

# LTO 과정 중 항공기 미세먼지 발생 및 분포에 대한 수치해석적 연구

김고은\* · 김석우\* · 이승배\*\*

Simulation of micro-dust concentration emitted by aircraft jet engine  
during LTO cycle

Goeun Kim\*, Seokwoo Kim\*, Seungbae Lee\*\*

*Key Words* : Micro-dust (미세먼지), Aircraft Engine (항공기 엔진), CFD (전산유체역학), LES (대격자와동모델)

## 1. 서 론

미세먼지의 발생이 일상화되고 지속 강도가 높아지면서 시민들이 겪는 고통과 건강에 대한 염려는 갈수록 커지고 있다. 정부는 올해 2월 15일 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(미세먼지법)'을 시행하면서 고농도 미세먼지 발생 시 자동차운행제한, 배출시설 가동률 조정, 휴교·휴업, 시차 출퇴근 등 비상저감조치를 하고는 있으나, 배출원별 미세먼지 생성-전달-소멸에 대한 근본적 대책 한계와 선제적 노력의 부족으로 어려움을 겪고 있다. 특히 총량적 관점에서 인천지역 미세먼지의 커다란 원인 중 하나인 영종도 국제공항 이착륙시의 항공기 제트엔진 배기가스와 항공 관리 시설 및 이동차량 등에 의해 발생하는 미세먼지는 거의 측정조차 되지 않거나 보고되고 있지 않아, 항공기 제트 미세먼지에 의한 인천 시민건강에 미치는 중대한 위협성이 간과되고 있다.

ICAO (International Civil Aviation Organization)가 1981년 터보팬 및 제트엔진에서의 연료의 배출 및 가스 배출물의 규제에 관한 기준을 채택한 이후 NO<sub>x</sub> 와 CO<sub>2</sub> 등의 배출량을 엄격하게 규제하며 줄이기 위한 목표를 세워 오고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나 우리나라의 경우 국토교통부는 공항 환경 관리 기준 제 11조에 오염물 관리방향에 대해서만 설명하고 있으며, 배출량 규제에 대해서는 정확한 대기환경기준을 세우지 않고 환경정책기본법으로만 기준을 삼고 있다.

인천국제공항 이착륙 항공기의 미세먼지발생 측정, 보고 및 관리의 책임이 있는 인천공항공사는 공항활주로나 터미널 근처에는 측정소도 설치되어 있지 않으며, 항공기 주요배출물인 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub> 등의 오염물질 inventory 연구가 전혀 없는 것으로 나타났다<sup>(2)</sup>. 인천공항은 하루에 LTO (Landing and Take-off) 사이클 수 기준 하루 평균 약 800회 이상의 항공기가 약 260만 리터의 항공유 연소가스를 대기 중 1 km 까지의 상공에 배출하며, 이는 인천-서울 (30 km) 운항 대형트럭 약 100,000대 이상의 디젤 배출량과 비슷한 배기가스가 하루에 방출된다.

본 연구에서는 ICAO에서 제공하는 배출량 산정 기준에 맞추어 항공기 엔진에서 배출되는 PM<sub>10</sub>의 배출량을 LTO 주기별로 미세먼지 확산 패턴을 해석하며, 인천공항 주변 대기조건에 따른 다양한 이착륙 항공기 엔진에 의한 대기오염 환경기준을 수립하기 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법 및 조건

본 해석에서는 상용 CFD 해석프로그램인 FLUENT 18.1<sup>(3)</sup>을 이용하여 항공기의 엔진에서 배출되는 미세먼지의 대류 및 확산 유동해석을 수행하였다. CFD 해석에 사용한 3차원 유동의 연속 방정식, 운동량 보존 방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

\* 인하대학교 건설기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

E-mail : sbalee@inha.ac.kr

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) \quad (2)$$

난류유동계산은 제트난류유동 비정상모사에 적합한 LES (Large Eddy Simulation)를 이용하여 해석하였으며, 아격자 모델로는 Smagorinsky 모델을 사용하여 CFD 해석을 진행하였다.

본 연구의 모델은 BOEING 737-900 항공기에 사용되는 CFM56-7B26 엔진이며, 이 모델에 대해 ICAO에서 제공하는 배기가스 배출량은 LTO 1회당 오염물질 배출계수 및 연료소비량을 기준으로 계산하였다. 유동 해석 계산영역의 크기는 X, Y, Z 축 기준으로 1 km, 1 km, 2 km (활주로 방향)이며, LTO 주기 중 Initial climb to power cutback 구간을 만족하도록 설정하였다. 이 구간은 엔진의 동력을 100% 사용하면서 일정한 속도로 상승하는 구간으로 약 240m에서 450m 사이의 높이를 가지게 된다.

본 논문에서는 외부 대기조건에 따른 영향을 비교하고자 인천공항의 연평균 풍향 및 풍속에 맞는 유동 조건이 있을 때와 없을 때의 미세먼지분포 유동패턴에 대한 수치해석을 각각 수행하였으며 비교, 분석한 결과를 설명하였다.

### 3. 수치해석 결과

연평균 풍향 및 풍속에 맞는 유동 입구조건이 있을 때와 없을 때의 미세먼지 농도분포를 해석한 결과가 Fig.1에 각각 비교되어 있다. 이륙위치를 기준으로 활주로 길이방향에 수직한 XY 평면에서의 오염농도분포를 비교하면 측면 입구유동이 존재하는 경우 미세먼지 분포가 내륙으로 치우쳐 확산되는 것을 확인할 수가 있다. PM<sub>10</sub> 농도기준으로 이륙하는 동안 미세먼지 영향권은 바람조건이 있는 경우와 없는 경우 각각 약  $9 \times 10^5 \text{ m}^2$ 와  $6 \times 10^5 \text{ m}^2$ 의 넓이의 지역이 된다. 또한 항공기는 후처리장치 없이 직접 대기로 배기가스를 배출하므로 연소가스 중 NOx, SOx는 상공의 찬 온도로 인해 응축되어 있는 수분과 반응하거나 잦은 안개지역의 수분과 결합하여 질산염, 황산염으로 바뀐 후 강한 흡착력으로 10일 정도의 기간에 걸쳐 미세먼지로 바뀌게 된다. 즉, 항공기 이륙 시 고도를 높이면서 배출된 유해물질 포함 연소 배기가스와 미세먼지가 대기 중 특히 1 km 내외의 저고도에 **Banking** 되었다가 중국으로부터의 서풍 시 중국 미세먼지와 함께 수도권으로 대규모 유입하게 된다.

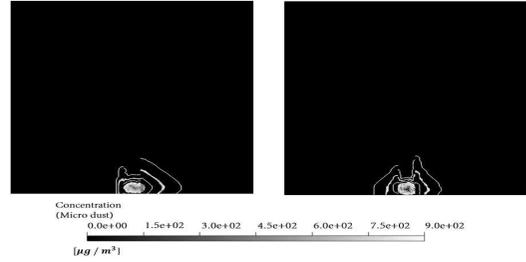


Fig. 1 Micro-dust concentration distributions by climbing jet airplane in case of incoming side wind speed of 3.5 m/s or 0 m/s

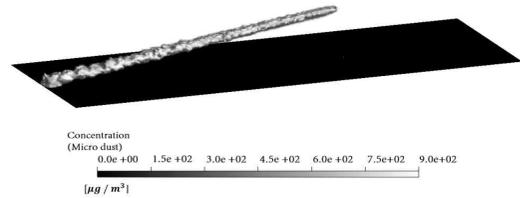


Fig. 2 Simulated micro-dust concentration emitted by a jet engine

### 4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 항공기가 상승, 하강하는 LTO 구간에서 항공기 엔진에서 배출되는 미세먼지가 확산되어 공항뿐 아니라 인근 주변에도 큰 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.
- 2) 연평균 대기유동조건에서는 미세먼지 확산이 내륙방향으로 치우쳐 공항 이외에 주변으로 고농도의 비산 미세먼지의 영향이 있음을 알 수 있다.

### 후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평화원(KIAT) 연구비지원(N0001292)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌(Reference)

- (1) CAO, 2008, *ICAO Annex 16: Environmental Protection, Volume II - Aircraft Engine Emissions*.
- (2) 인천공항공사의 공항 미세먼지 정보공개에 대한 답변서, 2019.03, 인천환경연합.
- (3) Ansys Fluent 18.1, User's Manual