

항공기 운항 모드별(LTO, Cruise) 대기오염물질 배출계수 도출 및 2019년~2021년 배출량 비교

Extraction of Emission Factors by Flight Mode (LTO, Cruise) of Domestic Aircraft and Comparison of Air Emissions during 2019~2021

조현정[†], 박윤서[†], 박 민, 김선미¹⁾, 유 철*

국가미세먼지정보센터 배출량조사팀, ¹⁾ (주)위더인

Hyeon Jeong Cho[†], Yun-seo Park[†], Min Park, Sunmi Kim¹⁾, Chul Yoo*

Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

¹⁾ WITHEIN Co., Ltd., Gwangmyeong, Republic of Korea

접수일 2023년 7월 31일
수정일 2023년 9월 4일
채택일 2023년 9월 23일

Received 31 July 2023
Revised 4 September 2023
Accepted 23 September 2023

[†]These two authors contributed equally to this work as co-first authors.

*Corresponding author

Tel : +82-(0)43-279-4550
E-mail : s7424yoo@korea.kr

Abstract Due to the recently increasing international aviation demand, European Environment Agency (EEA) is considering to include air pollutants in the aircraft cruise emissions estimation list, which only covered greenhouse gases. Furthermore, under the 2019 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, countries are recommended to submit the emissions of four air pollutants (CO, NO_x, NMVOCs, SO₂) that act as ozone precursors and contribute to greenhouse gas emissions. According to the National Air Pollutant Emission Inventory (CAPSS) of the Republic of Korea, the annual NO_x emissions of the aviation sector have been increasing by approximately 6% each year from 2007 to 2019. Consequently, it would be necessary to additionally estimate and manage aircraft cruise emissions of air pollutants in Korea. In this study, based on domestic flight route information, we developed a method to estimate cruise mode emissions applying Tier 3A emission factors of EEA. The study covers 15 airports, 26 domestic flight routes and 21 aircraft models. We extracted a total of 546 emission factors for 26 domestic flight routes covered by 21 aircraft models. Applying these emission factors, we estimated the aircraft emissions by flight mode during 2019~2021. The results show that the annual cruise emissions were approximately twice as high as the emissions of Landing and Take-Off (LTO) mode for the same period. It should be noted that international flight emissions were excluded from this study due to the limitations of activity data. However, future studies should include international flight emissions in the inventory to understand the domestic flight emissions accurately. And then we should utilize modeling in analyzing the flight emissions' impacts on climate and atmosphere.

Key words: CAPSS, Air emissions, Aircraft, LTO, Cruise

1. 서 론

항공기 엔진에서 배출되는 CO₂, NO_x, HC, CO 등과 같은 오염물질은 공항 주변 지역의 대기질 악화, 건강 위해성 증가, 대기 중 화학반응을 통한 기후변화에 영향을 줄 수 있다(Turgut and Usanmaz, 2017;

Masiol and Harrison, 2014). 항공기 엔진에서 배출되는 오염물질 배출량은 실측의 한계와 순항(Cruise) 중 연료사용량 추정 불확도 등으로 인해 상공 3,000 ft 이하에서 이뤄지는 이착륙 과정을 중심으로 연구가 이루어져왔다(ICAO, 2020; Turgut and Usanmaz, 2017). 그러나 고도 3,000 ft 이상의 상공에서 순항 중

인 항공기 배출량은 온실가스 및 대기오염물질 배출을 통해 기후변화에 직접적으로 영향을 줄 수 있다 (Cui *et al.*, 2022). 따라서 온실가스 측면에서는 항공기 이착륙 모드(LTO mode)와 함께 순항 모드(Cruise mode)도 항공 부문의 중요 배출원이며, ‘국가 온실가스 배출량 산정을 위한 2006 IPCC 가이드라인’에서는 국가별 항공기 순항 모드(Cruise mode)의 온실가스 배출량을 제출하도록 하고 있다(IPCC, 2006).

최근 들어, 온실가스뿐 아니라 대기오염물질의 항공기 순항 모드 배출량과 관련한 연구가 미국, 유럽 및 중국을 중심으로 추진되고 있다. Barret *et al.* (2010)은 항공기 엔진에서 순항(cruise) 시 배출되는 NO_x가 오존 전구체로 작용함에 따른 인체 위해성은 무시할 수 없는 수준이며, 이착륙 배출량뿐 아니라 순항 중 NO_x 배출량을 관리하기 위한 정책적인 대책이 필요함을 강조하였다. 이 외에도 미국 등 국외에서는 순항 중 PM, NO_x, HC 등의 배출량 산출방안, 배출로 인한 대기질 영향 분석, 바이오 연료 사용에 따른 저감효과 분석 등과 같은 관련 연구를 수행하였다(Cui *et al.*, 2023, 2022; More *et al.*, 2017; Vennam *et al.*, 2017).

이와 더불어, 2019 IPCC 가이드라인에서는 ‘오존 전구체(Ozone precursors)’로 작용하는 대기오염물질 4종(CO, NO_x, NMVOCs, SO₂)을 간접온실가스로 정의하고, 온실가스 배출량 통계에 포함하여 제출할 것을 권고하고 있다(IPCC, 2019). 그리고 유럽 EMEP/EEA에서는 향후 더 늘어날 항공 수요에 대비하여 대기오염물질의 순항 모드 배출량 산정을 ‘대기오염물질 배출량 인벤토리 가이드북 2019’에서 제시하고 있으며, 유엔기후변화협약(UNFCCC)에 따라 순항 모드 대기오염물질 배출량을 산정 및 공표한다(EEA, 2023).

한국에서는 현재 항공기 대기오염물질 배출 현황을 관리하기 위해 환경부 국가미세먼지정보센터에서 매년 전국 공항별 항공기 이착륙 모드(LTO mode)의 연간 배출량을 산정하여 공표한다.

최근 국내 항공 부문 대기오염물질 배출량은 국민 소득수준 향상 및 항공실적 증가 등으로 인해 지속적

으로 증가하고 있다. 한국 환경부의 국가 대기오염물질 배출량 통계(CAPSS)에 따르면 2007년 대비 2019년에 항공 부문 질소산화물(NO_x) 배출량이 연간 5,751톤에서 11,560톤으로 2배 넘게 증가하였고, 휘발성유기화합물(VOCs)은 531톤에서 822톤으로 약 55%가 증가하였다(NAIR, 2019). 특히, NO_x 배출량의 국내선 증가폭이 60%인데 반해 국제선의 증가폭은 134%로 매우 크게 나타났으며, 이는 해외여행 및 국외 화물운송 수요의 급격한 증가를 의미한다. 따라서, 국내에서도 저가항공사를 포함하여 급격하게 증가하고 있는 국제노선과 기타 국내 항공수요에 대비하여, 항공 부문 배출량 관리를 강화할 필요가 있다.

본 연구에서는 유럽 EEA에서 제시하는 항공기 순항 모드(Cruise mode) 배출량 산정방식을 기반으로 국내 영공에서의 항공기 순항 모드(Cruise mode) 배출량 산정방안을 제안하고자 한다. 다만, 유럽 등 해외 주요국에서 유엔기후변화협약(UNFCCC)과 같은 기후관련 협약 및 배출량 관리를 위해 순항 배출량을 산정하고 있지만, 그 범위는 국내선으로 한정하고 있는 점을 고려하여 본 연구에서도 국내선을 대상으로 분석하였다. 추가로, 현재 국내 항공기 이착륙 모드(LTO mode)의 배출계수를 미국 연방항공청(FAA) 항공기 배출모델 EDMS v5.1 (2008) 기반에서 AEDT-2d (2017) 기반으로 현행화하여 최근 항공기 배출량 현황을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 항공기 이착륙 모드(LTO mode)

2.1.1 배출량 산정방법

이착륙 모드(LTO mode) 배출량은 상공 3,000 ft 이하에서 이뤄지는 항공기 이착륙 단계에서 발생하는 배출량을 의미하며, 5가지 운항 모드(Taxi out, Take off, Climb out, Approach landing, Taxi in)가 포함된다.

이착륙(LTO) 배출량은 국가 대기오염물질 배출량 통계(CAPSS) 작성방식에 근거하여 산정하였으며

(NAIR, 2022), 이는 순항 모드(Cruise mode) 배출량 산정 결과 분석 시 활용하고자 하였다. 배출량은 한국 공항공사 및 인천국제공항공사의 항공기 기종별 이착륙횟수를 이용하여 산정하며, 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$E_{ij} = \sum (A_j / 2 \times EF_{ij}) \quad (1)$$

E_{ij} = 항공기 기종별 (j), 오염물질별 (i) 이착륙 모드 배출량(kg/yr)

A_j = 항공기 기종별 (j) 이착륙횟수

EF_{ij} = 항공기 기종별 (j), 오염물질별 (i) 배출계수 (kg/LTO)

2. 1. 2 기초자료 구축

항공기 이착륙 배출량을 산정하기 위하여 국내선 및 국제선에 대한 항공기 기종별 이착륙횟수를 조사하였으며, 이는 한국공항공사 및 인천국제공항공사로부터 자료를 제공받았다. 연구 범위는 국내에 위치하고 있는 총 15개 공항이며, 공항명과 IATA 및 ICAO 코드 등 기본 정보는 표 1에 나타났다. 대상 기간은 2019~2021년이며, 항공기 기종은 국내선 21종 및 국제선 53종을 바탕으로 하였다.

2. 1. 3 기종별 배출계수 도출

항공기 이착륙 모드(LTO mode)의 배출계수는 국가 대기오염물질 배출량 통계(CAPSS) 산정방식을 준용하되, 항공기 기종별 배출계수를 최신화하여 적용하였다. 국가 대기오염물질 배출량 통계(CAPSS)에서는 EDMS (FAA, 2008)의 배출계수를 사용하고 있으며, 본 연구에서는 EDMS (FAA, 2008)의 업데이트 버전인 AEDT-2d (FAA, 2017)를 활용하였다. 현재 CAPSS에서 사용 중인 EDMS (Emission and Dispersion Modeling System)는 FAA (Federal Aviation Administration)에서 개발한 항공기 운항에 따른 연료 연소, 오염물질의 배출 및 확산을 모사하는 모델이다. 업데이트 버전인 AEDT (Aviation Environmental Tool)는 기본적으로 주요 기능은 EDMS와 동일하나, 연료 사용량 추정 방식이 개선되고, 일부 기종의 엔진정보 수정 및 신규 기종정보가 추가되었다.

우선, 미국 FAA (연방항공청)의 항공기 배출모델인 AEDT-2d의 기종별 대표 엔진(World) 정보를 리스트업하고, 항공기 엔진별 배출계수를 ICAO databank (v.28)를 참고하여 매칭하였다. AEDT에서 제시하는 대표 엔진은 미국, 유럽, World 3가지 유형으로 구분되며, 본 연구에서는 국내 항공사의 기종별 엔진정보 자료

Table 1. List of airports in Korea.

Classification	Airport	IATA code	ICAO code	Location
International Terminals (8)	Incheon International Airport	ICN	RKSI	Jung-gu (district), Incheon
	Gimpo International Airport	GMP	RKSS	Gangseo-gu, Seoul
	Yangyang International Airport	YNY	RKNY	Yangyang-gun (county), Gangwon-do (province)
	Muan International Airport	MWX	RKJB	Muan-gun, Jeollanam-do
	Jeju International Airport	CJU	RKPC	Jeju-si (city), Jeju-do
	Daegu International Airport	TAE	RKTN	Dong-gu, Daegu
	Cheongju International Airport	CJJ	RKTU	Cheongju-si, Chungcheongbuk-do
	Gimhae International Airport	PUS	RKPK	Gangseo-gu, Busan
Domestic Terminals (7)	Ulsan Airport	USN	RKPU	Buk-gu, Ulsan
	Yeosu Airport	RSU	RKJY	Yeosu-si, Jeollanam-do
	Gwangju Airport	KWJ	RKJJ	Gwangsan-gu, Gwangju
	Gunsan Airport	KUV	RKJK	Gunsan-si, Jeollabuk-do
	Wonju Airport	WJU	RKNW	Hoengseong-gun, Gangwon-do
	Pohang Gyeongju Airport	KPO	RKTH	Pohang-si, Gyeongsangbuk-do
	Sacheon Airport	HIN	RKPS	Sacheon-si, Gyeongsangnam-do

* Sources: Airportal, <https://www.airportal.go.kr/index.jsp> (Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

부재로 World 값을 적용하였다. 산정 시 2019~2021년을 기준으로 국내선·국제선 운항 기종을 모두 포함하였다.

PM 및 VOCs 배출계수는 AEDT-2d에서 제시하는 별도의 산정식을 적용하여 도출하였다. PM은 FOA (First-Order Approximation) 3.0 방법론을 적용한다. FOA 3.0 방법론은 LTO 사이클 동안의 비휘발성 PM과 휘발성 PM 배출의 예측을 독립적으로 산정하는 방법으로, ICAO/CAEP가 2007년 2월 승인하여 전 세계적으로 사용되고 있다. 또한, PM은 항공기 엔진에서 배출되는 입자상 물질의 공기역학적 직경이 0.1 μm 미만으로 보고되었으며 (Eurocotrol, 2018), 이에 따라 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 배출계수는 동일하게 적용하였다. VOCs는 ICAO에 제출된 HC 계수에 전환계수 (CF, Conversion Factor)를 적용하여 VOCs 배출계수를 도출하였다 (US EPA, 2009).

2.2 항공기 순항 모드 (Cruise mode)

2.2.1 배출량 산정방법

순항 모드 (Cruise mode) 배출량은 상공 3,000 ft 이상의 순항 단계에서 발생하는 배출량을 의미하며, 유럽 환경청 (EMMP/EEA) 가이드라인을 기반으로 산정하였다. 산정방법은 크게 (1) 항공기의 이착륙 (LTO) 및 총 (Total) 연료사용량 기반 (Tier 1), (2) 항공

기의 기종별 이착륙 (LTO) 및 총 (Total) 연료사용량 기반 (Tier 2), (3) 항공기의 기종별 출발·도착정보 기반 (Tier 3A), (4) 항공기 전체 비행 궤적정보 기반 (Tier 3B) 산정으로 구분된다 (EEA, 2019). EEA (2019)에 따르면 Tier 1 및 Tier 2 방법론은 이착륙 (LTO) 및 총 (Total) 연료사용량을 통해 순항 (Cruise) 중 연료사용량을 추정하여 배출량을 산정하며, Tier 3A 방법론은 항공기 기종 및 노선별 운항정보 확보가 가능할 경우의 산정방법으로 기종별 운항거리에 따른 배출량을 산정한다.

본 연구에서는 항공기 기종 및 노선별 운항정보 수집이 가능하여 Tier 3A 배출계수를 적용하는 배출량 산정방법을 제시하고자 한다. 산정식은 다음과 같다.

$$E_{ijk} = \sum (A_{jk} \times EF_{ijk}) \quad (2)$$

E_{ijk} = 항공기 기종별 (j), 순항거리별 (k), 오염물질별 (i) 순항 모드 배출량 (kg/yr)

A_{jk} = 항공기 기종별 (j), 순항거리별 (k) 운항횟수

EF_{ijk} = 항공기 기종별 (j), 순항거리별 (k), 오염물질별 (i) 배출계수 (kg/운항횟수)

2.2.2 기초자료 구축

항공기 순항 모드 (Cruise mode) 배출량을 산정하기 위하여 국내선에 대한 항공기 기종별, 노선별 운

Table 2. Distances of domestic air routes.

Routes	Distance (km)	Routes	Distance (km)
Gimpo ↔ Gwangju	270	Jeju ↔ Gwangju	182
Gimpo ↔ Gimhae	327	Jeju ↔ Gunsan	266
Gimpo ↔ Daegu	249	Jeju ↔ Gimhae	291
Gimpo ↔ Sacheon	298	Jeju ↔ Daegu	330
Gimpo ↔ Yangyang	174	Jeju ↔ Muan	164
Gimpo ↔ Yeosu	311	Jeju ↔ Sacheon	227
Gimpo ↔ Ulsan	317	Jeju ↔ Yangyang	542
Gimpo ↔ Jeju	449	Jeju ↔ Yeosu	180
Gimpo ↔ Pohang Gyeongju	293	Jeju ↔ Ulsan	349
Gimpo ↔ Yangyang	320	Jeju ↔ Wonju	456
Gimhae ↔ Incheon	338	Jeju ↔ Incheon	438
Yangyang ↔ Gwangju	365	Jeju ↔ Cheongju	367
Incheon ↔ Daegu	264	Jeju ↔ Pohang Gyeongju	383

*Distance: one-way distance

항횡수를 조사하였으며, 이는 한국공항공사 및 인천 국제공항공사로부터 자료를 제공받았다. 운항노선은 총 26개이며, 항공정보포털시스템(Airportal)을 통해 국내선 노선별 운항거리 자료를 수집하였다. 국내선 노선별 운항거리는 표 2와 같으며(MOLIT, 2022), 김해 ↔ 광주, 김포 ↔ 무안, 대구 ↔ 양양, 울산 ↔ 김해, 인천 ↔ 울산, 포항경주 ↔ 인천 6개의 노선은 운항거리에 대한 자료 수집이 불가능하여 연구 범위에서 제외하였다. 연구 대상 기간은 2019~2021년이며, 항공기 기종은 국내선 21종을 바탕으로 하였다.

2.2.3 기종 및 노선별 배출계수 도출

항공기 순항 모드(Cruise mode)의 배출계수는 EEA Tier 3A (기종별 운항거리당 배출량) 기종별 배출계수를 적용하였다. EEA Guidebook 2019 부록(Annex 5)에 기종별 운항거리별 연료연소량(Fuel burn) 및 오염물질별 배출량이 제시되어 있으며, 이 데이터는 연료사용량을 기반으로 모델링된 추정치이다. 해당 정보를 국내 운항 기종 및 노선정보와 매핑하여 배출계수를 도출하였으며, 항공기 기종은 2019~2021년을 기준으로 국내선 운항 기종을 모두 포함하였다. 배출계수 산출방법은 크게 2단계의 절차로 구성되며, 우선 각 기종별로 운항거리(x)에 따른 오염물질별 배출량(y)의 상관식(선형 추세선)을 작성하였다. EEA Guidebook에서 제시하는 운항거리와 배출량 간의 상관계수(R)는 최소 0.9373(HC)~최대 1(SOx)로 선형 관계를 가짐을 확인하였다. 이에 따라 국내선 노선별 운항거리(x)에 따른 기종별, 국내선 노선별 배출계수(kg/운항횡수) 목록을 도출하였다. 노선별 운항거리는 항공정보포털시스템(Airportal)에 공개되어 있는 운항거리 자료를 활용하였다. 다만 운항거리는 항공통계 작성을 위한 노선별 대권거리 기준이므로 실제 이동거리와는 다소 차이가 있을 수 있다.

이착륙 모드와 마찬가지로 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 배출계수는 동일하게 구축하였다. VOCs 배출계수는 노선 거리에 따른 HC 배출량에 전환계수(Conversion factor)를 적용하여 추정하였다(EPA, 2009). 또한, 블랙카

Table 3. Emission factors of aircraft (LTO mode).

(Unit: kg/LTO)

Aircraft	CO	NOx	SOx	PM _{2.5}	VOCs
A21N	7.5548	16.7193	1.1195	0.0740	1.6371
A319	9.4860	7.4632	0.8067	0.0575	2.2660
A320	8.2450	11.2820	0.9559	0.0654	1.8915
A321	10.4807	30.9295	2.3603	0.3484	0.1616
A322	8.2450	11.2820	0.9559	0.0654	1.8915
A325	7.5548	16.7193	1.1195	0.0740	1.6371
A330	13.4830	27.8728	2.3827	0.1472	0.1804
A332	13.4830	27.8728	2.3827	0.1472	0.1804
A333	13.4830	27.8728	2.3827	0.1472	0.1804
A340	7.6527	32.2249	1.9752	0.0906	0.0830
A350	21.1897	35.3218	2.5393	0.1574	2.4251
A359	21.1897	35.3218	2.5393	0.1574	2.4251
A380	25.0254	35.4346	2.1849	0.1441	3.4655
ABF	12.8999	24.1474	1.9925	0.1097	1.2091
AN12F	3.7562	5.4372	0.8355	0.0429	13.1881
B38M	6.8721	13.4385	1.0689	0.0768	0.7751
B731	13.0345	7.1899	0.9176	0.0548	0.9663
B737	8.6481	7.6590	0.8446	0.0550	1.1656
B738	6.8721	13.4385	1.0689	0.0768	0.7751
B739	7.0665	12.2971	1.0319	0.0734	0.8356
B73F	6.8721	13.4385	1.0689	0.0768	0.7751
B744	12.6332	22.2251	1.9440	0.1058	1.1872
B747	12.6332	22.2251	1.9440	0.1058	1.1872
B74F	12.6332	22.2251	1.9440	0.1058	1.1872
B757	12.2515	14.9834	1.5959	0.1587	0.1923
B75F	12.2515	14.9834	1.5959	0.1587	0.1923
B763	14.4675	28.1945	2.0786	0.1063	1.3749
B767	14.4675	28.1945	2.0786	0.1063	1.3749
B76F	14.4675	28.1945	2.0786	0.1063	1.3749
B772	6.3050	27.9227	1.3657	0.0770	0.2611
B773	47.5421	69.7951	3.6200	0.2094	5.9018
B777	6.3050	27.9227	1.3657	0.0770	0.2611
B77F	6.3050	27.9227	1.3657	0.0770	0.2611
B787	10.1261	31.4226	2.1422	0.0932	0.3370
B788	10.4978	25.2467	2.0237	0.0881	0.3736
B789	10.1261	31.4226	2.1422	0.0932	0.3370
C300	8.2450	11.2820	0.9559	0.0654	1.8915
CCX	12.7164	8.3533	1.0496	0.1548	0.5558
CRJ	5.6856	4.2403	0.5589	0.0253	0.0297
CS3	8.2450	11.2820	0.9559	0.0654	1.8915
CS300	8.2450	11.2820	0.9559	0.0654	1.8915
E190	13.5978	5.6804	0.7098	0.0492	1.9728
IL7	91.7297	22.0388	3.2924	1.1656	22.5403
M11	6.0933	12.7239	1.0259	0.0570	0.5526
MD1F	6.0933	12.7239	1.0259	0.0570	0.5526
MD82	8.4877	8.4318	1.1539	0.0690	0.0000
MD83	8.0419	9.2080	1.1744	0.0734	0.0000
RRJ95B	9.2050	5.9015	0.7956	0.1159	0.3138
SU9	9.2050	5.9015	0.7956	0.1159	0.3138
T2F	4.2455	23.2958	1.5389	0.0724	0.3196

본(BC)은 PM 배출량에 분율 0.48을 적용하였다(EEA, 2019).

3. 연구 결과

3.1 운항 모드별(LTO, Cruise) 배출계수

항공기 이착륙 모드(LTO mode)의 배출계수 도출 결과는 표 3과 같으며, TSP 및 PM₁₀의 배출계수는 PM_{2.5}와 같다. VOCs의 배출계수는 HC 배출계수에 전환계수(CF=1.15)를 적용하였다.

항공기 순항 모드(Cruise mode)의 배출계수 도출 결과는 표 4와 같다. TSP 및 PM₁₀의 배출계수는 PM_{2.5}와 같으며, VOCs의 배출계수는 HC 배출계수에 전환계수(CF=1.15)를 적용하였다. x는 순항거리(km)를 의미하며, x에 국내선 노선에 따른 순항거리를 대입하여 계산함으로써 최종적으로 기종별, 순항거리별(노선별) 배출계수를 얻을 수 있다.

3.2 배출량 산정 결과

3.2.1 이착륙 모드(LTO mode) 배출량(국내·국제선)

항공기 이착륙 모드(LTO mode) 대기오염물질 배출량은 국내선 항공기 21기종, 국제선 53기종에 대해서 2019~2021년을 대상으로 공항별로 산정하였다. 대상항목은 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 휘발성유기화합물(VOCs), 초미세먼지(PM_{2.5}) 5종이다(표 5).

먼저 연간 이착륙횟수는 2019년 459,471회, 2020년 255,990회, 2021년 278,415회로 나타났다(그림 1). 2020년의 이착륙횟수는 COVID-19의 영향으로 인해 2019년 대비 2020년에 국내선이 11.8% (22,966회), 국제선이 68.3% (180,515회) 감소하여 총 44.3% (230,481회) 감소하였다. 반면에, 2021년의 이착륙횟수는 2020년 대비 국내선이 23.4% (40,307회) 증가하고 국제선이 21.4% (17,882회) 감소하여, 총 8.8% (22,425회) 증가하였다. 이는 COVID-19의 장기화로 해외여행 대

Table 4. Emission factors by flight distance (Cruise mode).

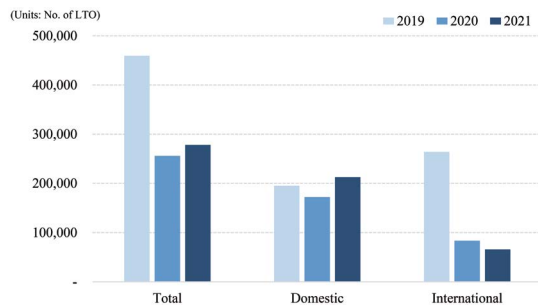
(Unit: kg/km)

Aircraft	CO	NOx	SOx	PM _{2.5}	HC
A220	0.0048x + 2.8147	0.0361x + 11.376	0.0023x + 0.2446	0.0004x + 0.0042	0.0011x + 0.5486
A21N	0.0040x + 1.3379	0.0516x + 17.914	0.0028x + 0.3456	0.0012x + 0.0672	0.0003x + 0.0032
A320	0.0048x + 2.8147	0.0361x + 11.376	0.0023x + 0.2446	0.0004x + 0.0042	0.0011x + 0.5486
A321	0.0040x + 1.3379	0.0516x + 17.914	0.0028x + 0.3456	0.0012x + 0.0672	0.0003x + 0.0032
A330	0.0049x + 10.331	0.0813x + 38.030	0.0051x + 0.7663	0.0010x + 0.0003	0.0001x + 1.1078
A332	0.0049x + 10.331	0.0813x + 38.030	0.0051x + 0.7663	0.0010x + 0.0003	0.0001x + 1.1078
A333	0.0054x + 8.4299	0.0741x + 37.449	0.0049x + 0.7431	0.0009x + 0.0277	0.0001x + 0.9387
B38M	0.0025x + 4.0767	0.0364x + 13.194	0.0024x + 0.3395	0.0003x + 0.0430	0.0006x + 0.3915
B737	0.0032x + 3.0749	0.0317x + 11.993	0.0022x + 0.2931	0.0003x + 0.0427	0.0005x + 0.3169
B738	0.0025x + 4.0767	0.0364x + 13.194	0.0024x + 0.3395	0.0003x + 0.0430	0.0006x + 0.3915
B739	0.0025x + 3.1759	0.0406x + 12.437	0.0025x + 0.2952	0.0003x + 0.0427	0.0006x + 0.2923
B744	0.0048x + 11.003	0.1384x + 23.412	0.0088x + 0.4365	0.0011x + 0.0916	0.0011x + 1.0002
B747	0.0048x + 11.003	0.1384x + 23.412	0.0088x + 0.4365	0.0011x + 0.0916	0.0011x + 1.0002
B763	0.0066x + 12.603	0.0752x + 20.966	0.0045x + 0.3895	0.0007x - 0.0237	0.0009x + 3.3094
B767	0.0066x + 12.603	0.0752x + 20.966	0.0045x + 0.3895	0.0007x - 0.0237	0.0009x + 3.3094
B772	0.0038x + 5.6562	0.1503x + 21.317	0.0058x - 0.0381	0.0010x - 0.1414	0.0006x + 0.1126
B773	0.0062x + 18.722	0.1840x + 33.675	0.0077x + 0.1600	0.0011x - 0.0779	0.0007x + 2.1590
B777	0.0038x + 5.6562	0.1503x + 21.317	0.0058x - 0.0381	0.0010x - 0.1414	0.0006x + 0.1126
B787	0.0060x + 2.2936	0.1237x + 32.685	0.0048x + 0.1492	0.0008x - 0.0109	0.00002x + 0.0142
C300	0.0048x + 2.8147	0.0361x + 11.376	0.0023x + 0.2446	0.0004x + 0.0042	0.0011x + 0.5486
CS300	0.0048x + 2.8147	0.0361x + 11.376	0.0023x + 0.2446	0.0004x + 0.0042	0.0011x + 0.5486

Table 5. Emissions from aircraft between 2019 and 2021 (LTO mode).

(Unit: tons)

Year	Classification	No. of LTO	CO	NOx	SOx	PM _{2.5}	VOCs
2019	Total	459,471	4,301	8,724	673	57	418
	Domestic	195,349	1,609	3,266	255	22	184
	International	264,122	2,692	5,458	418	34	234
2020	Total	255,990	2,309	4,888	374	31	226
	Domestic	172,383	1,425	2,955	231	21	157
	International	83,607	884	1,933	143	10	69
2021	Total	278,415	2,455	5,348	411	35	224
	Domestic	212,690	1,721	3,651	288	28	175
	International	65,725	733	1,697	123	7	49

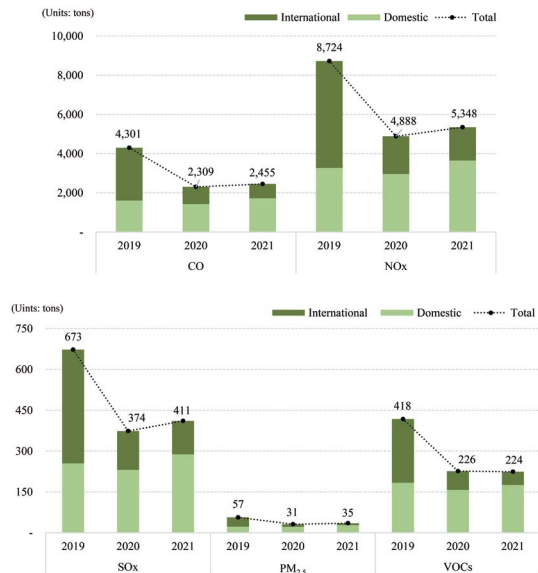
**Fig. 1.** Aircraft Landing and Take-Off (LTO) between 2019 and 2021.

신 국내여행 수요가 늘어 증가한 것으로 확인되었다 (MOLIT, 2022).

2019~2021년의 오염물질별 배출량 현황은 2020년에 모든 오염물질이 전년 대비 감소하였으며, 2021년의 경우 VOCs를 제외한 모든 오염물질이 전년 대비 증가하였다(그림 2). 2020년은 국제선 배출량 감소(최소 65.9% ~ 최대 79.1% 감소)가 주요 원인으로 나타났으며, 그중 3개 주요 기종의 이착륙횟수(LTO) 감소(80.3~85.9%)가 주요 영향을 끼친 것으로 나타났다. 또한, 2021년은 국내선 배출량 증가(6.3~11.7%)가 주요 원인으로 나타났으며, 그중 2개 주요 기종의 이착륙횟수(LTO) 증가(34.8~36.4%)가 영향이 큰 것으로 확인되었다.

3.2.2 순항 모드(Cruise mode) 배출량(국내선)

항공기 국내선 순항 모드(Cruise mode) 대기오염

**Fig. 2.** Emissions from aircraft between 2019 and 2021 (LTO mode).

물질 배출량은 2019~2021년 항공기 기종별, 노선별 운항횟수 및 노선별 운항거리 자료를 기반으로 산정하였다. 항공기 21종 및 국내선 26개 노선에 대해서 산정하였으며, 결과는 표 6과 같다.

먼저, 총 운항거리와 운항횟수를 살펴보면 2020년에 전년 대비 감소하였다가, 2021년에 전년 대비 증가하는 경향이 나타났다(그림 3). 2020년의 총 운항거리는 2019년 대비 12.4% (9,023,824 km), 운항횟수는 12.8% (25,268회) 감소하였으며, 이는 COVID-19의

Table 6. Emissions from aircraft between 2019 and 2021 (Cruise mode).

(Unit: tons)

Year	Total flight distance (km)	Flight operations (No.)	CO	NOx	SOx	PM _{2.5}	VOCs
2019	72,815,781	198,032	1,026	6,230	262	38	172
2020	63,791,957	172,764	865	5,363	227	35	139
2021	78,206,414	212,615	997	6,466	276	45	144

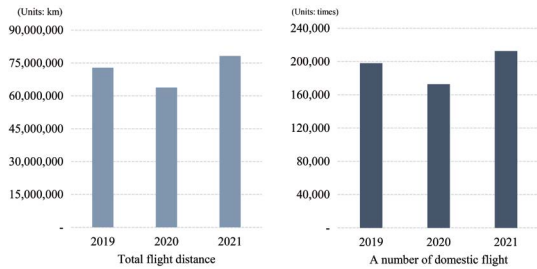


Fig. 3. Total flight distance (left) and a number of domestic flight (right) between 2019 and 2021.

영향이 주요 원인이었다. 한편, 2021년의 총 운항거리는 2020년 대비 22.6% (14,414,457 km), 운항횟수는 23.2% (39,851회) 증가하였으며, 이는 COVID-19의 장기화로 해외여행 대신 국내여행 수요가 늘어 증가한 것으로 확인되었다(MOLIT, 2022).

국내선 순항 모드 (Cruise mode) 배출량의 경우 2019~2021년 모두 NOx의 배출량이 가장 많게 나타났다(그림 4). 오염물질별 전년 대비 증감률은 총 운항거리 및 운항횟수의 연도별 변화추이와 마찬가지로 2020년에 감소하였다가 2021년에 증가하는 경향을 보였다. 2020년의 경우 CO 15.7% (161톤), NOx 13.9% (868톤), SOx 13.4% (35톤), PM_{2.5} 7.9% (3톤), VOCs 19.2% (33톤) 감소하였으며, 그중 김포 ↔ 제주, 김해 ↔ 인천, 제주 ↔ 김해 노선의 총 운항거리 및 운항횟수 감소(13.8~80.9%)가 큰 영향으로 나타났다. 또한, 2021년에는 CO 15.3% (132톤), NOx 20.6% (1,104톤), SOx 21.6% (49톤), PM_{2.5} 28.6% (10톤), VOCs 3.6% (5톤) 증가하였으며, 그중 김포 ↔ 김해, 김포 ↔ 제주, 제주 ↔ 청주 노선의 총 운항거리 및 운항횟수 증가(15.4~49.3%)가 주요 원인으로 확인되었다.

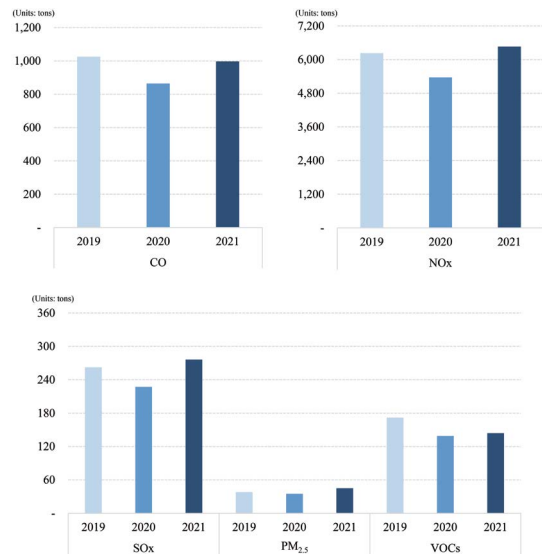


Fig. 4. Emissions from aircraft between 2019 and 2021 (Cruise mode).

3.2.3 운항 모드별(LTO, Cruise) 배출량 비교

항공기 이착륙 모드(LTO mode) 및 순항 모드(Cruise mode) 대기오염물질 배출량 산정 결과를 비교해 보면(표 5와 6), 항공기 엔진에서 발생하는 대기오염물질 배출은 NOx 및 CO가 주요한 항목이며, 특히 순항 모드(Cruise mode)에서의 NOx 배출이 이착륙 모드(LTO mode) 대비 약 2배 정도 높은 것을 확인하였다.

이와 같이, 항공기 배출량은 운항 모드(이착륙·순항)에 따라 배출 수준과 특성이 상이하므로, 이착륙 모드(LTO mode)와 같이 순항 모드(Cruise mode)도 별도의 배출량 관리가 필요할 것으로 사료된다.

2020년 항공기 운항 모드별(이착륙·순항), 기종별 배출량 산정 결과는 표 7과 표 8에 나타났다. 이는 모

Table 7. Emissions from aircraft domestic 2020 (LTO mode).

(Unit: kg)

Aircraft	CO	SOx	Aircraft	NOx	Aircraft	PM _{2.5}	Aircraft	VOCs
A9	561,413	87,322	A9	1,097,847	A3	10,574	A9	63,318
A3	318,099	71,638	A3	938,742	A9	6,274	A2	36,240
A2	157,974	18,315	A2	216,163	A2	1,253	A18	28,603
A18	124,681	14,455	A13	186,648	A18	989	A13	9,102
A13	95,775	13,761	A18	170,6070	A10	765	A10	8,708
Etc.	167,014	25,433	Etc.	344,635	Etc.	1,590	Etc.	10,995
Total	1,424,956	230,924	Total	2,954,642	Total	21,445	Total	156,966

Table 8. Emissions from aircraft domestic 2020 (Cruise mode).

(Unit: kg)

Aircraft	CO	Aircraft	SOx	NOx	Aircraft	PM _{2.5}	Aircraft	VOCs
A9	407,239	A9	99,686	2,167,500	A9	12,507	A9	57,395
A13	103,022	A3	42,060	1,125,783	A3	11,486	A13	28,267
A3	85,728	A2	19,296	448,183	A2	2,617	A2	20,183
A2	84,699	A13	15,935	362,003	A18	2,073	A18	15,895
A18	66,675	A18	15,252	353,364	A13	1,921	A10	6,295
Etc.	117,300	Etc.	34,899	905,773	Etc.	4,629	Etc.	11,167
Total	864,663	Total	227,128	5,362,606	Total	35,232	Total	139,202

두 국내선에 대한 배출량이고 기종명은 임의로 부여하였다. 이착륙 배출량은 PM_{2.5}를 제외한 나머지 물질의 경우 A9 기종이 가장 많았으며, 그 다음으로 A3, A2 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다. PM_{2.5}도 유사하게 A3, A9 순으로 배출량의 비중이 많았다. 배출량이 큰 2개 기종이 오염물질별로 전체 배출량의 61.7 % (CO)~78.6 % (PM_{2.5})의 비중을 차지했다. 순항 배출량 또한 A9, A3 또는 A13 기종 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다. 그리고 각 오염물질별로 배출량이 가장 큰 2개 기종의 배출량이 전체 배출량의 59.0% (CO)~68.1 % (PM_{2.5})를 차지했다. 기종별 배출량을 비교한 결과, 운항 모드(이착륙·순항)와는 관계 없이 운항실적이 많은 기종이 오염물질을 많이 배출하는 것을 확인하였다. 또한, 기종별 이착륙 배출량과 순항 배출량의 차이도 약 2배 수준으로 기종별로 균일하게 나타났다.

다만, 항공기 이착륙과 순항 배출량은 모두 산정대상 항공기의 엔진제원을 기반으로 배출량을 산정해야 하나, 국내 항공사 정보 수집의 한계로 국외(미국, 유

럽) 정보를 적용하였다. 이로 인한 배출량의 불확도가 존재할 수 있어, 향후 국내 항공사 정보의 수집을 통해 더 정확한 배출량 산정이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 영공에서의 항공기 순항 모드(Cruise mode) 배출량 산정방안 마련을 위해 연간 운항정보와 EEA 배출계수를 기반으로 국내선 노선별·기종별 순항 모드(Cruise mode) 배출계수를 도출하였다. 도출된 배출계수를 기반으로 최근 3년간(2019~2021) 배출량을 산정한 결과, NOx 기준 이착륙 모드(LTO mode) 배출량의 2배가 넘는 수준으로 확인되었다. COVID-19 영향을 받기 전인 2019년 배출량을 기준으로, 아직 산정하지 못한 국제선 순항 모드(Cruise mode) 배출량을 포함한다면 연간 항공기 순항 모드의 NOx 배출량은 연간 1.5만 톤을 넘어설 것으로 추정된다. 전 세계적으로 급격하게 증가하는 항공수요

와 앞으로의 COVID-19 영향 해소 가능성을 고려하면, 국내 영공에서 배출되는 항공기 대기오염물질 배출량 관리는 장기적으로 필수적인 과제라고 사료된다. 따라서, 우선적으로 국제선의 국내 영공 중 순항 배출량을 추가로 분석하여 항공기 배출 현황을 정확하게 파악해야 한다. 장기적으로 도출된 배출량을 기반으로 대기 모델링 등을 통해 기후 및 대기질에 항공기 배출량이 미치는 영향을 분석한다면, 항공 부문의 기후 대기오염 방지 대책 수립의 과학적 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Barrett, S.R.H., Britter, R.E., Waitz, I.A. (2010) Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions, *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7736-7742. <https://doi.org/10.1021/es101325r>
- Cui, Q., Chen, B., Lei, Y.L. (2022) Accounting for the aircraft emissions of China's domestic routes during 2014-2019, *Nature, Scientific Data*, 9, 383. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01494-0>
- Cui, Q., Lei, Y., Li, Y. (2023) Protocol to calculate aircraft emissions for international air routes in South America, *STAR Protocols*, 4, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.xpro.2022.101952>
- Eurocontrol (2018) European Aviation Fuel burn and Emissions Inventory System (FEIS) for the European Environment Agency. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/201807-european-aviation-fuel-burn-emissions-system-eea-v2.pdf> (published on Jul. 20, 2018).
- European Environment Agency (EEA) (2019) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019-Technical guidance to prepare national emission inventories, Part B: sectoral guidance chapters, 1. Energy, 1.A Combustion, 1.A.3.a Aviation 2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation/view> (published on Oct. 17, 2019).
- European Environment Agency (EEA) (2023) European Union emission inventory report 1990-2021 - Under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021> (published on Jun. 28, 2023).
- Federal Aviation Administration (FAA) (2008) Emission and Dispersion Modeling System (EDMS), version 5.1 (created on Sep. 19, 2008).
- Federal Aviation Administration (FAA) (2017) AEDT Database Description Document, Fleet Database, version 3.24.4 (created on Sep. 20, 2017).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/>
- International Civil Aviation Organization (ICAO) (2020) Airport Air Quality Manual Second edition. https://www.icao.int/publications/documents/9889_cons_en.pdf
- Masiol, M., Harrison, R.M. (2014) Aircraft engine exhaust emissions and other airport related contributions to ambient air pollution: a review, *Atmospheric Environment*, 95, 409-455. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022) Aviation Statistics Airport distance. <https://www.airportal.go.kr/knowledge/statsnew/data/airportDistance.jsp>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Civil Aviation Association (MOLIT, KCA) (2022) Aviation Market Trend & Analysis. <https://www.airportal.go.kr/knowledge/analysis/index.jsp?pg=07> (published on Feb. 28, 2022).
- Moore, R., Thornhill, K., Weinzierl, B. *et al.* (2017) Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions, *Nature* 543, 411-415. <https://doi.org/10.1038/nature21420>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2019) 2019 National Air Pollutants Emission. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=7&articleId=145&boardId=7&menuId=48¤tPageNo=1>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) Handbook of estimation methods for national air pollutant emissions (V). <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=8&articleId=238&boardId=8&menuId=49¤tPageNo=1>
- Turgut, E.T., Usanmaz, O. (2017) An assessment of cruise NOx emissions of short-haul commercial flights, *Atmospheric Environment*, 171, 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.070>

10.1016/j.atmosenv.2017.10.013

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2009) Recommended Best Practice for Quantifying Speciated Organic Gas Emissions from Aircraft Equipped with Turbofan, Turbojet, and Turboprop Engines, Version 1.0. <https://www.nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1003YX3.PDF?Dockey=P1003YX3.PDF> (created on May 2009).

Vennam, L.P., Vizuete, W., Talgo, K., Omary, M., Binkowski, F.S., Xing, J., Mathur, R., Arunachalam, S. (2017) Modeled Full-Flight Aircraft Emissions Impact on Air Quality and Their Sensitivity to Grid Resolution, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 13472-13494. <https://doi.org/10.1002/2017JD026598>

Authors Information

조현정 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)
(hj9589@korea.kr)

박윤서 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)
(pys1010@korea.kr)

박 민 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)
(parkmin@korea.kr)

김선미 ((주)위더인 선임)
(happysun727@naver.com)

유 철 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
(s7424yoo@korea.kr)