2020/07/02/will-wisks-straight-autonomous-air-taxi-strategy-pay-off/>
 22. Song J., "Introduction to Small UAV", Yale Publishing, Seoul, 2022.
 23. Kim, K., "Premium rate reveals the safety of airlines," *The Korea Economic Daily*, March 5, 2015, <https://www.hankyung.com/news/article/201503058481g>