

도심항공 모빌리티 운용을 위한 인구분포를 고려한 소음 우선 경로 생성 및 소음 분석

Noise Priority Route Generation and Noise Analysis for the Operation of Urban Air Mobility Considering Population Distribution

소민준·황호연*

세종대학교 항공우주공학과

Min-Jun So · Ho-Yon Hwang*

Department of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Korea

[요약]

eVTOL PAV의 상용화에 있어 해결해야 할 중요한 과제들 중 하나는 도심항공 모빌리티 운용에 따른 소음을 감소시키는 것이다. 따라서 본 논문에서는 우리나라 수도권 행정구역별 인구 분포 데이터를 분석하여 소음에 영향을 받는 인구수가 최소화될 수 있도록 AEDT (aviation environmental design tool) 소프트웨어를 사용하여 소음 우선 경로를 생성하고, 운용 시의 소음 분석을 수행하였다. 또한, 최단 거리 경로 운영 시 소음에 영향을 받는 인구수와 비교하여 소음 우선 경로가 소음 노출을 얼마만큼 감소시킬 수 있는지 분석하였다. eVTOL PAV 개발 회사에서 소음 데이터를 제공하지 않는다는 점을 감안하여 헬리콥터 모델을 사용하여 분석을 진행하였다. 결과적으로 소음 노출량을 최소화한 소음 우선 경로가 타 경로들에 비해 더 효율적임을 증명하였다.

[Abstract]

An important challenge in commercialization of eVTOL PAV is to reduce noise for urban air mobility (UAM) operation. Therefore, in this paper, noise priority routes were created to minimize the number of people affected by noise using aviation environmental design tool (AEDT) software and population distribution data for administrative districts, and noise analyses during operation were performed. Also, it was analyzed how much noise exposure could be reduced compared to the number of people affected by noise in the shortest route. Considering that the eVTOL PAV developers do not provide data, the analysis was conducted using a helicopter model. As a result, it was shown that the noise priority route that minimized the amount of noise exposure was more efficient than other routes.

Key word : Urban air mobility, Route generation, AEDT, Noise analysis, eVTOL PAV, Noise priority.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.5.348>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 30 September 2020; Revised 21 October 2020
Accepted (Publication) 7 October 2020 (30 October 2020)

*Corresponding Author; Ho-Yon Hwang

Tel: +82-2-3408-3773

E-mail: hyhwang@sejong.edu

1. 서론

운송 시스템은 열차의 발명으로 “제 1 교통 혁명”을 이루었고, 자동차의 보급으로 “제 2 교통 혁명”을 경험하였다. 현재는 자율적이고 공유된 이동성을 보장하는 “제 3 교통 혁명” 아래에서 새로운 기술들이 빠르게 개발되고 있다. 그 개념 중 하나가 도심항공 모빌리티(UAM; urban air mobility)이다. UAM은 운송 시스템이 갖는 여러 이점 중에서 특히, 통근 시간을 줄여 도시 이동성을 향상시킬 수 있다는 것이다[1]. 실제로 수도권 교통 혼잡은 꾸준하게 심화되고 있는 상황이며 혼잡으로 인해 발생하는 경제적 손실은 지속적으로 증가하고 있다. 뿐만 아니라, 수도권 주변의 급격한 신도시 건설로 인해 광역통행 수요가 증가하고 있지만 교통시설의 부족으로 인하여 특히 출퇴근 시간대 일부 구간에서의 교통량은 그림 1과 같이 수용 가능한 용량을 초과하는 경우가 발생하고 있어 혼잡비용은 더욱 커질 것으로 예상된다. 또한 그림 2와 표 1에 나타낸 것과 같이 출퇴근 시간대에서 수도권 내 도로 정체구간은 서울과 경기도를 연결하는 도로에 다수 밀집되어 있으며 그 길이가 159.8 km에 이른다. 이에 따라 2019년 기준 수도권에서 대중교통을 이용한 출퇴근 평균 소요시간은 약 81분으로 OECD 평균 29분에 비해 2.8배 높은 것으로 나타났다[2].

정부에서도 이러한 수도권 교통 혼잡 문제를 인식하고, UAM의 상용화를 통해 수도권 기준 출퇴근 통행시간 및 사회적비용이 70% 저감된다고 판단하여 ‘K-UAM’ 프로젝트를 적극적으로 추진 중에 있다. 정부의 대략적인 마일스톤은 2020년에서 2024년까지 UAM 특별법 등의 제도 정비 및 시험 단계를 거치고 2025년에 도심 내외부의 거점에 일부 노선을 상용화하여 연계교통체계를 구축할 계획이며 2030년 내지 2035년 이후로는 도시 간 이동을 확대하여 UAM 시스템을 완성한다는 것이다[3].

해외에서도 대도시 교통밀집 현상에 대한 대안으로 electric vertical take off and landing (eVTOL) 비행체 개발과 UAM 시스템 구축에 관심을 돌리고 있다. 릴리움 제트사, 바하나사, 볼로콥터사 등의 스타트업기업에서는 eVTOL personal air vehicle (PAV)를 제작하여 그 성능을 테스트하였으며, 우버 엘레베이트사, 에어버스사 등의 대기업에서는 2023년 내지 2026년에 UAM 서비스 상용화를 계획 중에 있다.

그러나 최신 기술이 UAM 시스템을 실현하기 위한 특정 수준에 도달했음에도 불구하고, 도시 지역에서 항공 운송을 시행하는 것은 특히 공해, 소음 등의 장벽에 직면해 있다. 더욱이 국토 면적이 좁아 거주지역이 과도하게 밀집되어 있는 우리나라 수도권의 경우에는 위의 문제들이 상당히 부각될 수밖에 없는 상황이다. 또한 소음의 경우에는 사람에 따라 느끼는 정도가 상대적이기 때문에 우선적으로 표준적인 소음 강도에 대한 지표를 통해 분석한 뒤, 추후에 모든 이해 관계자가 상호 이익이 되는 조건에서 지속 가능한 시스템을 만드는 것이 중요할 것이다.

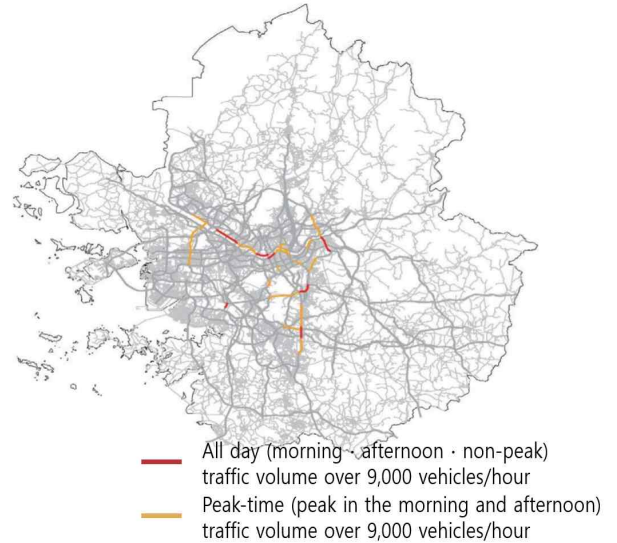


그림 1. 전 시간대 및 출퇴근 시간대 교통량 9,000 대/시 초과 구간 [2]
Fig. 1. Over 9,000 units/hour traffic zone for all day and commuting time [2].

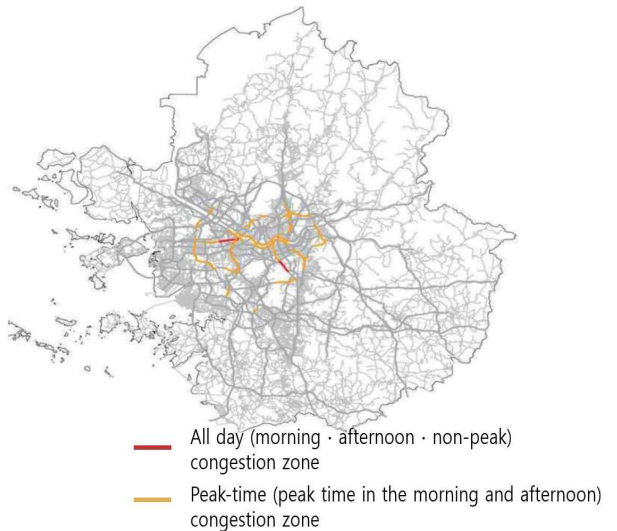


그림 2. 전 시간대 및 출퇴근 시간대 주요 정체 구간[2]
Fig. 2. Major congestion zones for all day and commuting time [2].

따라서 본 논문에서는 FAA (Federal Aviation Administration)에서 개발한 항공기의 소음, 연료 소모, 배출가스, 대기 오염과 같은 환경적 영향을 분석하는 소프트웨어인 AEDT (aviation environmental design tool)를 사용하여 UAM 경로 주변의 소음 해석을 수행하였다. 경로는 소음의 영향을 받는 인구의 수가 최소화되도록 하기 위해 출발지와 목적지를 직접 연결하는 단일 직선이 아닌 소음우선 형태로 설정하였다.

표 1. 주요 정체 구간[2]

Table 1. Major congestion zones [2].

Category	Road type	Road name (section)	Extension (km)
Rush hour congestion	Highway	Seoul outer ring expressway (Gyeyang IC - Jungdong IC - Ahnhyun IC), West coast expressway (Ansan JC - West Seoul TG), 2nd Gyeongin expressway (Gwangmyeong IC - Iljig JC) etc.	75.3
	City express	Gangbyeonbuk-ro(Seongsan large bridge - Dongho large bridge), Internal beltway (Yeonhee IC - Hongjimun tunnel entrance), Dongbu main road(Jungnang bridge - Wolgye bridge), Olympic daero (Gayang large bridge - Yeoui downstream IC) etc.	84.5
	Total		159.8

II. 항공기 소음 평가방법

항공기 소음 평가 단위는 다양하며, 그에 따른 평가 기준도 모두 다르다. 현재 우리나라의 경우에는 weighted equivalent continuous perceived noise level (WECPNL)을 사용하고 있다. WECPNL은 국제민간항공기구(ICAO)에서 항공기의 급속성 소음특성을 감안하여 항공기에 의한 장기 연속노출의 척도로서 제안한 측정 단위이다. 우리나라에서는 항공기 최고소음도를 평균한 값에 주간, 야간, 심야 시간대별로 운항횟수를 가중하여 주민이 실제 느끼는 소음에 가깝게 산출한다.

$$WECPNL = L_{max} + 10\log(N_2 + 3N_3 + 10(N_1 + N_4)) - 27 \quad (1)$$

여기서 L_{max} 는 1일간 측정된, 배경소음보다 10 dB 이상 큰 항공기 통과 시 소음의 최대 소음도의 평균값을 나타내며, N_1 은 24:00~07:00 동안 통과한 항공기 수, N_2 는 07:00~19:00 동안 통과한 항공기 수, N_3 은 19:00~22:00 동안 통과한 항공기 수이며, N_4 는 22:00~24:00 동안 통과한 항공기 수를 나타낸다.

그러나 WECPNL 평가 방법은 과도하게 근사화되었고, 국내의 다른 환경소음은 등가소음도 방식(L_{den})을 적용하기 때문에 항공기 소음과 비교하기 어려워 지속적인 소음 노출의 총합을 반영하기에 한계가 있다. 또한, 미국, 유럽 등 항공 선진국의 경

우 등가소음도 방식을 채택하고 있어, 대한민국 환경부는 국제적으로 통용되는 단위로 통일하기 위해 항공기 소음 단위를 현행 최소소음도 방식인 WECPNL에서 등가소음도 방식인 L_{den} 로 변경하고, 2023년부터 본격 시행한다고 밝혔다.

등가소음평가 방식은 WECPNL 평가 방법의 단점들을 보완해 주고 WECPNL과 선형 관계에 있으며, 소음 측정 기술의 발달로 인하여 단순화의 과정 없이도 적분을 이용한 자동 측정이 용이하기 때문에 현재 기준치와의 연속성을 감안하였을 때 항공기 소음 평가 지표로 사용하기에 적절하다 [4].

등가소음평가 방식은 하루 동안 매시간 등가소음도를 측정하고 시간대별로 가중치를 부여한 후에 24시간으로 나눈 평균 소음이다. 또한, 그 시간대를 2분할 한 것이 L_{dn} (day-night average sound level)이고, 3분할 한 것이 L_{den} (day-evening-night average sound level)이다. 2분할법의 경우에는 주간인 L_d 는 07:00~22:00이며, 야간인 L_n 은 22:00~07:00으로 나뉘지며, 야간 시간대에만 10 dB의 가중치가 부여된다. 한편, 3분할법의 경우 주간인 L_d 는 07:00~19:00, 저녁인 L_e 는 19:00~22:00이며, 야간인 L_n 은 22:00~07:00으로 나뉘지며, 저녁에는 5 dB, 야간에는 10 dB의 가중치가 부여된다.

따라서 본 논문에서는 등가소음도로서 소음 측정에 용이하며 낮, 저녁과 야간 시간대 모두를 구분하며, 또한 국내의 개정 법률에 따라 2023년 WECPNL에서 바뀌게 되는 L_{den} 을 기준으로 하여 소음 분석을 수행하였다.

$$L_{dn} = 10\log\left[\left(\frac{1}{24}\left(15 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 9 \cdot 10^{\frac{(L_n+10)}{10}}\right)\right)\right] \quad (2)$$

$$L_{den} = 10\log\left[\frac{1}{24}\left(12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 9 \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}}\right)\right] \quad (3)$$

III. 소음이 인구에 미치는 영향 산정

3-1 소음에 영향을 받는 인구 비율 산정식

eVTOL PAV가 UAM으로 운용됨에 따라 운용 경로 주변에 소음이 발생하게 될 것이며, 따라서 해당 소음이 미치는 구역에 거주하는 인구에게 그 영향을 끼치게 될 것이다. 따라서 소음이 적은 eVTOL PAV 운용 경로를 생성을 위해서는 발생하는 소음에 영향을 받는 각 거주 지역별 인구 비율(%)을 식 (4)와 같이 측정하는 것이 중요하다.

$$Highly\ annoyed, \% = \frac{100}{1 + e^{(11.13 - 0.141L_{dn})}} \quad (4)$$

그림 3은 본래의 Shultz curve이며, 식 (4)는 소음에 의해 높은 수준의 부정적인 영향을 받는 거주 인구 수를 계산하기

위해 사용된 Shultz curve의 curve fitting 함수이다[5].

그림 4는 야간시간 공유 비율에 따른 소음 측정 지표별 차이를 나타낸다[6]. 그림 4에서 주목해야 할 지표별 차이는 L_{dn} 과 L_{den} 의 차이를 나타내는 부분이다. 야간시간을 공유하지 않음에도 불구하고 2 dB 차이 밖에 발생하지 않았으며 공유 비율이 높아질수록 그 차이가 줄어들어 가는 것을 확인 할 수 있다. 또한 식 (2)와 (3)에서 L_{dn} 과 L_{den} 의 야간시간은 22:00~07:00로 동일하다. 따라서 두 지표간의 소음 수준 차이는 작다고 가정하고 식 (4)의 L_{dn} 을 L_{den} 으로 대체하는 것이 가능하다.

한편, Shultz curve는 서로 다른 소음원 사이의 특징을 구별하지 않은 상태에서 높은 수준의 소음의 영향을 표현한 것이다. 이에 따라 후속 연구에서 교통수단 사이의 특징을 구별하여 높은 수준의 소음의 영향을 밝혔으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 본래의 Shultz curve에 의하면 65 dB에서의 높은 수준의 소음 영향은 약 12%이다. 하지만 항공기가 미치는 소음 영향은 다른 소음원에 비해 높은 경향을 보이므로 약 27% 수준이라는 것이 그림 5에 나와 있는 Miedema curve이다[5].

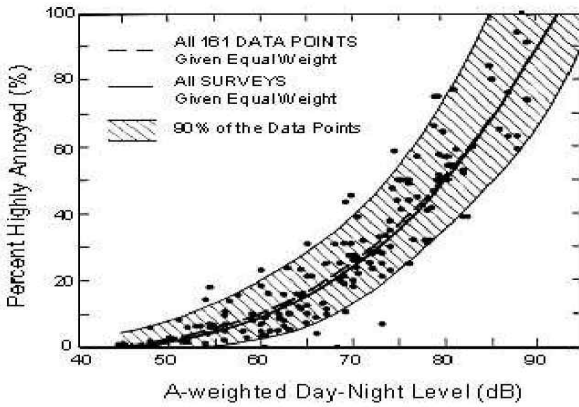


그림 3. 본래의 슬츠 커브[5]
Fig. 3. Original Shultz curve [5].

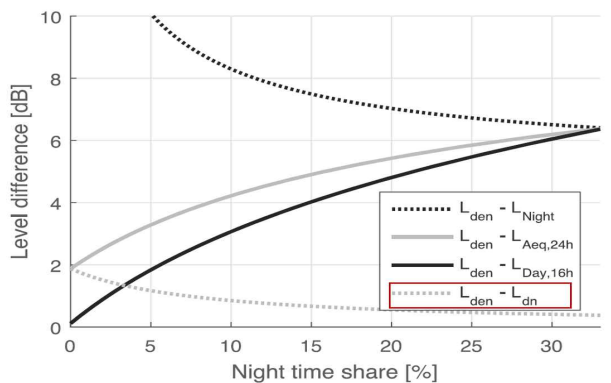


그림 4. 야간시간 공유 비율에 따른 소음 측정 지표별 차이[6]
Fig. 4. Noise measurement metrics difference according to night time sharing ratio [6].

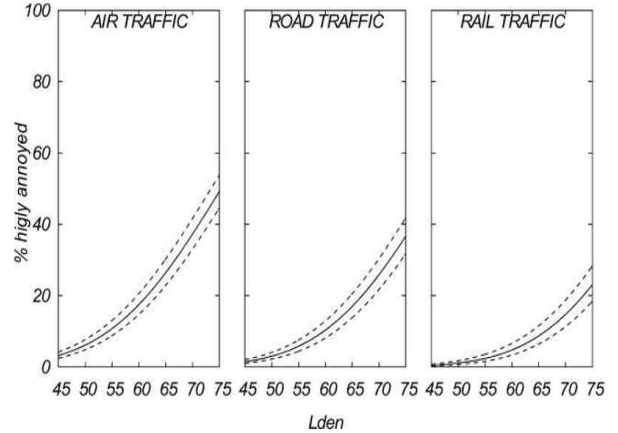


그림 5. 소음원에 따른 높은 수준의 소음 영향 비율[5]
Fig. 5. Highly annoyance ratio depending on noise sources [5].

3-2 소음에 영향을 받는 인구수 산정방법

그림 6은 eVTOL PAV가 가상의 도시를 통과할 때 생성되는 소음을 가상적으로 나타낸 것이다. 경로 주변에 미치는 소음의 폭은 행정 구역 일부분에 한정될 확률이 높다. 또한 행정구역의 형태가 사각형과 같은 이상적인 도형의 형태가 아니며 거주민이 지역구의 단위 면적당 균등하게 분포되어 있지도 않다. 현재 인구분포는 행정구역에 따라 통계자료가 존재하므로 이를 보정하여 합리적으로 UAM 소음이 인구에 미치는 영향을 도출해 낼 수 있는 방법을 다음과 같이 제시하고자 한다.

그림 7은 그림 6을 직사각형 형태의 이상적인 가상의 공간에서 새롭게 모델링한 그림이다. 그림 7에서 1개의 직사각형은 총 6개의 셀이 병합된 하나의 구역이다.

이를 가상의 도시에 적용해보면 이 도시의 총 면적은 165.49 km^2 이며 거주 및 통근·통학 인구는 424,534 명이라고 가정하여 이를 다시 가상공간에 옮겨보면 셀 당 0.985 km^2 , 즉 대략 1 km^2 이며, 단위 면적당 2,527 명이 균등하게 거주하고 있다고 가정할 수 있다.

그림 5에서 65 dB과 70 dB에서 항공교통 소음의 영향은 각각 총 인구의 27%, 38%이며 65 dB은 총 20개의 셀을 70 dB은 10개의 셀을 포함하고 있으며 각각 50,540 명과 25,270 명이 해당 소음의 영향이 미치는 셀에 거주하는 인구의 수가 된다. 결과적으로 가상 도시 내에서 해당 eVTOL PAV의 경로에서 발생하는 소음에 의해 높은 수준의 영향을 받는 인구는 65 dB 구간에서는 총 13,645 명이며 70 dB 구간에서는 총 9,603 명이 된다.

본 논문에서는 이와 같은 방법을 적용하여 UAM 소음이 거주민구에 미치는 영향을 분석하여 실제 UAM 소음 우선 경로 설정에 활용 가능한 방법을 제시하였다.

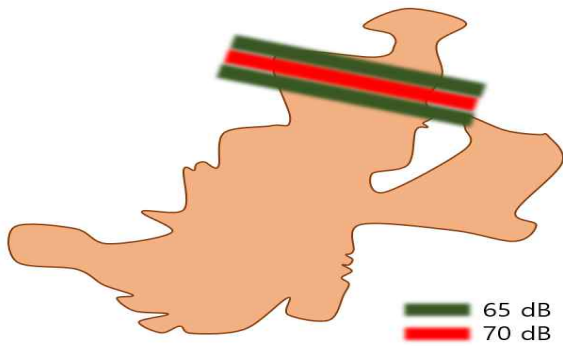


그림 6. 가상 도시를 지나가는 가상의 eVTOL PAV 소음 폭
 Fig. 6. Virtual noise width of eVTOL PAV passing virtual city

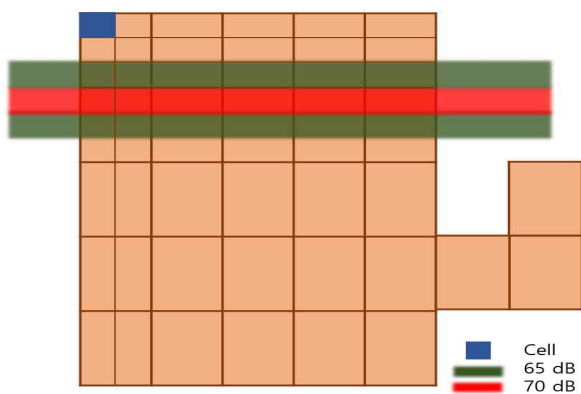


그림 7. 이상적 공간에서 모델링되어진 가상 도시
 Fig. 7. Virtual city modeled in an ideal space.

IV. UAM 운용 방식 선정

4-1 경로 및 수직이착륙장 설정

수도권의 지속적인 인구 증가로 인해 광역 통행이 증가하고 있으며, 그로 인해 도로의 교통 혼잡의 강도와 지속시간이 점점 증가하고 있다[7]. 이를 해소하고자 수직이착륙장 위치 선정 및 경로 설정 기준은 수도권 내 출퇴근 시 도로의 혼잡도가 높은 곳 주변의 경기 지역과 서울로 정하였다.

표 2는 국토교통부의 2016~2017의 경기도 지역에서 서울로 출근하는 통행량 조사이다. 또한 한국교통연구원에 따르면 서울과 주변 주요 도시를 연결하는 동서축 3개, 남북축 3개, 순환축 2개, 총 8개의 주요 축을 선정하여 축별 분석을 수행한 결과 혼잡 강도는 서울외곽축이 가장 큰 것으로 나타났으며, 평균 속도는 의정부-양주축이 가장 낮았고, 해당 축의 혼잡 발생 범위가 가장 넓은 것으로 분석되었다[2].

이에 따라, UAM 운영을 통해 서울외곽순환도로의 혼잡도를 줄이며 연결된 경기지역의 통근 혼잡을 완화하여야 한다고

판단되며, 한강과 같은 소음을 최적으로 줄일 수 있는 구간이 존재하지 않는 의정부시와 같은 지역의 소음 분석이 필수적으로 이루어져야 된다고 판단된다. 따라서 의정부시를 출발지로 선정하였으며 도착지점은 그림 8과 같이 서울특별시 내에서 인구가 가장 많이 유입되는 강남구와 서초구 근방의 그림 9와 같이 한강공원의 공터로 선정하였다. 도착지 수직이착륙장의 위치인 한강공원의 공터는 현대자동차의 ‘미래 도심항공 모빌리티 개념’에서 제안된 것과 유사하다.

출발지 수직이착륙장의 위치는 미항공우주국(NASA)에서 제시한 도시 고속도로의 입체 교차로를 그림 10과 같이 의정부시의 입체교차로로 선정하였다. 법령에 의해 사용이 제한되지 않으며, 기존의 인프라를 재사용하기에 새로운 수직이착륙장의 건설에 비해 많은 시간과 비용을 감소시킬 수 있으며, 고속도로와 연계되어있어 접근성이 우수하기 때문이다.

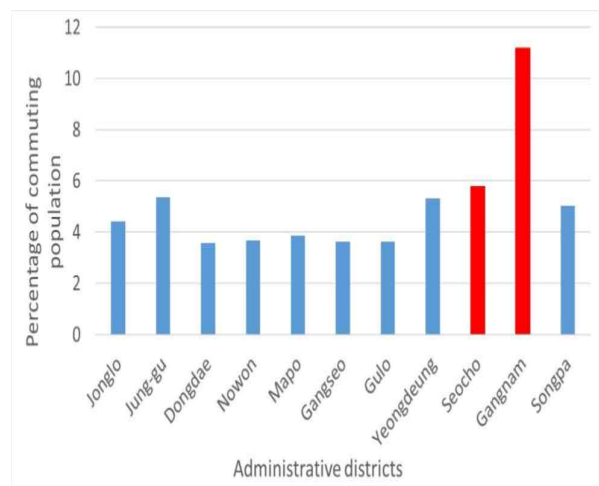


그림 8. 서울 내 통근 인구 비율 분포[8]
 Fig. 8. Percentage of commuting population in Seoul [8].

표 2. 경기도에서 서울로 출근하는 일평균 통행량[7]
 Table 2. Average daily traffic volume from Gyeonggi-do province to Seoul [7].

Rank	Departure location	Average daily traffic to work (vehicle units)	Proportion (%)
1	Goyang	25,274	12.40
2	Seongnam	25,134	12.32
3	Bucheon	20,479	10.04
4	Namyangju	16,542	8.11
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
9	Uijeongbu	10,261	5.03

입무형상은 그림 11과 같이 우버 사에서 제시한 운항기준 개념을 사용하였다. AEDT 상에서 수직상승 또는 하강과 천이를 하나의 과정으로 묶어 소음 분석을 하는 것이 큰 차이가 없을 것으로 판단하여 이 둘을 하나의 과정으로 가정하고 소음분석을 진행하였다.

그림 12에는 본 논문에서 분석하고자 한 의정부시의 입체교차로에서 강남구 내 한강공원 공터로의 경로를 나타내었다. 경로에 따른 소음 영향을 비교 분석하기 위해 해당 경로는 ‘소음 우선 시나리오’와 ‘비즈니스 우선 시나리오’로 나누어진다.

소음 우선 시나리오는 소음에 대한 영향을 최대한 줄이기 위해 경로의 대부분을 인구가 최소로 거주하는 지역을 따라 비행하도록 설정된 시나리오이다. 반면, 비즈니스 우선 시나리오는 소음에 대한 영향을 무시한 채 최단거리로 목적지에 도착하는 경우이다. 한 개의 직선으로 보여지는 비즈니스 우선 시나리오의 경우도 실제 분석에 있어서는 소음 우선 시나리오와 마찬가지로 노드를 통한 단계별 비행과정을 거쳐 운행되도록 하였다.

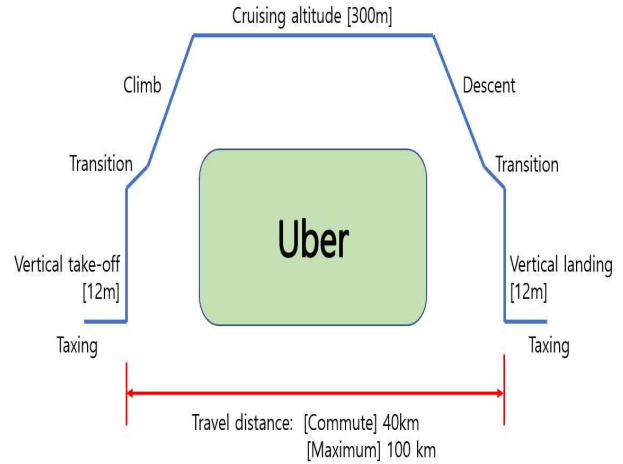


그림 11. 우버 사의 운항기준 개념도[3]

Fig. 11. Conceptual diagram of flight standards by Uber [3].



그림 9. 강남구 내 한강공원 공터
Fig. 9. Han-river park vacant lot in Gangman-gu.

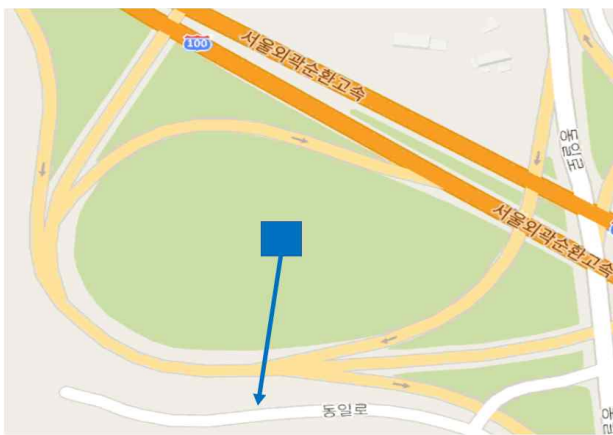


그림 10. 의정부시 내의 입체교차로
Fig. 10. Three-dimensional intersection in Uijeongbu city.

표 3은 국가통계포털에서 2015년에 수집된 각 행정구역에 남아있는 비통근자 수와 각 행정구역으로 통근하는 수를 합산한 생활 인구수를 바탕으로 단위면적을 이루는 셀 당, 인구가 어떻게 균등히 분포되어 있는지를 나타낸 것이다.

그림 13은 현실 세계에서 작성된 경로를 단위면적으로 이루어진 셀로 구성된 이상적 공간에서 모델링한 것이다. 해당 경로는 표 3에 제시된 데이터에 의해서 작성되었다. 즉, 셀 당 인구에 통과하는 셀의 수를 곱하여 나온 인구수가 비즈니스 우선 시나리오와 비교하였을 때 최소한으로 구성된 것을 소음 우선 시나리오로 설정하였다.

표 3. 경로 네트워크 주변 행정구역의 모델링 데이터
Table 3. Modeling data of administrative districts around route networks.

Region	Living population	Area (km ²)	Cells	Area per cell (km ²)	Population per cell
Dobong	214,026	20.70	17	1.035	10,339
Gangbuk	211,741	23.60	24	0.983	8,975
Nowon	377,639	35.44	36	0.984	10,655
Seongbuk	361,630	24.58	24	1.02	14,772
Dongdae-mun	306,311	14.20	14	1.01	21,662
Jungnang	254,358	18.53	18	1.03	13,719
Seong-dong	279,787	16.86	18	0.94	16,535
Gwangjin	258,184	17.06	17	1.004	15,125

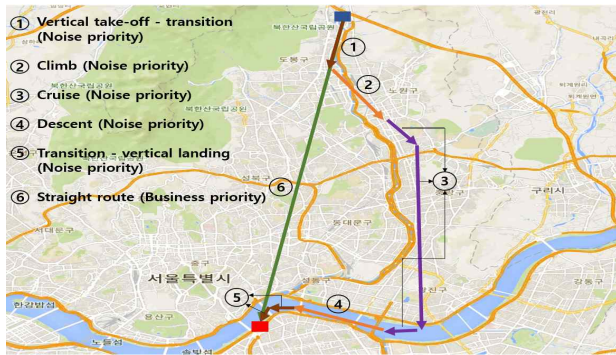


그림 12. 의정부부시에서 강남으로 향하는 경로 네트워크
 Fig. 12. Network of routes from Uijeongbu city to Gangnam-gu.

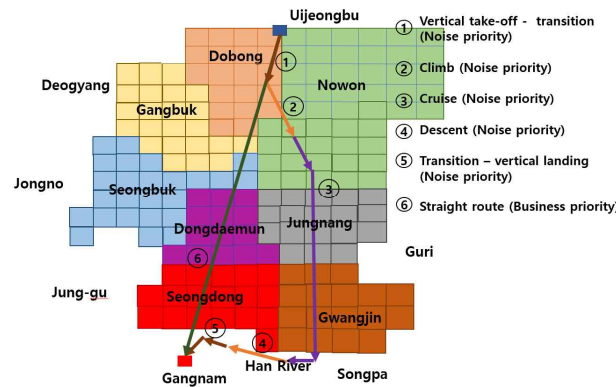


그림 13. 이상적 공간에서 모델링된 경로 네트워크
 Fig. 13. Route network modeled in an ideal space.

4-2 운용 모델 선정

eVTOL PAV가 상용화되면 동시다발적으로 운용될 것이며, 이에 따른 소음은 동시에 운용되어지는 기체들의 소음이 중첩되어있는 형태일 것이다. 따라서 AEDT 소프트웨어에 기체가 반복적으로 운용되어지도록 입력하여 소음을 구하는 것이 바람직하다고 판단된다. 하지만 eVTOL PAV 개발사에서 데이터를 공개하지 않아 본 논문에서는 현재 운항 중인 헬리콥터를 운용 모델로서 선정하였다.

2015 FAA Civil aircraft registry database에[9] 제시된 미국에서 민수용으로 운용 중인 유형별 헬리콥터와 시장 수요는 표4와 같다. 본 논문에서는 이 중 현대사에서 개발 중인 5인승 eVTOL PAV인 SA-1에 맞추어 3-5인승 유형의 헬리콥터만 이용하여 분석을 수행하였다.

2015년 국가통계포털에서 수집된 의정부시에서 한강공원 주변 행정구역인 강남구와 서초구로의 통근인구는 각각 6,881, 2,648 명으로 총 9,529 명이다. 이 중 10%에 해당하는 953명이 UAM을 이용한다고 가정하였을 때, 표5에 나타나있듯이 10% 인구에 조종사 좌석을 제외한 4인승 좌석을 나누어 배치한 것이 통근 시 운용되는 eVTOL PAV의 수가 된다.

표 4. 유형별 헬리콥터 비행대 구성[9]

Table 4. Fleet composition of helicopters by type [9].

Helicopter type	Representative helicopter	Number of operations	Proportion (%)
1-2 seats piston	Robinson R22	1,165	19.95
3-5 seats piston	Robinson R44	1,160	23.29
6-8 seats turbo-shaft	Bell 206B	3,001	51.39
9-12 seats turbo-shaft	Sikorsky S-76	314	5.38
Total		5,840	100

표 5. 의정부 강남 시나리오 운용 횟수

Table 5. Operation counts from Uijeongbu to Gangnam.

Departure - Arrival	Helicopter	Operation numbers for 10% commuter
Uijeongbu - Gangnam	Robinson R44	239

V. 소음 분석

5-1 AEDT를 이용한 경로 주변 소음 측정

AEDT 소프트웨어에서 작성된 임무형상에 따른 두 가지 시나리오에 대한 경로는 그림 14와 같다. 제시된 수직이착륙장을 실제로 존재하지 않는 수직이착륙장을 가정하기 위해 해당 위치 좌표를 입력하여 설정한 것이다. 또한 각 노드에 경로와 위도 데이터를 입력하여 경로가 그림 12와 같이 형성될 수 있도록 설정하였다.

경로에 따른 소음 분석을 수행하기 위하여 eVTOL PAV 운용 시간은 출근 시간대인 주간 07:00~10:00로 설정하였으며, 해당 시간에 대하여 표5에 따라 유형별 헬리콥터 운항에 대해 계산을 수행하였다.

Receptor sets 설정의 경우 그리드(grid) 방식을 선택하였고 경로가 북에서 남으로 향하기 때문에 X축으로 100, Y축으로 300, 총 30,000개의 receptors들을 경로 상에 위치시켰으며 receptor 사이 간격은 0.1 nautical mile (0.1852 km)로 설정하였다.

FAA에 따르면, 60 dB은 도심지역 수준의 소음이고 65 dB 이상은 임계 소음 노출 수준을 벗어나는 소음이지만, 55 dB은 교외지역 수준의 조용한 소음이다. 따라서 본 논문은 도심지역에서 운용될 eVTOL PAV에 대한 AEDT 소음 분석을 목표로 하기 때문에 55 dB 이하의 소음은 분석 수행을 진행하지 않았다. 또한 우버 사 등 eVTOL을 개발하는 회사들의 운영소음 목표치가 62~63 dB이다.

그림 15는 이에 따른 두 가지 시나리오에 대한 소음 지도를 나타낸 것이다.

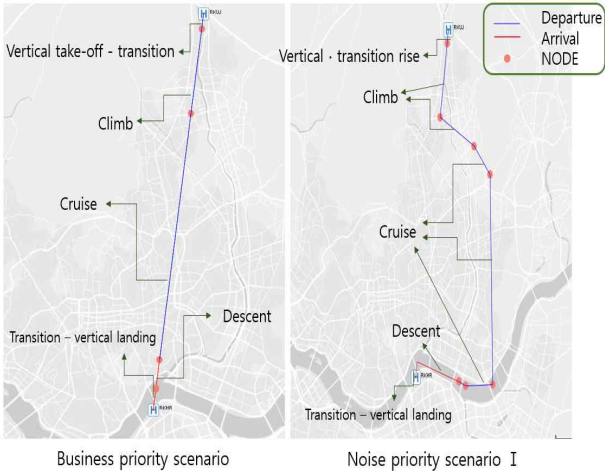


그림 14. AEDT상에서의 두 가지 시나리오에 대한 경로
 Fig. 14. Route network for two scenarios on the AEDT.



그림 15. AEDT상에서의 두 가지 시나리오에 대한 소음 지도
 Fig. 15. Noise map for two scenarios on the AEDT.

5-2 측정된 소음이 인구에 미치는 영향 예측

표 6은 소음 분석된 결과를 각 행정구역에 대하여 receptors가 지나는 셀의 수로 나타낸 것이다. 한강 위에는 거주구역이 존재하지 않기 때문에 한강 위를 비행하는 동안 발생하는 소음에 대해서는 셀 수를 포함하지 않았다. 이를 통해 알 수 있는 것은 소음 영역에 대한 셀 수의 차이는 수직이착륙장 근접 구역보다는 60 dB의 receptors가 분포되어 있는 운항 구간이라는 것이다. 따라서 60 dB 구간에 거주하는 인구나 그림 5에 따른 소음 노출비를 곱하여 각 시나리오에서 높은 수준의 소음 영향을 받는 인구수를 구하여 표 7에 나타내었다.

결과적으로 비즈니스 우선 시나리오보다 소음 우선 시나리오에서 약 16.63% 정도의 높은 수준의 소음 영향을 받는 인구수가 감소하였다.

표 6. 시나리오별 소음 영역이 지나는 행정구역 당 셀 수
 Table 6. The number of cells per administrative district passing the noise area by scenarios.

Region	Business priority scenario				Noise priority scenario			
	60 dB	65 dB	70 dB	Above 70 dB	60 dB	65 dB	70 dB	Above 70 dB
Dobong	5 cells	1 cells	1 cells	1 cells	5 cells	1 cells	1 cells	1 cells
Gangbuk	1 cells	-	-	-	-	-	-	-
Nowon	2 cells	-	-	-	5 cells	-	-	-
Seongbuk	2 cells	-	-	-	-	-	-	-
Dongdae-mun	4 cells	-	-	-	-	-	-	-
Jungnang	-	-	-	-	4 cells	-	-	-
Seong-dong	4 cells	-	-	-	-	-	-	-
Gwangjin	-	-	-	-	4 cells	-	-	-

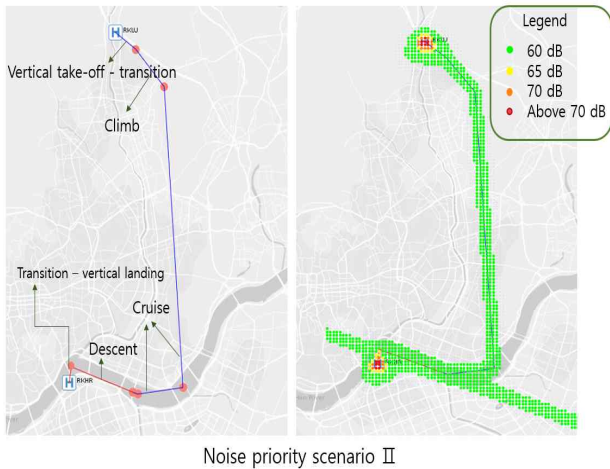
표 7. 시나리오별 높은 수준의 소음에 노출되는 인구수
 Table 7. Number of population exposed to high levels of noise by scenarios.

Scenario	Business priority scenario	Noise priority scenario
	Population	Population
	264,312	220,346
Highly annoyed (%)		
18%		
Noise level	Population of noise exposure	Population of noise exposure
60 dB	47,576	39,662

VI. 결론

본 논문에서는 AEDT 소프트웨어를 이용하여 UAM 운행 경로를 설정한 후 인구 분포에 따른 소음 우선 시나리오를 적용하였다. 이를 단순한 직선 경로인 비즈니스 우선 시나리오와 비교하였을 때 높은 수준의 소음 영향을 받는 인구의 수가 16.63% 감소하였다. 우리나라는 좁은 국토 면적에 산간 지역, 공항 및 군사 시설이 밀집되어 있어 비행에 제한적인 구역이 많으므로 본 논문에서와 같이 출발지와 목적지가 직선이 아닌 UAM 경로 개발 및 소음분석이 반드시 필요하다.

그러나 위의 분석 과정들은 eVTOL PAV 개발 회사에서 데이터를 제공하지 않아 헬리콥터를 모델로 사용한 점과, 거주 구



Noise priority scenario II

그림 16. 소음 우선 시나리오 II
 Fig. 16. Noise priority scenario II.

역에 대한 조금 더 정밀한 데이터를 사용하지 못하고 행정구역 별로 거주민을 균등하게 분포시켜 수행한 점을 고려하여 추후에 실제 eVTOL 소음 데이터와 좀 더 상세한 인구 데이터를 적용하여 경로를 작성한다면 보다 정확한 결과가 나올 것으로 판단된다.

또한, 본 논문에서는 비즈니스 우선 경로와 소음 우선 경로를 비교분석하여 소음 우선 경로 생성의 필요성을 확인하였으나 추후 연구에서는 비행금지 구역 등을 포함한 다양한 경로와 운항 고도에 대해 비교분석하여 어떤 경로와 고도가 최적인지에 대한 연구가 진행되어야 한다. 예를 들어, 그림 16은 소음 우선 시나리오 II로써 노원구, 중랑구, 광진구를 지난다. 이들의 셀 당 인구수는 39,499명으로 비즈니스 우선 시나리오의 약 62% 수준으로 경로 중 가장 최소의 셀 당 인구수를 갖는다. 그럼에도 불구하고 표 6과 표 7의 방식을 거쳤을 때 높은 수준의 소음 영향 감소율은 약 5%에 불과했다. 이 경로가 최소의 인구 분포를 이루고 있지만 소음 우선 시나리오 I에 비해 미미한 효과를 거두는 이유는 노원구라는 한 행정구역의 셀을 많은 부분 포함하며 비행했기 때문이라고 판단된다. 따라서 다양한 소음 우선 시나리오에 영향을 미치는 요인들을 분석하여 최적화된 경로를 구축하는 것이 필요하며, 이러한 연구들은 K-UAM의 조기 상용화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgments

이 논문은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(과제번호 : 20CTAP-C15

7731-01)

References

- [1] I. Terekhov, M. Niklaß, N. Dzikus, and V. Gollnick, "Assessing noise effects of the urban air transportation system," in *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Atlanta: GA, pp.1-12, 2018.
- [2] J. S. Park, J. S. Park, G. J. Kim, and S. K. Lee, Improvement plan for resolving capital area metropolitan transportation issues, The Korea Transport Institute, Sejong, Technical Report MP-19-05, pp. 1-285, 2019.
- [3] Korean urban air mobility (K-UAM) roadmap that opens the sky of the city, Korean Government, 2020.
- [4] S. G Lee, Aircraft noise evaluation criteria and measurement method improvement research, Seoul National University Environmental Noise and Vibration Research Center, Seoul, 2016.
- [5] Environmental Research and Consultancy Department, Aircraft noise and annoyance: Recent findings, Civil Aviation Authority, Aviation House, Gatwick Airport South, West Sussex, RH6 0YR, CPA 1588, 2018.
- [6] M. Brink, B. Schäffer, R. Pieren, J. M. Wunderli, "Conversion between noise exposure indicators Leq24h, Lday, Levening, Lnight, Ldn and Lden: Principles and practical guidance," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 221, Issue 1, pp.54-63, 2017.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Increasing traffic congestion in the last 3 years ... taking an average of 1 hour and 30 minutes to commute in the metropolitan area [Internet]. Available: <https://blog.naver.com/mltmkr/221276370347>
- [8] J. Y. Yun, B. S Lee, H. Y. Hwang, "Noise analysis for the operation of the eVTOL PAV using AEDT (aviation environmental design tool)," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 23, No. 4, pp.265-272, 2019.
- [9] J. H. Kim, D. Lim, S. G. Min, and Marvis, D., "Prediction of community noise impacts from commercialization of vertical takeoff and landing personal air vehicles," in *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, AIAA 2016-4365, Wash: DC, pp.13-17, 2016.



소민준 (Min-Jun So)

2016년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 학사과정

※관심분야 : Urban Air Mobility, PAV Design, Assessment of Environmental Impacts from Aviation



황호연 (Ho-yon Hwang)

1993년 5월 : 미국 Georgia Institute of Technology 항공우주공학과 (공학박사)

2000년 ~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 교수

2012년 ~ 2017년 : 세종대 부설 항공산업연구소 소장

※관심분야 : Urban Air Mobility, PAV Design, Solar Aircraft Design, Assessment of Environmental Impacts from Aviation