



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(3), 233-241(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.3.233

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

전기 추진 수직이착륙 도심 항공 모빌리티 항공기의 비용 예측 연구

김현수¹, 이관중²

A Novel Cost Estimation Method for UAM eVTOLs

Hyunsoo Kim¹ and Kwanjung Yee²

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

As increasing the feasibility of the eVTOL UAM(electric vertical take-off and landing urban air mobility), numerous corporations and laboratories are conducting researches. In the aircraft development process, estimating the cost of the aircraft is essential part in terms of budgeting and commercial viability analysis. However, it is difficult to predict the cost of an eVTOL UAM owing to various configurations and little open cost information. This paper presents a novel method to predict the vehicle cost of various eVTOL configurations by modifying previous studies of the aircraft cost estimation. A vehicle cost of Wisk Cora is calculated by the presented method as an example to illuminate the method. The method is indirectly validated by comparing the vehicle costs of six representative eVTOL aircraft with those from the UAM study reports.

초 록

전기 동력 수직 이착륙 도심 항공 모빌리티 (eVTOL UAM)의 실현 가능성이 커짐에 따라 다수의 기업과 연구소에서 많은 연구가 진행되고 있다. 항공기 개발 과정에서 비용 예측은 예산 및 상업성 분석 측면에서 필수적인 요소이다. 그러나 형상의 다양성과, 비용 정보의 비공개 등의 이유로 eVTOL UAM의 비용 예측에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 항공기 비용 예측 방법을 수정 및 보완하여 다양한 형상을 고려할 수 있는 eVTOL UAM의 항공기 비용 예측 방법을 제시한다. 방법의 이해를 돕기 위해 Wisk Cora의 항공기 비용을 예시로 계산하였다. UAM 분석 보고서와 6종의 대표 eVTOL UAM 가격의 상대적인 비교를 통해 제시된 방법의 타당성을 간접적으로 검증하였다.

Key Words : eVTOL Aircraft(전기 동력 수직이착륙 항공기), UAM(도심 항공 모빌리티), Cost Estimation(비용 예측), Life Cycle Cost(순기 비용), Vehicle Cost(항공기 비용)

1. 서 론

Uber Elevate의 미래 UAM 분석 보고서[1]가 나온 이후, 전기 추진 수직이착륙 도심 항공 모빌리티 (eVTOL UAM)의 연구가 빠르게 진행되고 있다.

eVTOL UAM은 기존 VTOL 형태 항공기의 소음, 배기가스, 유지 비용과 같은 문제들을 보완하여 운용할 수 있는 장점이 있어 항공사와 기업에서 관심을 받고 있다. 이에 따라 Uber, NASA와 컨설팅 회사[1-3]에서 eVTOL UAM을 활용한 Air-Taxi, Air-Shuttle

† Received : November 24, 2020 Revised : January 25, 2021 Accepted : February 16, 2021

¹ Graduate Student, ² Professor

² Corresponding author, E-mail : kjyee@snu.ac.kr, ORCID 0000-0001-9384-7566

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

산업의 상업성 분석이 진행되었다. Uber는 미래의 시점에 따른 순주기비용(Life cycle cost)과 예상 탑승 가격을 예측하였고, NASA와 컨설팅 회사는 소비자의 설문을 기반으로 UAM의 인식수준과 적합한 탑승 가격 범위를 제시하였다. 또한, eVTOL UAM의 항공기 비용(Vehicle Cost)과 운용 비용(Operating Cost)을 추정했다. 이처럼 새로운 항공기 개발에서 비용 예측은 필수적인 고려 요소이다.

항공기의 개발 및 생산 비용 예측은 판매, 수요와 같은 상업성뿐만 아니라 항공기 설계단계에도 중요한 역할을 한다. 설계 단계에서 적절한 비용 추정을 하지 못할 경우, 항공기 개발 프로젝트가 중단될 수도 있다. 실제로 미국의 폭격기 B-1B의 이전 프로젝트 B-1A는 비용에 의해 사업이 중단되었다[4]. 따라서 항공기 개발단계에서 비용 관련 설계 요구조건 적합 여부를 판단해야 한다. 그러나 eVTOL UAM은 현재 개발 중인 항공기이기 때문에 항공기 개발사는 비용 관련 정보를 외부에 공개하지 않고 있다. 또한, eVTOL UAM의 축적 데이터가 부족해 항공기 개발 및 생산 비용 예측에 한계가 있다.

관련 연구로 Cees Bil 등[5]은 하이브리드 고정익 항공기 순주기비용 예측법을 제시했다. 부분 전동화된 항공기를 대상으로 추가되는 전기 부품 비용을 추정했지만, 일반적인 소형 고정익 항공기 형상만을 고려했다. S. Zijp[6]은 일반적인 형상뿐만 아니라 4가지 독특한 형상(Canard aircraft, Three-surface aircraft, Prandtl plane and Blended wing body aircraft)을 갖고 있는 고정익 항공기 형상의 순주기비용 예측 방법을 제시하였다. 그러나 UAM의 다양한 형상을 4가지로 제한하기에 한계가 있다. VTOL 항공기의 가격 예측 경우, 정성남 등[7]은 기존 Harris & Scully가 제시한 가격 추정식을 수정 및 최신화하여 개선했지만, 일반적인 회전익기 형상만 고려했고, 항공기 전동화에 대한 고려가 배제되어 있다.

본 연구에서는 Lift+Cruise와 Vectored Thrust 타입의 eVTOL UAM 순주기 비용 중, 항공기 비용 예측 방법을 제시한다. 항공기 비용을 Base structure cost, Additional airframe cost, Subpart cost 세 가지로 나누어 계산한다. 제시된 방법을 이용해 Wisk Cora 항공기 비용 계산 과정을 기술하였고, 대표적인 6종류의 eVTOL UAM의 항공기 비용을 예측했다. 항공기 타입, 산업 시점별 항공기 비용 경향성을 분석하고 Uber white paper에서 제시한 eVTOL UAM 항공기 비용과 비교를 통해 제시된 결과의 적합성을 보였다.

II. 본 론

2.1 eVTOL UAM 개요

2.1.1 eVTOL UAM 타입



Fig. 1. Lift+Cruise type (Wisk Cora)



Fig. 2. Vectored Thrust type (Joby S4)



Fig. 3. Multirotor type (EHang 216)

eVTOL UAM의 타입은 크게 Lift+Cruise, Vectored Thrust, Multirotor로 나눌 수 있다[8]. Lift+Cruise 타입의 대표 항공기로는 Wisk Cora가 있다(Fig. 1). Wisk Cora는 12개의 로터로 수직이착륙을 하고, 1개의 푸셔 프로펠러로 전진 비행을 한다. Joby S4는 6개의 로터가 있는 Vectored Thrust 타입의 항공기이다(Fig. 2). Lift+Cruise 타입과는 달리 로터를 기울임으로써 동일한 로터로 수직이착륙 및 전진 비행을 수행한다. Multirotor 타입으로는 EHang 시리즈의 기체가 대표적으로, 일반 멀티콥터 드론 형태에 사람이 탑승할 수 있는 좌석 구조가 들어간 형상이다(Fig. 3).

세 가지 타입의 형상을 보면, Lift+Cruise와 Vectored Thrust는 Multirotor 타입과 달리 고정익 항공기를 기본 형상으로 한다. 본 연구에서는 일반 고정익 항공기 기체 비용과 전동화 비용 예측 방법을 수정 및 보완하여, 세 가지 타입 중 Lift+Cruise와 Vectored Thrust 타입의 항공기 비용을 계산했다.

항공기 비용에 포함되는 항공기 개발비용은 기술적 난이도에 따라 차이가 있다. 예를 들어, Lift+Cruise와 Vectored Thrust 타입을 고려했을 때, Vectored Thrust 타입이 로터를 기울이는 Tilting 기술이 추가로 들어가기 때문에 기술적 난이도는 Lift+Cruise 타입보다 높다. 따라서 개발비용은 Vectored Thrust 타입이 더 높을 것이고, 항공기 비용도 상대적으로 더 높을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 항공기 타입에 따른 기술적 난이도를 고려하기 위해 Adjustment factor를 도입했다. Adjustment factor는 후에 설명할 DAPCA IV의 계산 결과에 곱해진다. 자세한 내용은 2.2.1 절에서 설명되어 있다.

2.1.2 eVTOL UAM 산업 시점

eVTOL UAM 산업을 Initial, Near term, Long term 세 가지 시점으로 분류했다. Initial 단계는 eVTOL UAM 양산 시작을 기점으로 약 5년의 기간을 갖는 것이라 가정했다. 이때 생산량은 1년에 약 100대로 추정하고, 항공기 비용은 500번째 생산되는 항공기의 비용을 기준으로 했다. Near term 단계에서는 Initial 단계가 끝난 직후 5~8년의 기간으로 생산량은 1년에 약 500대로 추정했고, 2,500번째 생산되는 항공기의 비용을 기준으로 계산했다. Long term 단계에서는 Near term 단계가 끝나고 난 후의 시점으로 생산량이 약 1년에 5,000대로 추정했다. Long term의 경우에는 항공기 생산 자동화로 대폭적인 생산량 증가에 의한 가격 하락을 고려할 수 없기 때문에 본 연구에서는 Initial, Near term 시점의 eVTOL UAM 항공기 비용을 예측했으며 각 시점을 2025년, 2030년이라 가정했다[1-3,9].

2.2 eVTOL UAM 항공기 비용 계산

항공기 순기 비용은 크게 항공기 비용, 운용 비용,

처리 비용이 있다. 항공기 비용은 항공기 개발, 생산, 판매 이윤이 포함된 가격으로 항공기 구매가격이다. 운용 비용은 항공기가 운항하면서 필요하게 되는 비용으로 정비비, 보험료, 연료비 등이 있다. 처리 비용은 운용을 끝마친 항공기를 처리하는 비용으로 폐기 가격 또는 재판매 가격을 포함한다. 현재 단계에서는 운용 비용, 처리 비용은 아직 결정되지 않은 인증, 법적 절차가 남아 있기 때문에 고려하지 않았다.

본 절에서는 eVTOL UAM의 순기 비용 중 항공기 비용을 예측하는 방법을 소개한다. Fig. 4는 항공기 비용 예측 방법을 도식화한 것이다. 순기 비용 중 항공기 비용을 계산하기 위해 eVTOL UAM 타입 (Lift+Cruise or Vectored Thrust)과 시점(Initial or Near term)을 결정한 후, 기본 구조물에 대한 비용인 Base structure cost, 추가 구조물의 비용인 Additional airframe cost, 전동화에 필요한 모터, 배터리 등의 비용인 Subpart cost를 예측하고 각 품목의 비용을 합하여 항공기 비용이 계산된다. 각 부분별 계산 방법 및 설명은 다음 절에서 순서대로 소개한다.

2.2.1 Base structure cost

본 절에서는 항공기 비용 중 Base structure cost를 계산하는 방법을 소개한다. Base structure cost는 Lift+Cruise, Vectored Thrust 타입에서 기본 형상인 고정익 항공기 구조물에 대한 가격으로 하나의 동체, 날개, 랜딩기어, 꼬리날개가 있는 기본 형상의 가격을 의미한다. Base structure cost를 계산하기 위해 RAND corporation에서 개발한 DAPCA(The Development and Procurement Cost of Aircraft) 가격 예측 모듈을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 DAPCA IV는 기존 DAPCA의 개선된 모듈로 현재 항공기 가격 예측으로 많이 사용되고 있는 대표적인 방법이다 [10]. DAPCA IV를 통해서 계산되는 Base structure

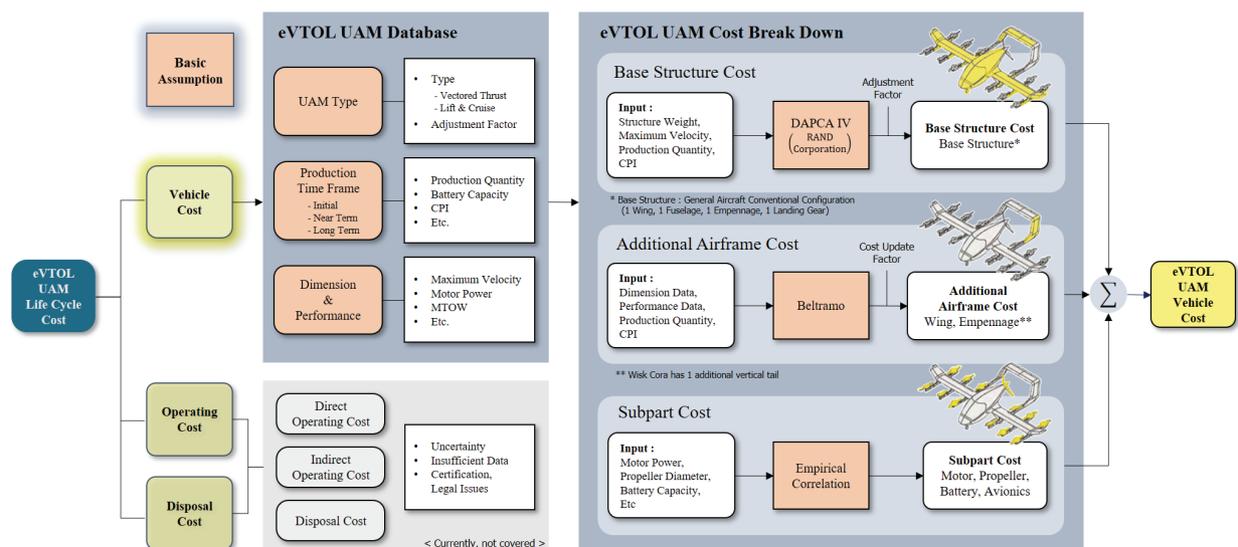


Fig. 4. eVTOL UAM vehicle cost analysis flow chart

cost는 엔진과 전자장비의 가격을 제외한 고정익 항공기 비용이다.

DAPCA IV 계산에는 구조 중량, 최고 진대기 속도(True airspeed) 그리고 생산량이 입력값으로 들어간다. 구조 중량은 항공기의 기초 틀을 담당하는 동체, 날개, 꼬리날개를 포함하고, 가격을 측정하기 어려운 덕트와 지지대의 중량도 포함했다. 기초 틀의 구조 중량은 Raymer[4]의 중량 추정식을 사용하였고, 덕트나 지지대 구조물의 중량은 외피 두께를 이용해 구한 부피에 재료의 밀도를 곱해서 계산했다. 외피 두께의 경우 고정익 민항기 동체 두께를 1~2.6mm를 사용하기 때문에[11] 보수적으로 2.6mm를 사용한다고 가정했다. 재료는 복합재료 중 CFRP(Carbon fiber reinforced plastics)를 사용한다고 가정했다. 공개되지 않은 형상 제원과 성능 정보는 사진을 통해 직접 측정하거나 비슷한 항공기의 데이터를 사용했다. Tail length는 General aviation aircraft 8대(CE-182T, GA-8, PA-46, CE-172, SR-22, CE-T206H, PA-34, PA-28)의 평균값인 14.9ft, 극한 하중 계수는 2.5로 각각 설정하였고, 구조재로 복합소재를 100% 사용했을 때 동체는 24%, 다른 구조물의 경우 35%의 중량 감소를 가정했다[12]. 최고 진대기 속도는 General aviation aircraft의 최고 순항속도가 일반 순항속도에 약 1.05~1.1배이기 때문에 일반 순항속도의 1.05배로 가정했다. 생산량은 5년간 생산예정인 항공기의 수를 입력한다.

Cees Bil 등[5]의 연구에서는 DAPCA IV와 전동화를 통해 늘어나는 개발 및 생산 비용을 Hybrid factor로 고려해 하이브리드 고정익 항공기 비용을 예측했다. 본 연구에서는 Cees Bil 등의 연구에서 제시하는 Engineering Cost Hybrid factor를 1.66으로 사용했으며 구조재의 복합재료 사용률은 100%, 그리고 5대 시제기 생산을 가정했다.

Adjustment factor는 General aviation aircraft를 기준으로 항공기 타입 별 개발 및 생산 기술적 난이도를 나타낸 수치이다. 기술 및 생산의 난이도는 곧 비용과 관련이 있기 때문에 계산된 eVTOL UAM 항공기 비용이 UAM 연구 보고서[2]에서 제시한 가격 범위에 포함되도록 Adjustment factor를 역으로 유추했다. Lift+Cruise 항공기의 경우 1.5~2.2의 Adjustment factor를 가질 때, Vectored Thrust 항공기의 경우 Adjustment factor가 3.3일 때 UAM 연구 보고서[2]에서 제시된 가격 범위에 포함된다. 가격 범위를 제시하고자 Vectored Thrust 항공기의 Adjustment factor도 Lift+Cruise와 같은 범위의 비율(2.95~3.65)을 갖는 것으로 가정했다. Adjustment factor는 DAPCA IV에서 계산된 개발 및 생산 비용과 다음 절에 설명될 Additional airframe cost에 곱한다. Table 1은 eVTOL 타입 별 Adjustment factor의 범위를 제시한 표이다.

Table 1. Adjustment factor range for each type

Type	Adjustment factor	
	Minimum	Maximum
Vectored Thrust	2.95	3.65
Lift+Cruise	1.5	2.2

2.2.2 Additional airframe cost

본 절에서는 eVTOL UAM이 갖고 있는 추가적인 파트들의 가격을 계산하는 방법을 설명한다. 형상이 다양한 eVTOL UAM 특성상 날개 또는 수직 안정판 등 파트들이 추가적으로 구성되어 있을 수 있기 때문에, 이를 고려할 방법이 필요하다. Additional airframe cost는 추가된 파트들의 가격으로 Beltramo 등[13]의 가격 예측 방법을 사용해 계산하였다.

Beltramo 등[13]의 연구에서는 항공기를 17개 파트로 나누어 각 파트의 비용을 예측하는 방법을 제시했다. 파트별 가격계산이 가능하게 되면, eVTOL UAM의 기본 고정익 항공기 형상 대비 추가적으로 부착된 파트들의 가격을 계산할 수 있어 다양한 형상 고려가 가능하다. 예시로, Fig. 1의 Wisk Cora는 수직 꼬리날개 파트가 2개가 들어가 있어 1개의 수직 꼬리날개 파트의 가격을 추가로 항공기 비용에 더해주어야 항공기 비용이 타당하게 예측된다고 할 수 있다. Wisk Cora뿐만 아니라 많은 eVTOL UAM은 형상이 다양하게 있기 때문에 파트별 가격계산은 필수적이다.

Beltramo가 제시한 방법은 파트의 중량과 생산량을 입력값으로 이윤이 고려된 1975년 달러 기준 파트 가격을 예측한다. 그러나 적용된 중량 예측식은 과거에 개발되었고 계산되는 가격은 1975년 기준 달러로 제시되기 때문에 중량 예측식과 가격의 최신화가 필요하다.

항공기 파트별 중량 예측은 Raymer[4]의 중량 추정식을 사용하였고, 가격은 Cost update factor를 도입하여 최신화하였다. Cost update factor는 최신화된 파트의 가격을 CPI(Consumer price index)가 고려된 Beltramo의 방법으로 계산한 파트 가격을 나눈 값이다.

Cost Update Factor

$$= \frac{\text{Part Cost (Update)}}{\text{Beltramo Part Cost (\$ in 1975)} \times \text{CPI}} \quad (1)$$

Cost update factor를 구하기 위해 CPI와 업데이트된 Part Cost를 사용했다. CPI의 경우 1980년부터 2019년까지 미국 노동청[14]의 데이터로 선형 회귀 방법을 사용해 연도별 CPI의 추세를 구했다. 도출된 추세선 식을 이용해 소비자 물가 지수를 추정했

Table 2. Cost update factor for each component

	Fuselage	Wing	Empennage
Cost update factor	0.2085	0.4064	0.1660

다. 식 (1)의 분자에 있는 최신화된 Part Cost는 항공기 가격에서 파트 가격이 차지하는 비율을 나타낸 Civil aircraft cost breakdown 자료를 이용했다[15]. 2.2.1절에서 사용한 8대의 General aviation aircraft 데이터를 이용해 날개, 동체, 꼬리날개 Cost update factor를 계산하고, 8대 항공기의 각 파트 factor 평균 값을 Cost update factor로 사용했다. Table 2는 계산된 Cost update factor이다.

2.2.3 Subpart cost

eVTOL UAM과 기존 항공기의 차이점 중 하나는 전동화이다. 화석연료 대신 주로 배터리를 에너지원으로 사용하고, 엔진을 대체해 전기 모터가 들어간다. 따라서 전동화를 통해 추가되는 새로운 부품들에 대한 가격을 고려해야 한다. 이를 위해 Cees Bil 등 [5]의 연구에서 제시한 전동화 부품들의 가격 추정식 식 (2)-(4)를 사용했다. Subpart cost는 계산된 전동화 부품들의 총 가격이며 전기 모터, 배터리, 프로펠러 등을 포함한다.

$$\text{Electric motor cost} = 174 \times N_{\text{motor}} \times P_{EM} \times CPI \quad (2)$$

$$\text{Battery cost} = 100 \times N_{\text{motor}} \times P_{EM} \times CPI \quad (3)$$

$$\text{Propeller cost} = 210 \times N_{\text{prop}} \times D^2 \times \left(\frac{P_{SHP}}{D} \right)^{0.12} \times CPI \quad (4)$$

여기서 계산되는 모든 가격 단위는 달러이며 N은 개수, P는 마력, EM은 전기 모터, D는 프로펠러 직경, SHP는 축마력, CPI는 2012년부터 고려되는 물가 상승률이다.

배터리 가격의 경우, Subpart 품목 중, 기술 발전 영향력이 크기 때문에 배터리만을 산업 시점에 따라 다르게 가격계산을 했다[16]. 2024년에 \$100/kWh, 2030년에 \$61/kWh로 배터리 가격을 예측했고[17], 각 가격을 Initial, Near term 시점에서의 배터리 가격으로 가정했다. 로터와 프로펠러는 같은 가격 추정식으로 계산했으며, 추가되는 전선 가격은 무시했다 [5]. 또한, 전기 모터, 프로펠러와 같은 기성품의 대량 구매로 인한 가격 인하는 고려하지 않았다.

2.2.4 Assumptions

eVTOL UAM의 항공기 비용을 예측하는 과정에서 사용된 기본적인 가정은 다음과 같다.

- 1) eVTOL UAM 산업시점 [1-3, 9].
 - Initial 단계 2025년, 연간 생산 100대.
 - Near term 단계 2030년, 연간 생산 500대.
 - Long term 단계 2035년, 연간 생산 5000대.
- 2) Base structure cost (DAPCA IV)
 - 최대 진대기 속도(KTAS)는 순항속도의 1.05배
 - Prototype 총 5대 생산.
 - 항공기 구조물 Composites 사용률 100%
 - Ultimate load factor = 2.5 [12].
 - General aviation aircraft의 제원 자료 사용 시, 데이터 신뢰성 및 비공개성의 원인으로 8대의 자료만 사용.
 - Tail length = 14.9 ft.
 - 모든 structure 두께 2.6mm [11].
 - 모든 날개에는 Flap이 없이 설계.
 - 가격을 알 수 없는 부품의 경우, 부피와 재료의 밀도를 곱해 중량 추정. 재료는 CFRP Composites 사용.
- 3) Additional airframe cost (Beltramo)
 - 항공기 부품 이윤 10%를 제외 [13].
- 4) Subpart cost (Empirical correlation)
 - 로터와 프로펠러의 가격 예측식은 동일.
 - 배터리 가격은 Initial 시점에서는 \$100/kWh, Near term 시점에서는 \$61/kWh.
 - 전동화로 추가되는 cable, device 가격 무시 [5].
- 5) 기타
 - 계산된 항공기 비용은 판매 이윤이 제외된 가격.
 - 알 수 없는 제원, 성능의 경우 항공기 사진으로 직접 측정 또는 유사 항공기 데이터 사용.
 - 모터, 프로펠러, 배터리와 같은 기성품의 경우 대량 구매로 인한 가격 하락을 고려하지 않음.
 - Learning curve의 experience effectiveness는 0.95를 사용 [10].
 - DAPCA IV의 세부 항목인 Manufacturing, material cost와 Additional airframe cost, Subpart cost에 Learning curve가 적용 [5].
 - 노동 임금 Engineering \$92/h, Tooling \$61/h, Manufacturing \$53/h으로 고정 [5].
 - Initial 시점 항공기 비용은 500번째 생산되는 항공기 비용 기준, Near term 시점 항공기 비용은 2500번째 생산되는 항공기 비용 기준으로 가정.
 - 한화 환율은 1년 평균 환율 적용 (\$ = 1,190.51원)

2.3 Wisk Cora 항공기 비용 예측 예시

본 절에서는 항공기 비용 계산과정의 이해를 위해 제시한 예측 방법을 사용하여 Lift+Cruise 항공기 타입 eVTOL UAM인 Wisk Cora 항공기 비용을 Initial 시점에서 계산했다.

2.3.1 Wisk Cora Base structure cost

DAPCA IV를 통해 계산되는 가격은 개발비용을 포함한 고정익 항공기 형상의 기본 형상의 가격이다. 참고문헌 [12,18]에서 사용한 Wisk Cora의 제원으로 구조 중량과 모터의 지지대 구조물 중량을 계산해 DAPCA IV의 입력값으로 대입했다. 여기서 모터 지지대 구조물은 2.2.1절에서 가정한 외피 두께와 CFRP 재료의 밀도를 이용해 구조중량으로 계산하였으며 기본적인 제원은 사진을 통해 측정하였다. 최대 진대기 속도는 100.275노트를 사용하였으며 Initial 시점으로 생산량은 1년에 100대로 5년 생산 예정량인 500대를 대입했다. 계산되는 기본 형상 항공기의 가격에 Adjustment factor 범위 평균값 1.85를 곱해주었다.

2.3.2 Wisk Cora Additional airframe cost

Wisk Cora에는 수직 꼬리날개가 총 2개가 있다. DAPCA IV에서 고정익 항공기 기본 형상은 수직 꼬리날개가 1개인 형상이므로, 추가된 수직 꼬리날개 1개 가격을 기본가격에 더해줘야 한다.

중량 추정식을 통해 수직 꼬리날개의 중량은 약 14lb로 계산이 되어 Beltramo 수식에 입력값으로 대입되었다. 계산되는 수직 꼬리날개의 가격에 Cost update factor와 Adjustment factor를 곱해 추가 파트의 가격을 계산하였다.

2.3.3 Wisk Cora Subpart cost

Wisk Cora에는 총 12개의 로터와 1개의 푸셔 프로펠러가 있다. 로터와 프로펠러 직경은 각각 4 ft, 7 ft 이고, 배터리 용량은 63 kWh으로 추정했다[18].

2.3.4 Wisk Cora Vehicle cost breakdown

Table 3은 계산된 Wisk Cora의 가격 예측 결과표이다. Initial 시점에서 Wisk Cora의 가격은 약 \$488,004로 계산되었다. 여기서 랜딩기어가 음의 가격을 갖는 이유는 Base structure cost에서 접이식 랜딩기어(Retractable landing gear)의 가격이 기본적으로 계산이 되기 때문에, 이를 사용하지 않는 고정식 랜딩기어(Fixed landing gear)의 경우에는 가격 차감을 해야 하기 때문이다[10]. Wisk Cora는 고정식 랜딩기어를 사용하기 때문에 가격을 차감했다. 전기 시스템 및 추진 부품의 가격은 전체의 49%로, 민항기의 엔진과 전기 시스템 가격 비율이 약 30%[15]인 것과 비교하면 상대적으로 높은 가격 비율을 보인다.

2.4 eVTOL UAM 항공기 비용 예측 결과

본 연구에서 제시한 방법으로 Fig. 5에 도시되어 있는 Wisk Cora, Aurora Flight Science PAV, Uber eCRM 003, A³ Vahana, Lilium Jet, Joby S4, 총 6종의 eVTOL UAM 항공기 비용을 계산하였다. 3종의 Lift+Cruise, 3종의 Vectored Thrust로, 타 논문에서 자주 언급되고 추정된 데이터가 많은 UAM으로 선택했다.

Table 3. Results of Wisk Cora cost estimation

Initial	Category	Estimated Cost
Base Structure Cost	Engineering	\$48,470
	Tooling	\$28,262
	Manufacturing	\$116,805
	Development	\$966
	Flight Test	\$334
	Quality	\$34,165
	Material	\$11,597
	Landing Gear	-\$5,266
Additional Airframe Cost	Vertical Tail	\$2,145
Subpart Cost	Rotor & Propeller	\$49,045
	Avionics	\$10,531
	Electric Motor	\$100,172
	Battery	\$4,423
	Power Management System	\$86,355
Vehicle Cost	Total	\$488,004



Fig. 5. Six representative eVTOL UAMs

2.4.1 eVTOL UAM의 항공기 비용

Figure 6은 Initial 시점에서 계산된 항공기 비용을 Base structure cost, Additional airframe cost, Subpart cost로 나누어 도시한 그래프이다. 이때 Adjustment factor는 범위의 평균값을 사용하였다.

Uber eCRM 003의 경우, Inbody boom 형상이 구조 중량을 무겁게 만들어 높은 항공기 비용이 예측되었다. 또, Aurora PAV는 Wisk Cora보다 구조 중량이 작아 낮은 Base structure cost를 갖고 있지만, 고풍력의 전기 모터를 사용하기 때문에 Subpart cost가 높게 예측되었다.

Lift+Cruise 타입의 항공기에서는 Base structure cost와 Subpart cost가 차이가 최대 20%인 것에 비해, Vectored Thrust 타입의 항공기에서는 최대 66%까지 차이를 보인다. 그 이유로, Vectored Thrust 타입의 항공기 비용에 포함된 개발비용이 Lift+Cruise 타입의 항공기보다 더 높기 때문이다. 또한, Lift+Cruise 타입은 상승비행과 전진비행에서 사용되는 추진시스템이 분리되어있기 때문에 더 많은 모터와 프로펠러의 개수를 갖는 경향이 있어, 같은 좌석 수의 Vectored Thrust 타입보다 더 높은 Subpart cost를 갖고 있다. Lift+Cruise, Vectored Thrust 타입의 전동화로 인해 추가된 평균적인 Subpart cost는 각각 전체 항공기 비용에 50.5%, 27.3%로 계산되었다.

Adjustment factor 범위에 따라 계산된 시점별 eVTOL UAM 항공기 비용의 최소, 최대값을 Table 4에 도시하였다. Initial 시점에서 2인승의 항공기는 5억~8억, 5인승의 항공기는 14억~21억 사이의, Near term 시점에서는 2인승 3억~4억, 5인승 7억~12억 사이의 항공기 비용이 예측된다.

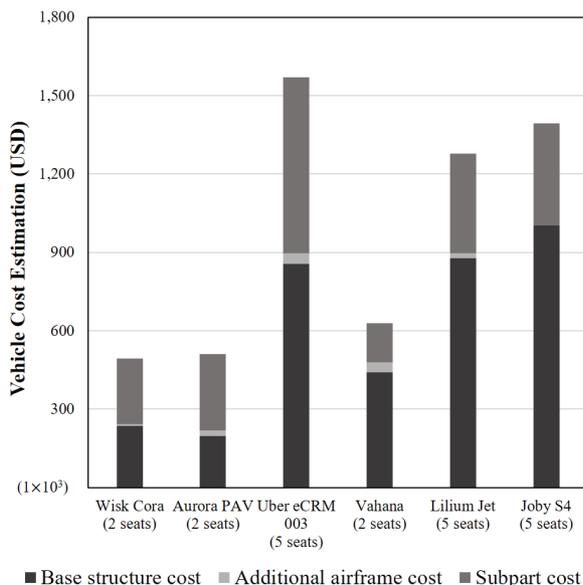


Fig. 6. eVTOL UAM vehicle cost breakdown

Table 4. Results of eVTOL UAM vehicle cost estimation

Initial	Seats	Estimated Vehicle Cost	
		Minimum	Maximum
Wisk Cora	2	\$442,000	\$534,000
Aurora PAV	2	\$469,000	\$553,000
Uber eCRM 003	5	\$1,403,000	\$1,728,000
A ³ Vahana (defunc)	2	\$572,000	\$672,000
Lilium Jet	5	\$1,182,000	\$1,373,000
Joby S4	5	\$1,287,000	\$1,500,000

Near term	Seats	Estimated Vehicle Cost	
		Minimum	Maximum
Wisk Cora	2	\$291,000	\$326,000
Aurora PAV	2	\$327,000	\$361,000
Uber eCRM 003	5	\$902,000	\$1,020,000
A ³ Vahana (defunc)	2	\$296,000	\$335,000
Lilium Jet	5	\$630,000	\$700,000
Joby S4	5	\$666,000	\$743,000

2.4.2 eVTOL UAM의 좌석당 항공기 비용

예측한 항공기 비용을 좌석당 항공기 비용으로 나타내었다. 여기서 좌석당 항공기 비용은 총 항공기의 비용을 내부 좌석수로 나눈 값이다. 일반적으로 좌석수가 많은 항공기가 항공기 비용은 높지만, 좌석당 항공기 비용은 좌석 수가 많을수록 낮다. 예측한 항공기 비용과 UAM 연구 보고서[2]에서 제시된 좌석당 항공기 비용 범위를 Fig. 7에 표시하였다. 2.2.1절에서 Adjustment factor를 역으로 도출할 때, Fig. 7에서 제시한 타입별 좌석당 항공기 비용에 들어가도록 설정하였기 때문에 6종의 eVTOL UAM 모두 제시된 가격 범위 안에 들어가 있음을 볼 수 있다.

Figure 8은 좌석당 항공기 비용을 Uber에서 예측한 항공기 비용과 같이 나타낸 그림이다. Uber에서는 4인승 eVTOL UAM 가격을 배터리를 포함한 가격으로 Initial 단계에서는 약 \$1.26M, Near term 단계에서는 약 \$0.63M로 제시하였고, 이를 2020년 좌석당 가격으로 환산하면 각각 \$334,000와 \$167,000이다[1].

먼저 Initial 시점에서, Wisk Cora의 좌석당 항공기 비용이 가장 적게 예측이 되었다. 일반적으로 같은 항공기 타입에서 좌석이 많을수록 좌석당 항공기 비용이 낮아지지만, Lift+Cruise 타입의 Uber eCRM 003의 좌석당 항공기 비용은 적은 좌석의 eVTOL UAM보다 크게 예측되었다. Uber eCRM 003의 경우, Inbody boom 형상이 구조 중량을 무겁게 만들어 같은 타입의 2인승 항공기에 비해서도 높은 좌석당 항공기 비용이 예측되었다. Vectored Thrust 타입의 A³ Vahana의 경우, 2인승의 항공기이기 때문에 5인승인 같은 타입의 항공기와 비교할 때, 좌석당 항공기 비용은 높게 예측되었다.

Near term 시점에서는 Initial 시점에서의 예측 경향을 따라가지만, Initial 시점과 다르게 Lilium Jet이 가장 낮은 좌석당 항공기 가격을 보인다. Near term 시점으로 넘어가면서, 가격 하락폭이 Vectored Thrust

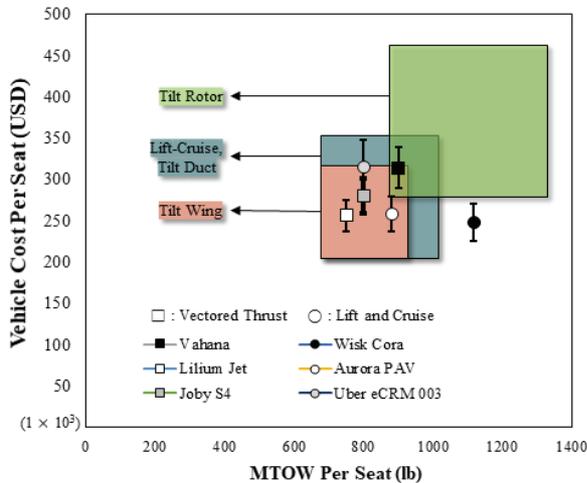


Fig. 7. Vehicle cost comparison with BAH consulting estimation

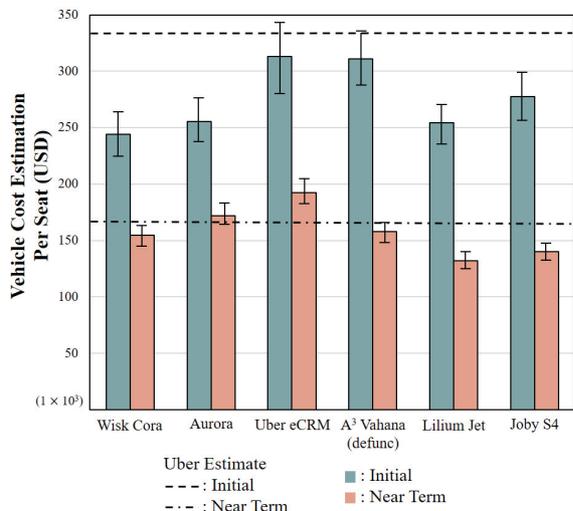


Fig. 8. Results of vehicle cost estimation per seat

Table 5. Comparison with Uber estimation

	Initial	Near term
Uber suggested	\$334,000	\$167,000
Estimation	\$276,000	\$158,000
Error	-17.4%	5.3%

항공기 타입이 Lift+Cruise 항공기 타입보다 크기 때문이다. 항공기 비용에 높은 비율을 갖는 개발비용이 생산량 증가에 따라 영향력이 감소하는 것이 주된 원인이다. 항공기 개발비용은 생산 대수만큼 나누어져 항공기 비용에 영향을 미치는데, 생산 대수가 급격히 증가하는 Near term부터는 영향력이 줄어들어 상대적으로 개발비용이 높은 Vectored Thrust라도 좌석당 항공기 비용이 Lift+Cruise 항공기보다 더 하락한 것이다. 따라서 본 연구에서 나온 결과로 보면, Near term 시점부터 개발비용이 항공기 비용에 미치는 영향이 현저히 줄어들어 생산 비용에 큰 차이가 없다면 타입에 상관없이 비슷한 수준의 가격이 형성되는 경향이 있다.

6종의 eVTOL UAM의 좌석당 항공기 비용 평균과 Uber의 예측을 비교를 해보면 Table 5와 같다. 6종류의 eVTOL UAM 모두 Uber에서 제시한 항공기 비용과 유사한 값의 크기를 갖고 있다. 이는 본 연구에서 제시한 방법이 다양한 eVTOL UAM에도 적합한 계산의 결과를 제공한다는 것을 알 수 있다. 항공기 비용 예측은 불확실성 요소가 많기 때문에 오차의 정량적 수치보다는 다른 항공기 비용이 일정하게 나오는 것에 의미가 있다.

III. 결론

본 연구는 eVTOL UAM의 순기비용 중, 첫 번째 단계로 항공기 비용을 계산하는 방법을 제시했다. DAPCA IV를 이용해 기본 형상의 가격, Beltramo 방법을 이용해 추가 파트의 가격, 경험식을 이용해 전동화에 새롭게 추가되는 부품들의 가격을 계산했다. 제시한 방법을 통해 6종의 eVTOL UAM 항공기 가격을 Initial과 Near term 시점에 대해 예측했고, Uber에서 제시한 값 기준으로 17.4%, 5.3%의 오차를 보였다. 항공기 비용 예측은 미래의 경제, 기술의 발전, 제작의 노하우와 같은 불확실성 요소가 영향을 미치기 때문에 절대값과의 비교보다는 상대적인 비교를 통해 계산되는 가격의 크기 및 일정함을 확인하는 것에 의미가 있다. 본 연구의 의의는 다음과 같다.

- 1) eVTOL UAM의 항공기 비용을 계산할 수 있다.
- 2) 제한된 정보로 다양한 형상의 항공기 비용을 계산할 수 있다.

여러 항공기의 가격 예측 방법이 있지만, eVTOL UAM의 가격 예측 방법은 아직 제시된 바 없다는 점에서 연구의 가치를 갖는다. 또한, 6종류의 UAM 뿐 아닌 앞으로 개발될 복잡한 형상의 eVTOL UAM 에도 적용 가능하다.

Long term 시점의 경우, 생산 자동화 과정이 추가 되어 항공기 생산량의 크게 늘어날 것이고, 그로 인한 항공기 비용의 큰 하락이 예측된다. 이러한 부분을 고려할 수 없어 본 연구에서는 Long term 시점의 항공기 비용 예측을 제외했다. 마찬가지로 생산량이 늘어나면 항공기의 개발비용이 항공기 비용에 끼치는 영향력이 줄어들게 된다. 본 연구에서의 결과를 보면, 항공기 타입에 따라 기술적 난이도가 차이가 나더라도 항공기 비용에 미치는 개발비용의 영향은 적을 것이기 때문에 생산 단가가 비슷하다면 가격이 동등해지는 경향이 있다.

본 연구의 한계점으로는 Adjustment factor를 단순히 항공기 타입으로만 구분지었다는 것에 있다. 같은 타입이라 할지라도, Tilting 액추에이터 개수 차이, 덕트 팬 사용 등 항공기의 복잡성(Complexity)에 따라 기술적 난이도는 차이가 있다. 특히, 본 연구에서 계산한 6종의 eVTOL UAM 중 Lilium Jet은 덕트 추진을 이용한 새로운 개념의 항공기이기 때문에 단순히 타입으로만 기술적 난이도를 나누어 항공기 비용을 예측하는 것에는 한계가 있다. 기술적 난이도의 기준을 세워 복잡성을 더 세분화 할 필요가 있지만, 명확한 척도를 제시하기 어려울 뿐더러 공개된 데이터가 적기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다.

향후 연구로 본 연구의 한계점인 복잡성을 고려한 항공기 비용 계산과 운용 비용 예측 방법 연구가 있다. 실제로 운용 비용은 상업성과 가장 관련이 있는 비용이고, 장기적으로 보았을 때 항공기 비용보다도 더 지출이 큰 비용이기 때문에 상업성 예측에 반드시 필요한 계산이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 차세대 고속 복합형 무인 회전익기 특화연구실에서 수행되었습니다.

References

- 1) Uber elevate, *Fast-Forwarding to a future of on-demand urban air transportation*, 2016.
- 2) Booz Allen Hamilton, *UAM market study - technical out brief*, 2018.
- 3) NASA, CCI and McKinsy, *Urban air mobility market study*, 2018.
- 4) Raymer, D., *Aircraft Design : A Conceptual Approach*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012.
- 5) Bil, C., Finger, D. F., Goetten, F. and Braun, C., "Cost Estimation Methods for Hybrid-Electric General Aviation Aircraft," *Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, 2019.
- 6) Zijp, S., "Development of a Life Cycle Cost Model for Conventional and Unconventional Aircraft," *Master's thesis, Technical University of Delft*, 2014.
- 7) Jung, S. N., Yu, Y. H., Lee, C. Y. and Ko, K. H., "Preliminary design and cost estimation of helicopters," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 4, April 2010, pp. 309~314.
- 8) Vertical Flight Society, *The Electric VTOL Revolution*, 2018.
- 9) Porsche Consulting, *The Future of Vertical Mobility*, 2018.
- 10) Gudmundsson, S., *General Aviation Aircraft Design : Applied Methods and Procedures*, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014.
- 11) Mikulik, Z. and Haase, P., *Composite Damage Metrics and Inspection*, EASA, March 2012.
- 12) Vegh, J. M., Botero, E., Clarke, M., Trent, J. and Alonso, J., "Current Capabilities and Challenges of NDARC and SUAVE for eVTOL Aircraft Design and Analysis," *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, AIAA Paper 2019-4505, 2019, pp. 1~15.
- 13) Beltramo, M., Trapp, D., Kimoto, B. and Marsh, D., *Parametric Study of Transport Aircraft System Cost and Weight*, Technical Report NASA-CR-151970, NASA-Ames Research Center, 1977.
- 14) U.S. Bureau of labor statistics, <https://www.bls.gov/>, Accessed July 2020.
- 15) Kundu, A. K., Price, M. A. and Riordan, D., *Conceptual Aircraft Design : An Industrial Perspective*, Wiley, Hoboken, NJ, 2019.
- 16) Misra, A., *Summary of 2017 NASA workshop on assessment of advanced battery technologies for aerospace applications*, NASA, January 2018.
- 17) Bloomberg NFC, <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>, Accessed November 2020.
- 18) Bacchini, A. and Cestino, E., *Electric VTOL Configurations Comparison*, Aerospace, 2019.