



항공기 내 실내공기질에 관한 고찰: 이동의 증가와 건강에 미치는 영향 및 블리드에어의 영향

함승헌*

가천대학교 의과대학 길병원 직업환경의학과

Indoor Air Quality in Aircraft: The Impact of Increased Mobility and Health Effects and the Influence of Bleed Air

Seunghon Ham*

Department of Occupational and Environmental Medicine, Gil Medical Center, College of Medicine, Gachon University

ABSTRACT

Background: With the rise in global mobility, aircraft indoor air quality has become a significant public health concern. This study focuses on the health implications of increased travel and bleed air—air drawn from aircraft engines for cabin pressurization and air conditioning.

Objectives: This research aims to review the potential health effects related to exposure to aircraft cabin air, particularly the effects of bleed air during fume events.

Methods: We conducted a literature review of existing studies on aircraft cabin air quality. We focused on both the immediate and health effects of exposure to cabin air, particularly those related to bleed air contaminants.

Results: The review found a possible link between exposure to aircraft cabin air and certain health issues, especially in cabin crew and frequent flyers. There was an increased incidence of respiratory and neurological symptoms related to bleed air exposure. However, the cumulative health effects of frequent air travel remain inconclusive due to limited data.

Conclusions: This study highlights the need for improving air quality in aircraft to protect public health. While further research is needed to understand the cumulative effects of frequent air travel, the reduction of exposure to bleed air contaminants should be a priority. These findings underline the need for regulatory changes and technological improvements in aircraft cabin air quality.

Key words: Bleed air, indoor air quality, exposure, health effect, fume event

Received June 13, 2023

Revised June 21, 2023

Accepted June 23, 2023

Highlights:

- This study focuses on the health implications of increased global mobility and bleed air in aircraft.
- The research reviews the potential health effects related to exposure to aircraft cabin air.
- Results show a possible link between exposure to aircraft cabin air and certain health issues.
- The study calls for improving air quality in aircraft and reducing exposure to bleed air contaminants.
- Further research is needed to understand the cumulative effects of frequent air travel.

*Corresponding author:

Department of Occupational and Environmental Medicine, Gil Medical Center, College of Medicine, Gachon University, 38-13 Dokjeom-ro, 3 beon-gil, Namdong-gu, Incheon 21656, Republic of Korea

Tel: +82-32-458-2634

Fax: +82-0504-439-9025

E-mail: shham@gachon.ac.kr



I. 서론

항공기는 교통수단 중 거리가 가장 먼 장소까지 사람이나 화물을 수송할 수 있다. 코로나 19 팬데믹으로 인하여 국가 간의 이동이 제한되면서 항공기 운항 횟수가 급격히 낮아졌다가 최근 들어 코로나 19 팬데믹 이전인 2019년 항공기 운항 상황 수준으로 다시 회복하고 있는 추세이다.¹⁾

항공기는 고도 9,500 m에서 12,500 m 상공에서 순항한다. 외부의 공기는 온도와 기압이 낮기 때문에 순항 중 외부의 공기는 사람이 건강하게 생활하기 어려운 환경이다. 따라서 항공기 실내의 환경은 탑승객들이 편안하게 생활할 수 있도록 관리해야 한다. 항공기에는 기압, 온도를 적절하게 유지하고 환기가 잘 될 수 있도록 환경 관리 시스템(Environmental Control System)이 갖추어져 있고, 기술이 발전하면서 항공기 내의 실내공기질에 대한 승객과 승무원들의 기대수준이 높아지고 있다.²⁾

이렇게 항공기 실내는 특성상 정해진 공간, 인원, 시간 동안 제한적인 생활을 하는 공간이기 때문에 실내공기질에 대한 관리는 보건학적 관점에서 중요하다. 실내공기질에 영향을 줄 수 있는 발생원은 개인의 위생상태, 객실 내 활동, 기내에 반입된 수하물, 항공 장비 및 자재, 항공기 엔진에서부터 유입되는 블리드에어(Bleed air) 등이 있다.

그 중 블리드에어는 현대 항공기가 주로 사용하는 터보제트 엔진의 압축기에서 블리드에어를 이용하여 기내의 압력을 유지할 때 필요하다.³⁾ 보잉사의 최신 기종인 787 모델을 제외하고는 모두 블리드에어를 사용한다.⁴⁾ 기내의 압력을 유지하기 위하여 일반적으로 50%의 HEPA(HEPA)필터를 통해 여과된 재순환공기와 50%의 블리드에어, 외부공기를 사용한다. 그러나 밀착부가 마모되었거나 윤활유가 과하게 담길 경우 윤활유에 의한 블리드에어 오염이 발생하여 기내에 흡(fume) 또는 연기(smoke) 형태로 공급되고 이를 흡 사건(Fume event)라고 정의한다.⁵⁾ 또한 항공기 뒤쪽에 장착된 보조엔진(Auxiliary power unit)으로부터 기내로 들어오기도 한다.³⁾ 그러나 HEPA필터는 입자상물질은 여과하지만 가스상물질의 여과는 불가능하기 때문에 항공기에 탑승한 승객과 승무원은 가스상물질에 노출될 가능성이 있다.⁶⁻⁹⁾

항공기에서 흡 사건이 크게 발생하는 사례는 드문 일이지만 한번 발생하게 되면 큰 사고로 이어질 수 있고 작게는 미량이라도 유해물질에 노출될 수 있는 불특정 다수의 승객이 있으며, 순간적으로 노출될 수 있는 블리드에어 내의 오염의 측정이 어렵고, 항공기라는 특성은 노출평가를 하기에 어려운 환경이라 연구가 부족한 실정이다.⁴⁾ 1950년대 처음으로 군사용 비행기에서 보고가 되었고,¹⁰⁾ 고성능 터빈엔진에 합성 윤활유를 사용하고나서 부터는 흡 사건에 대한 다양한 건강상 영향이 보고되었다.¹¹⁻¹⁸⁾

따라서 이 연구의 목적은 항공기 내의 실내공기질에 영향을

주는 블리드에어에 대한 보건학적 고찰을 하는 것이다.

II. 재료 및 방법

이 연구는 문헌고찰을 통하여 이루어졌다. 블리드에어(Bleed air)와 관련된 논문 및 보고서 중 일부를 정리하였고 문헌검색은 Pubmed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)를 이용했다. 주요 검색 용어는 “bleed air”, “health effect”, “exposure”, “Aircraft”, “Fume event” 등으로 개별 혹은 조합하여 검색하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 항공기 실내공기질에 영향을 주는 발생원

항공기는 외부와 단절된 공간으로 짧게는 1시간 길게는 10시간이 넘는 시간동안 제한된 공간과 사람, 자원과 함께 이동을 해야 하는 특수성을 가지고 있다. 외부의 환경이 우리가 생활하기에 불가능할 정도로 낮은 온도와 기압이기 때문에 항공기의 기술로 항공기 실내의 환경을 조성해야 한다.

사람이 원인이 되는 경우가 있다. 감염병에 걸린 사람과 같이 개인의 위생상태가 실내공기질에 영향을 줄 수도 있고, 향수 등도 항공기 실내공기질에 영향을 줄 수 있다. 객실 내 활동의 경우 음식의 간단한 조리, 화장실 악취, 승객의 이동에 의한 비산 먼지, 현재는 금지가 되어 있지만 과거에는 항공기 내에서의 흡연 등이 해당된다. 항공기 내에 이미 설치된 의자나 카페트 등에서 발생할 수 있는 입자상물질, 가스상물질 등이 있다. 또한 비행기 특성상 상공에서 화재가 날 경우를 대비하여 난연제(flame retardant)를 이용한 자재가 사용되고 있어서 건강에 영향을 줄 수 있는 PBDE (polybrominated diphenyl ethers)와 같은 난연제에 포함된 화학물질이 검출되기도 한다.¹⁹⁾

2. 블리드에어와 건강상 영향

2.1. 블리드에어의 정의와 실내공기오염

블리드에어는 항공기에 필수적인 요소로 항공기가 주로 사용하는 터보제트 엔진의 압축기에서 블리드에어를 이용하여 기내의 압력을 유지할 때 필요하고 그 밖에도 엔진 내부의 냉각 및 안정화에 사용되어 고온과 고압의 조건 하에서 엔진이 정상적으로 작동할 수 있게 해주는 등 다양한 목적으로 사용되고 있다.

블리드에어에 의한 실내공기오염은 입자상물질과 가스상물질로 나누어서 볼 수 있다. 블리드에어가 윤활유에 의해 오염이 되면 의미 있는 수준의 입자상물질이 발생하는 것을 확인하였다. 특히 50~70 nm 크기의 입자가 가장 많이 검출되었

다.²⁰⁾ 일반적인 사무실에서는 초미세입자(Ultrafine Particle, UFP)가 5,000개/cm³의 농도로 존재하는데 흡 사건 또는 냄새가 날 때 초미세입자를 측정된 결과 200,000개/cm³부터 최고 2,800,000개/cm³까지의 농도가 존재했다고 보고하였다.²¹⁾ 가스상물질은 일산화탄소,²²⁻²⁵⁾ 휘발성유기화합물²⁶⁻²⁹⁾ 등이 검출된 연구가 있다. 보잉 767, 747, 757, 767, 에어버스 320, 340의 경우 일산화탄소의 경우 조종실에서 최대 4.8 ppm, 객실에서 3.0 ppm이 검출되었고, 보잉 787의 경우 조종실에서 0.6 ppm, 객실에서 1.6 ppm이 검출되기도 하였다.²²⁾ Spengler 등³⁰⁾의 연구에 따르면 83대의 항공기(에어버스 2기종, 보잉 4기종) 내에서 측정을 하였을 때 항공기 중 91%에서 톨루엔이 검출되었고, 75%에서 m-, p- 자일렌이, 50%에서 75% 벤젠, 에틸벤젠, o-자일렌, 메틸렌클로라이드, 헥산, 스티렌, 벤젠 등이 검출되었다. 톨루엔의 농도는 중간값(median)이 2,783 ng/m³이었고 최댓값이 30,028 ng/m³이었고, 벤젠의 농도는 중간값이 876 ng/m³, 최댓값이 3,286 ng/m³이었다.

2.2. 건강상 영향

흡 사건으로 보고되는 경우는 드물기 때문에 일반적으로 항공기 승무원이나 승객들이 호소하는 건강상 영향에 대하여 정리를 하였다. 항공기 탑승과 관련된 건강상 영향³¹⁾은 다양하게 제기되고 있다. 주로 신경독성(Neurotoxic), 신경심리학적(Neuropsychological), 소화기(Gastro-intestinal), 호흡기(Respiratory), 심장(Cardiovascular), 자극(Irritation), 일반증상(General) 등으로 구분하고 있으며 단기 영향(Short term effect, 몇 시간에서 몇 일)과 장기 영향(Long term effect, 몇 달에서 몇 년)으로 나눌 수 있다(Table 1).

신경독성, 신경심리학적 증상 증 단기 영향은 시야가 흐릿해 지거나 관모양(터널) 시야, 방향 감각 상실, 떨림과 경련, 평형 감각 상실과 현기증, 경련, 의식 상실, 마비(감각 이상), 기억장애, 두통, 현기증, 혼란, 취해 있는 느낌, 장기 영향은 감각상실(손가락, 입술, 사지), 건망증, 협응력 상실, 심한 두통, 평형 감각 상실과 현기증, 수면 장애 등이 보고되었다.^{16,32-39)} 위장관 부분에 대해서는 구토, 침 흘림, 설사 등이 보고되었고,^{15,32,40)} 호흡기 부분에서는 단기 영향으로 기침, 호흡곤란(숨 가쁨), 가슴 답답함, 산소를 필요로 하는 호흡부전, 장기 영향으로는 단기 영향과 동시에 상기도 감염에 대한 취약성이 추가로 보고되었다.^{8,12,14,17,41-43)} 심혈관과 관련해서는 심장 박동수 증가 및 두근거림, 가슴 통증 등이 보고되었고, 자극에 있어서는 눈, 코, 상기도 자극이 보고된 바 있다.^{15,39)} 일반적으로 발생할 수 있는 증상으로는 쇠약 및 피로(만성피로로 이어짐), 탈진, 홍조, 관절 통증, 근육 약화 및 통증이 보고되었다.¹⁵⁾

3. 대안 및 향후 연구

항공기는 이동수단으로서 앞으로 더욱 활용성이 높아질 가능성이 높은 교통수단이다. 즉, 많은 사람들이 이용하게 될 것이고, 이에 따라 항공기의 실내공기질에 대한 연구는 계속되어야 한다.

제도적으로는 항공기 관리를 위한 실내공기질 지침에 대한 연구가 시작되어야 하고, 건강상 영향에 대한 연구를 통하여 과거 노출에 대한 연구 및 현재 실내공기질에 대한 평가방법에 대한 개발이 필요하다.

기술적으로는 보잉 787과 같이 블리드에어의 역할인 객실내 난방과 압력 유지를 할 수 있는 전기시스템을 도입하여 항공기

Table 1. Reported aerotoxic syndrome: short and long term symptoms in aircrew and passenger³¹⁾

Symptoms	Short term effect	Long term effect	Ref.
Neurotoxic or neuropsychological	Blurred or tunnel vision, disorientation, shaking and tremors, loss of balance and vertigo, seizures, loss of consciousness, paresthesia, memory impairment, headache, light-headedness, dizziness, confusion and feeling intoxicated	Numbness (fingers, lips, limbs), paresthesia, memory impairment, forgetfulness, lack of coordination, severe headaches, dizziness balance, sleep disorders	16,32-38)
Gastro-intestinal	Nausea, vomiting	Salivation, nausea, vomiting, diarrhea	15,32,40)
Respiratory	Cough, breathing difficulties (shortness of breath), tightness in chest, respiratory failure requiring oxygen	Breathing difficulties (shortness of breath), tightness in chest, respiratory failure, susceptibility to upper respiratory tract infections	8,12,14,17,41-43)
Cardiovascular	Increased heart rate and palpitations	Chest pain, increased heart rate and palpitations	15)
Irritation	Eyes, nose and upper airways	Eyes, nose, and upper airways	39)
General	-	Weakness and fatigue (leading to chronic fatigue), exhaustion, hot flashes, joint pain, muscle weakness and pain	15)

내로 블리드에어가 유입되지 않도록 원천적으로 발생원을 제거하는 것이 중요하다.⁴⁴⁾ 이와 같은 기술들이 항공기에 도입이 된다면 블리드에어 노출을 줄일 수 있다. 또한 항공기 실내공기질을 향상시킬 수 있는 방법들이 지속적으로 개발되어야 한다. 또한 항공기 승무원이나 승객들에게 이와 같은 사실을 알리고 교육하여 현재 상황을 파악한 후에 항공기를 이용할 수 있도록 알 권리를 보장해주어야 한다.

추가로 항공기 실내공기질에서 중요해지고 있는 것이 생물학적 유해인자인데 코로나 19 유행을 겪으면서 급격히 감소하였던 항공 여행이 증가세로 전환되면서 세계인들의 이동이 많아졌고, 이로 인한 감염병의 전파의 우려가 대두되고 있다. 그렇기 때문에 항공기에서의 실내공기질, 검역을 통한 원천적인 발생원의 제거 등에 대한 기술적 제도적 연구가 필요하다.

IV. 결 론

항공기의 실내공기질에 영향을 주는 블리드에어 오염과 건강상 영향에 대한 고찰을 하였다. 블리드에어는 항공기 운항을 위해서 대부분의 항공기에서 필요한 요소이지만 관리상 문제 또는 우연한 사고로 인하여 오염된 블리드에어가 항공기 실내로 유입되는 사건이 발생하거나 승객이나 승무원들이 흡입하여 건강상 영향을 호소하거나 불쾌감을 주는 사례가 지속적으로 보고되고 있는 만큼 항공기 실내공기질 기준 마련과 주기적인 측정제도를 마련하고 기술적인 발전을 통하여 블리드에어의 발생원을 원천적으로 제거하는 등의 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

This work was supported by the Basic Science Research Program of the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (2017R1-C1B1002717).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Flightradar24. Available: <https://www.flightradar24.com/data/statistics> [accessed 16 June 2023].
2. Mayer F, Fox R, Space D, Bezold A, Wargocki P. Indoor air quality in commercial air transportation. In: Zhang Y, Hopke PK, Mandin C. editors. Handbook of indoor air quality. Singapore: Springer; 2022. p.2057-2094.
3. Chowdhury SH, Ali F, Jennions IK. A review of aircraft environmental control system simulation and diagnostics. *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng*. 2023. doi:10.1177/09544100231154441. [Epub ahead of print]
4. Day GA. Aircraft cabin bleed air contaminants: a review. Oklahoma City (OK): Federal Aviation Administration; 2015 Nov. Report No.: DOT/FAA/AM-15/20.
5. Amiri SN, Jones B, Mohan KR, Weisel CP, Mann G, Roth J. Study of aldehydes, carbon monoxide, and particulate contaminants generated in bleed-air simulator. *J Aircr*. 2017; 54(4): 1364-1374.
6. Flitney RK. A description of the types of high speed rotary shaft seals in gas turbine engines and the implications for cabin air quality. *J Biol Phys Chem*. 2014; 14(4): 85-89.
7. Howard CV, Johnson DW, Morton J, Michaelis S, Supplee D, Burdon J, et al. Is a cumulative exposure to a background aerosol of nanoparticles part of the causal mechanism of aerotoxic syndrome? *Nanomed Nanosci Res*. 2018; 3(1): JNAN-139.
8. Howard DA. Base flow. In: Richardson D, Castree N, Goodchild MF, Kobayashi AL, Liu W, Marston RA. editors. International encyclopedia of geography: people, the earth, environment and technology. Chichester: Wiley-Blackwell; 2017. p.1-3.
9. Michaelis S. Aircraft clean air requirements using bleed air systems. *Engineering*. 2018; 10(4): 142-172.
10. Loomis TA, Krop S. Cabin air contamination in RB-57A aircraft. Gunpowder (MD): Army Chemical Center; 1955.
11. Coxon LW. Delayed cognitive impairment and pilot incapacitation following contaminated air inhalation. *J Biol Phys Chem*. 2014; 14(4): 107-110.
12. Hageman G, Pal TM, Nihom J, MackenzieRoss SJ, van den Berg M. Three patients with probable aerotoxic syndrome. *Clin Toxicol (Phila)*. 2020; 58(2): 139-142.
13. Heutelbeck AR, Bornemann C, Lange M, Seeckts A, Müller MM. Acetylcholinesterase and neuropathy target esterase activities in 11 cases of symptomatic flight crew members after fume events. *J Toxicol Environ Health A*. 2016; 79(22-23): 1050-1056.
14. Ross SM. Cognitive function following exposure to contaminated air on commercial aircraft: a case series of 27 pilots seen for clinical purposes. *J Nutr Environ Med*. 2008; 17(2): 111-126.
15. Michaelis S, Burdon J, Howard CV, World Health Organization. Aerotoxic syndrome: a new occupational disease? *Public Health Panor*. 2017; 03(02): 198-211.
16. Reneman L, Schagen SB, Mulder M, Mutsaerts HJ, Hageman G, de Ruiter MB. Cognitive impairment and associated loss in brain white microstructure in aircrew members exposed to engine oil fumes. *Brain Imaging Behav*. 2016; 10(2): 437-444.
17. Roig J, Domingo C, Burdon J, Michaelis S. Irritant-induced asthma caused by aerotoxic syndrome. *Lung*. 2021; 199(2): 165-170.
18. Winder C, Balouet JC. Aircrew exposure to chemicals in aircraft: symptoms of irritation and toxicity. *J Occup Health Saf Aust N Z*. 2001; 17(5): 471-483.
19. Allen JG, Stapleton HM, Vallarino J, McNeely E, McClean MD, Harrad SJ, et al. Exposure to flame retardant chemicals on commercial airplanes. *Environ Health*. 2013; 12: 17.
20. Jones BW, Amiri SN, Roth JW, Hosni MH. The nature of particu-

- lates in aircraft bleed air resulting from oil contamination. Paper presented at: 2017 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Winter Conference; 2017 Jan 28-Feb 1; Las Vegas, NV, USA. Peachtree Corners (GA): ASHRAE, 2017. p. LV-17-C046.
21. European Commission. Belgium-Brussels: investigation of the quality level of the air inside the cabin of large transport aeroplanes and its health implication. Available: <https://ted.europa.eu/udl?uri=TED:NOTICE:294886-2016:TEXT:EN:HTML> [accessed 16 June 2023].
 22. Schuchardt S, Bitsch A, Koch W, Rosenberger W. CAQ - preliminary cabin air quality measurement campaign: EASA_REP_RESEA_2014_4. Cologne: European Union Aviation Safety Agency; 2017.
 23. Crump D, Harrison P, Walton C. Aircraft cabin air sampling study. Cranfield: Cranfield University; 2011.
 24. van Netten C, Leung V. Hydraulic fluids and jet engine oil: pyrolysis and aircraft air quality. *Arch Environ Health*. 2001; 56(2): 181-186.
 25. Anderson J. A counterpoint to key misperceptions about exposure to aviation engine oil and hydraulic fluid fumes. *J Biol Phys Chem*. 2014; 14(4): 122-132.
 26. Chen R, Fang L, Liu J, Herbig B, Norrefeldt V, Mayer F, et al. Cabin air quality on non-smoking commercial flights: a review of published data on airborne pollutants. *Indoor Air*. 2021; 31(4): 926-957.
 27. Michaelis S. Health and flight safety implications from exposure to contaminated air in aircraft [dissertation]. [Sydney]: University of New South Wales; 2010.
 28. Fox RB. Assessing aircraft supply air to recommend compounds for timely warning of contamination [dissertation]. [Scottsdale]: Northcentral University; 2012.
 29. Hageman G, Ross SJM, Nihom J, van der Laan G. Aerotoxic syndrome: a new occupational disease caused by contaminated cabin air? *Adv Neurotoxicol*. 2022; 7: 77-132.
 30. Spengler JD, Vallarino J, McNeely E, Estephan H. In-flight/onboard monitoring: ACER's component for ASHRAE 1262, part 2. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration; 2012 Apr. Report No.: RITE-ACER-CoE-2012-6.
 31. Winder C. Hazardous chemicals on jet aircraft: case study – jet engine oils and aerotoxic syndrome. *Curr Top Toxicol*. 2006; 3: 65-88.
 32. Rayman RB, McNaughton GB. Smoke/fumes in the cockpit. *Aviat Space Environ Med*. 1983; 54(8): 738-740.
 33. Montgomery MR, Wier GT, Zieve FJ, Anders MW. Human intoxication following inhalation exposure to synthetic jet lubricating oil. *Clin Toxicol*. 1977; 11(4): 423-426.
 34. Abou-Donia MB, Abou-Donia MM, ElMasry EM, Monro JA, Mulder MF. Autoantibodies to nervous system-specific proteins are elevated in sera of flight crew members: biomarkers for nervous system injury. *J Toxicol Environ Health A*. 2013; 76(6): 363-380.
 35. Hageman G, Pal TM, Nihom J, Mackenzie Ross SJ, van den Berg M. Aerotoxic syndrome, discussion of possible diagnostic criteria. *Clin Toxicol (Phila)*. 2020; 58(5): 414-416.
 36. O'Connor L, Boland M. A series of three aircraft emergency public health alerts at an international airport over a six week period due to suspected contaminated cabin air. *J Environ Sci Public Health*. 2020; 4(3): 296-303.
 37. Heuser G, Aguilera O, Heuser S, Gordon R. Clinical evaluation of flight attendants after exposure to fumes in cabin air. *J Occup Health Saf Aust N Z*. 2005; 21(5): 455-459.
 38. van Netten C. Air quality and health effects associated with the operation of BAe 146-200 aircraft. *Appl Occup Environ Hyg*. 1998; 13(10): 733-739.
 39. Burdon J, Budnik LT, Baur X, Hageman G, Howard CV, Roig J, et al. Health consequences of exposure to aircraft contaminated air and fume events: a narrative review and medical protocol for the investigation of exposed aircrew and passengers. *Environ Health*. 2023; 22(1): 43.
 40. Tashkin DP, Coulson AH, Simmons MS, Spivey GH. Respiratory symptoms of flight attendants during high-altitude flight: possible relation to cabin ozone exposure. *Int Arch Occup Environ Health*. 1983; 52(2): 117-137.
 41. Murawski JTL. Case study: analysis of reported contaminated air events at one major U.S. Airline in 2009-10. Paper presented at: 41st International Conference on Environmental Systems; 2011 Jul 17-21; Portland, OR, USA. Reston (VA): American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011. p. AIAA2011-5089.
 42. Bachman G, Santos C, Weiland J, Hon S, Lopez G. Aerotoxic syndrome: fuming about fumes while flying the friendly skies. *Clin Toxicol*. 2017; 55(7): 773-774.
 43. Harrison R, Murawski J, McNeely E, Guerriero J, Milton D. Exposure to aircraft bleed air contaminants among airline workers: a guide for health care providers. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration; 2009.
 44. Schuchardt S, Koch W, Rosenberger W. Cabin air quality – quantitative comparison of volatile air contaminants at different flight phases during 177 commercial flights. *Build Environ*. 2019; 148: 498-507.

〈저자정보〉

함승현(교수)