

저자 (Authors)	이지원, 이유렬, 김재원, 명노신 J.W. Lee, Y.Y. Lee, J.W. Kim, R.S. Myong
출처 (Source)	한국전산유체공학회지 25(3) , 2020.9, 102-112 (11 pages) Journal of Computational Fluids Engineering 25(3) , 2020.9, 102-112 (11 pages)
발행처 (Publisher)	한국전산유체공학회 Korean Society for Computational Fluids Engineering
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10443820
APA Style	이지원, 이유렬, 김재원, 명노신 (2020). 물 분사기법 적용에 따른 항공기 노즐의 유동 특성 해석. 한국전산유체공학회지, 25(3), 102-112.
이용정보 (Accessed)	경상대학교 117.16.164.*** 2020/11/10 11:48 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

물 분사기법 적용에 따른 항공기 노즐의 유동 특성 해석

이 지원,¹ 이 유렬,¹ 김재원,² 명노신^{*1}

¹경상대학교 기계항공공학부
²국방과학연구소 (부설)항공기술연구원

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT NOZZLE FLOW BY INJECTING WATER MIST

J.W. Lee,¹ Y.Y. Lee,¹ J.W. Kim² and R.S. Myong^{*1}

¹Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National Univ.

²Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development

Modern weapon systems require stealth technology to avoid detection by enemy and successfully carry out missions. Among them, IR stealth technology, which increases the success rate of the mission by reducing IR signals, has been studied in various methods, and in particular, the particle injection techniques can effectively reduce IR signals through shielding and cooling effects. In this study, the characteristics of flow and particles by injecting water mist were analyzed to study the feasibility of injection techniques for reducing aircraft plume IR signals. The water spray was simulated by applying a multiphase fluid model, the discrete phase model (DPM) method, and the characteristics and temperature changes according to the flow rate were studied. We first investigated the effects of water mist, and then selected the amount of water mist that minimizes the change of the thrust line, and finally checked the change in the flow field due to the behavior and evaporation of water droplets.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 다상 모델(Multiphase Model), 열유동장(Thermal Flowfield), 적외선 신호 저감(IR Signature Suppression), 물 분사(Water Mist)

1. 서 론

현재 세계 각국에서는 무기체계의 임무 완성도와 생존성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 무기체계의 피탐지성을 높이고 생존성을 낮추는 대표적인 요인으로 항공기에서 방사되는 IR신호가 있다. IR신호는 복사 신호에서 IR 파장 영역에 해당하는 신호를 의미하며 주로 항공기 엔진이나 노즐과 같은 추진기관, 배기가스, 표면 가열 및 방사 등으로 인해 발생한다. 특히 추진기관에서 생성되는 고온의 배기가스에서 높은 IR신호가 방사되므로, 배기플룸의 IR신호 저감으로 항공기의 생존성을 높이는 다양한 방법이 연구되고 있다[1-4].

대표적으로 배기구의 형상을 구부러진 형태로 변형하여 고

온 영역이 직접적으로 노출되는 것을 방지하는 방법[5], 노즐 출구 세장비를 높여 배기 플룸과 외부공기의 혼합을 용이하게 하여 온도를 낮추는 방법[6], 노즐 출구에 Deck을 추가하여 지대공 미사일의 탐지를 차단하는 방법[7] 등이 있다. 이 밖에도 배기가스에 다량의 찬 공기를 섞어서 방출되는 배기 플룸의 온도를 줄이는 방법[8]이 있다. 이와같이 플룸 IR신호는 차폐나 냉각을 통한 온도저감 방법이 중점적으로 연구되고 있다. 이는 복사강도가 온도의 4제곱에 비례하여, IR신호와 온도가 밀접한 관련이 있기 때문이다.

위에서 언급된 바이패스를 이용한 IR신호 저감방법 이외에도 다양한 물질을 분사하여 IR신호 및 온도를 감소시키는 연구가 수행된 바 있다. Weisrose 등[9]은 터보팬 엔진을 모사하는 실험장치를 이용하여 바이패스에 높은 흡수계수를 가진 고체 입자를 주입하여 IR신호의 특성을 연구하였다. 실험결과 4-5 μm 에서 IR신호 저감효과가 가장 크게 나타났으며, 70% 이상의 저감률을 보였다. Guameri[10]는 항공기 체트엔진을 이용하여 액체질소와 물 분사에 따른 IR신호 차폐효과를 비교하였다. 그 결과 액체질소와 달리 물은 얇은 응집막으로 인

Received: September 11, 2020, Revised: September 24, 2020,

Accepted: September 24, 2020.

* Corresponding author, E-mail: myong@gnu.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2020.25.3.102

© KSCFE 2020

하여 IR신호 차폐효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 배기 가스 유량과 비슷한 유량의 물을 분사할 경우 IR신호가 대부분 차폐되었다. Tyagi and Subbarao[11]는 공기와 다분산 물입자를 분사하여 IR신호 저감 효과와 특성에 관해 연구하였다. 외부 공기에 의한 냉각효과는 미미하였지만, 물을 분사하면 약 200℃ 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 최적량 이상 분사하면 유량 증가에 따른 온도 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. Li 등[12]은 물분사에 따른 고체 로켓 체트의 배기플룸 냉각효과를 실험과 전산 시뮬레이션을 통해 연구하였다. 연구결과 물분사 속도가 빠를수록 노즐로부터 더 짧은 거리에서 온도 감소가 시작되고, 물분사 유량이 증가할수록 플룸의 온도저감 효과는 증가하는 것으로 나타났다. 선행 연구에서는 대부분 물을 이용하여 플룸의 온도저감 연구를 진행하였다. 이는 물입자가 다른 입자보다 상대적으로 어는점과 비열이 높고, 경체성과 접근성이 뛰어나기 때문으로 판단된다.

한편 국내의 IR신호 저감연구는 대부분 형상변형에 관한 IR신호 저감연구에 집중되어 있다. 엔진의 고온부를 차폐시켜 IR신호를 저감하는 S형 덕트를 무인전투기의 흡-배기구에 적용한 연구[13,14]와 같이 전기체에 형상변형 기술을 적용하여 형상에 따른 영향성을 분석하는 단계까지 도달했다. 반면 분사기법을 이용한 IR신호 저감연구는 현재 연구 동향[15], 이론적 분사량 분석[16] 및 분사실험장치 개념 설계[17]에 관한 연구 등 기초 단계의 연구만 진행되고 있어 관련 연구결과가 미비한 상황이다.

본 연구에서는 다양한 이점을 가진 물을 분사 입자로 채택하여 분사 기법 적용에 따른 배기플룸의 유동 및 입자의 특성을 연구하였다. 2D 모델 해석을 통해 적절한 물 분사량 범위를 선정하고, 분사량에 따른 물분율, 온도, 마하수를 비롯한 유동장을 분석하였다. 또한 분사기법 적용 유무에 따른 3D 모델을 비교를 통해 거리에 따른 온도 저감효과에 대해 분석하였다. 다중 화학종 비반응 플룸 모델을 적용하였으며, Eulerian-Lagrangian 기법의 DPM (Discrete Phase Model)을 적용하여 더욱 실제적인 유동해석을 진행하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 압축성 Navier-Stokes 방정식

유동장 계산을 위한 지배방정식으로 점성 및 압축성 효과를 포함하는 3차원 압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하였으며, 질량 보존 방정식은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{v}) = \nabla \cdot \mathbf{J}_i \quad (1)$$

운동량 보존 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) + \nabla p = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_t) \quad (2)$$

p 는 정압, $\boldsymbol{\tau}$ 는 점성 전단응력 텐서, $\boldsymbol{\tau}_t$ 는 난류항을 나타낸다. 에너지 보존 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v}) = \nabla \cdot [(k + k_t) \nabla T] + S_h \quad (3)$$

k 는 열전도도, k_t 는 난류 전송에 의한 전도도, S_h 는 복사 열전달 등의 추가적 열에 관련된 항을 나타낸다. 화학종의 질량 확산은 Schmidt 수($Sc_t = \mu_t / \rho D_t$)와 선형 Fick의 법칙을 사용하였다.

$$\mathbf{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (4)$$

상용 소프트웨어인 ANSYS Fluent v.2019를 사용하여 유동 해석을 진행하였으며, 주요 수치 기법으로 정상(Steady) 유동 해석, 밀도 기반(Density-based), 내재적 시간 전진법(Implicit), 유한체적법(Finite Volume Method), 2차 풍상차분법(Second Order Upwind), Riemann 근사해법에 기초한 Roe FDS (Flux Difference Splitting)를 사용하였다. 난류모델은 k- ω SST (Shear Stress Transport) 모델을 적용하였다. SST 모델은 k- ω 과 k- ϵ 의 장점을 혼합한 모델로 난류 소산을 해석을 위해 ω 와 ϵ 방정식을 조합한 것이다. 벽 근처에서는 k- ω 모델이 사용되고 그 이외의 영역에서는 k- ϵ 모델이 사용하여 해석을 정확도를 높였다.

2.2 다상 모델

본 연구에서는 분사되는 액체상태의 물과 고온의 배기 플룸이 포함된 다상유동 해석을 수행하였다. 다상유동 모델은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 크게 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법으로 나눌 수 있다. Eulerian 방법은 액적과 그 주변을 연속체로 가정하여 푸는 방법으로 액적과 기체 경계에서 상호작용을 잘 나타낸다는 이점이 있지만, 액적의 크기가 작을 경우 매우 조밀한 격자가 필요하다. 그에 반해 Lagrangian 방법은 각 입자 거동을 계산하여 입자의 저항과 증발 속도에 따라 연속상과 결합(Coupling)하는 방법으로, 입자를 개별적으로 계산하고 증발 해석이 용이한 이점이 있다. 그러나 입자 간 충돌, 분열을 비롯한 상호작용과 벽에서의 충돌을 해결하기 위해 하위모델을 추가로 설정해야 하는 제약이 있다. 본 연구

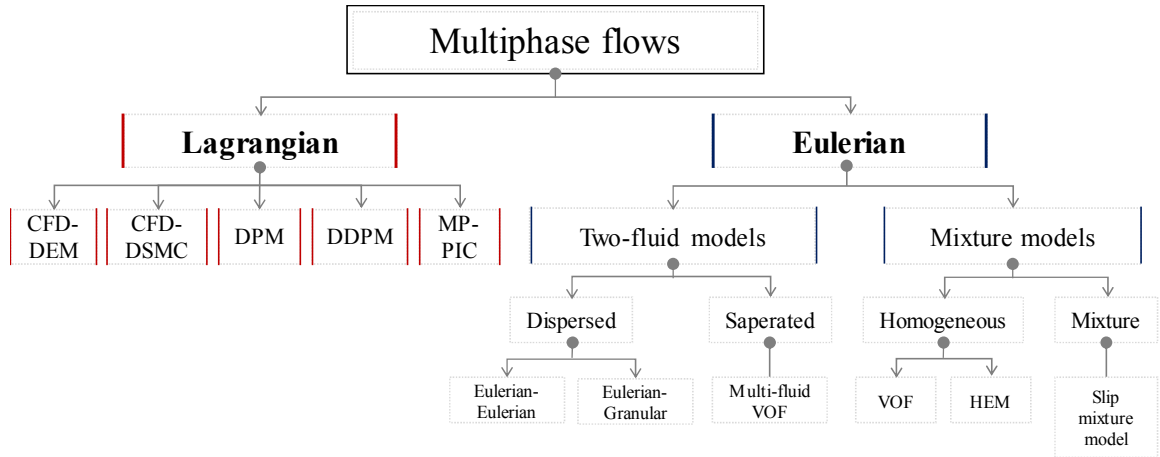


Fig. 1 Numerical models for gas-particle flows [18]

에서는 스프레이, 입자 함유 유동에 적합한 DPM을 사용하였다. DPM은 연속상인 배기 플룸과 입자상인 물을 각각 Eulerian과 Lagrange 방법으로 계산하여 각 상의 경계에서 질량, 운동량, 에너지 전달을 계산하여 상 간의 작용을 반영하는 해석 방법이다. 이때 분사되는 입자는 구형으로 가정되고 부피분율이 10% 미만이라는 제한조건을 가진다. 따라서 스프레이에서 분사되는 물을 일정한 물성치를 갖는 균일한 구 형태로 가정해서 해석을 수행하였다. x 방향에 대한 입자 운동 방정식은 아래와 같이 나타낸다[19].

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (5)$$

F_D 는 단위 입자 질량 당 저항을 의미하고, 아래와 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (6)$$

여기서 u , ρ , μ , d 는 각각 유동의 속도, 밀도, 점성계수, 지름을 나타낸다. 아래 첨자 p 는 입자임을 나타낸다. Re 는 상대 레이놀즈수로 식 (7)과 같이 표현된다.

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (7)$$

C_D 는 액적의 항력계수로 액적을 구 형태로 가정하였을 때 아래와 같이 표현된다.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (8)$$

식 (8)의 a_1 , a_2 , a_3 는 Re 의 범위에 따라 구형 입자에 적용되는 상수이다. g_x 는 중력가속도를 나타낸 항이고, F_x 는 유동의 밀도가 액적의 밀도보다 높을 때, 액적에 추가로 작용되는 항을 나타낸 것이다.

2.3 액적의 질량 및 온도변화

고온의 배기 플룸과 분사된 물 입자가 만나면 기화가 발생한다. 이때 물 입자의 질량 변화는 아래와 같은 식으로 간단히 표현된다.

$$\frac{dm_p}{dt} = -N_i A_p M_{w_i} \quad (9)$$

A_p 는 액적의 표면적을 나타내고, M_{w_i} 는 화학종에 따른 분자량을 나타낸다. N_i 은 수증기의 물 유량, 즉 기화율을 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,INF}) \quad (10)$$

k_c 는 질량변화 계수를 나타내고, $C_{i,s}$, $C_{i,INF}$ 는 각각 액적 표면과 플룸의 증기 농도를 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$C_{i,s} = \frac{P_{sat}(T_p)}{RT_p} \quad (11)$$

$$C_{i,INF} = \frac{P_{operating}}{RT_{INF}} \quad (12)$$

이때, $P_{sat}(T_p)$ 와 $P_{operating}$ 을 상수로 가정하면, N_i 는 온도에 대해 아래와 같은 관계성을 가진다. 여기서 T_{INF} , T_p 는 각각 유동과 입자의 온도를 나타낸다.

$$N_i \propto \frac{T_{INF} - T_p}{T_{INF} T_p} \quad (13)$$

식 (9)를 정리하면 식 (14)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{dr_p}{dt} = -\frac{1}{\rho_p} N_i M_{w_i} \quad (14)$$

나아가 $1/\rho_p M_{w_i} = const$ 로 가정하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dr_p}{dt} = f\left(\frac{T_p - T_{INF}}{T_p T_{INF}}\right) \quad (15)$$

식 (15)에 따라 액적의 질량변화의 주요 인자는 반지름 및 온도인 것을 파악할 수 있다.

또한 열 균형에 따른 액적의 온도변화는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_{INF} - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (16)$$

c_p 는 액적의 열용량을 나타내고, h 는 대류열전달 계수, h_{fg} , ϵ_p , θ_R , σ 는 잠열, 입자의 방사율, 복사 온도, Stefan-Boltzmann 상수를 각각 나타낸다. 우측의 세 항은 차례로 액적의 열전도, 기화, 열복사를 나타낸다.

2.4 스토크스 수(Stokes Number)

입자가 유동에 영향을 미치는 여부에 따라서 단방향 결합(One-way Coupling) 혹은 양방향 결합(Two-way Coupling) 해석으로 나눌 수 있다. 단방향 결합 해석은 유동이 입자 거동에 마찰저항이나 난류로 영향을 주지만, 입자 거동은 유체에 영향을 주지 않을 때 사용된다. 양방향 결합 해석은 유동이 입자의 거동에 마찰저항이나 난류로 영향을 주고 입자들도 유

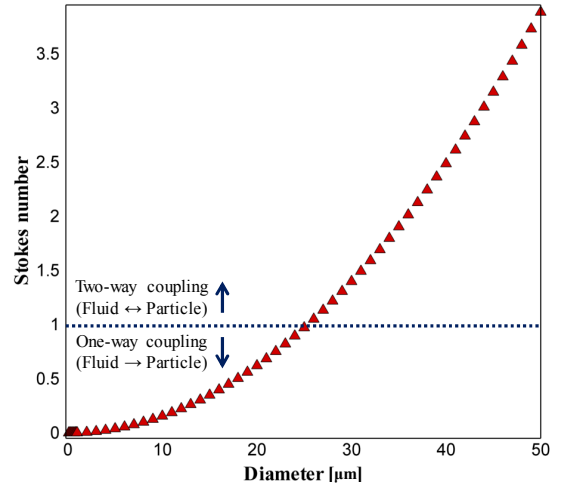


Fig. 2 Stokes number according to diameter variation

체의 운동량이나 난류 거동에 손실을 미칠 때 사용된다. 이러한 단방향 및 양방향 결합 해석은 스토크스 수(Stokes Number)를 통해 판단할 수 있다. 스토크스 수는 유체와 입자 간 유동의 흐름 매개 변수이며, 아래의 식과 같이 입자의 반응시간과 유동의 반응시간의 비로 이루어져 있다.

$$St_t = \frac{\tau_r}{t_{ref}} \quad (17)$$

여기서 $\tau_r = \rho_p d_p^2 / 18 \mu_g$ 이며, $t_{ref} = L_{ref} / U_{ref}$ 는 특성길이(Characteristic Length)와 특성속도(Characteristic Velocity)로 정의된다. 스토크스 수가 1보다 작다는 것은 입자의 반응시간이 유동의 특성 시간보다 훨씬 짧다는 것을 의미한다. 이때 입자는 유동의 흐름에 영향을 주지 않고 유동과 유사한 속도로 따라가므로 단방향 결합 해석이 적합하다. 반대로 스토크스 수가 1보다 크다는 것은 입자가 유동 속도변화에 거의 영향을 받지 않고 기존의 입자 속도를 유지한다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용되는 물의 스토크스 수는 약 4로 정확한 해석을 위해 양방향 결합 해석을 진행하였다.

식 (17)에 나타난 바와 같이 스토크스 수의 주요 변수는 입자의 농도와 크기이다. 물입자의 농도는 일정하므로 오직 입자의 지름만 변수로 작용한다. 고온의 플룸과 접촉한 물 입자는 기화로 인하여 입자의 질량이나 지름이 지속적으로 변화하고 스토크스 수도 Fig. 2와 같이 달라진다. 스토크스 수는 입자 반지름이 증가할수록 지수함수 형태로 증가하므로, 입자 반지름이 커질수록 유동에 미치는 영향이 급격하게 커지는 것을 확인할 수 있다.

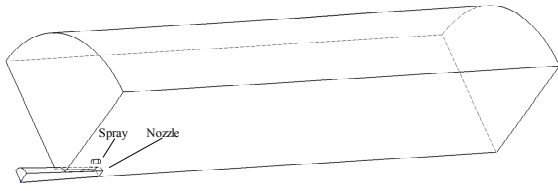


Fig. 3 3D geometry of water spray system

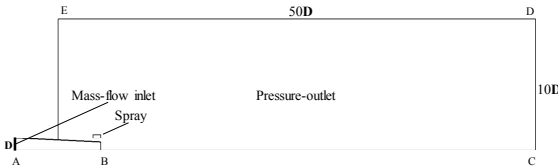


Fig. 4 2D geometry of water spray system

2.5 형상 및 경계조건

Fig. 3는 물분사 시스템의 3D 형상모델을 나타낸다. 배기 플룸이 분사되는 원형노즐과 노즐 출구에 위치하여 물 입자를 분사하는 스프레이로 구성되어 있다. 노즐 출구 위, 아래에 각각 위치한 분사 스프레이는 추력 손실을 최소화하기 위해 배기 플룸과 평행한 방향으로 분사하도록 설계하였다. Fig. 4에서 2D 물분사 시스템 형상모델을 나타낸다. 노즐 길이는 나타내는 A-B는 1.639 m이고, 입구 지름 D는 0.468 m이다. 도메인 크기는 입구 지름 D를 기준으로 축방향(D-E)으로 50D, 반경방향(C-D)으로 10D로 설정하였다.

유동해석을 위한 격자는 2D 모델은 약 10만 개, 3D 모델은 약 280만 개로 구성되어 있다. 또한 해석의 정확성을 높이기 위해 노즐 내부 벽면 근처 및 플룸과 물 입자가 생성되는 노즐 출구 부분에 BOI (Body of Influence)를 이용하여 격자를 조밀하게 설정하였다. 해석조건은 Table 1에 나타나 있는 것과 같이 배기노즐 입구 경계조건은 배기가스 유량 대비 물 분사량 선정을 위해 목표하는 질량 유량 조건을 사용하고, 유동장에는 지상조건으로 가정하여 압력 출구조건을 적용하였

Table 1 Boundary conditions

Free stream (Pressure outlet)	Pressure (Pa)	101,325
	Temperature (K)	288.15
Nozzle inlet (Mass Flow Inlet)	Pressure (Pa)	146,375
	Temperature (K)	811.8
	Mass flow rate (kg/s)	20.5
Wall	No-slip, adiabatic	
Spray	Diameter of spray nozzle (mm)	10
	Particle material	Water-liquid
	Particle diameter (µm)	50
	Velocity (m/s)	16
	Temperature (K)	288.15

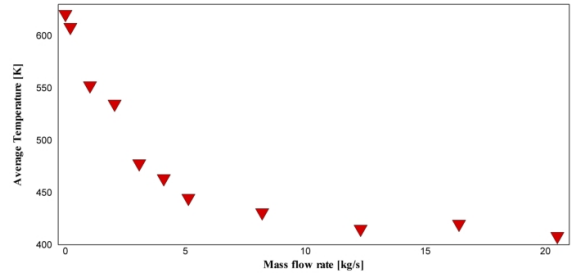


Fig. 5 Average temperature of plume for varying mass flow rates

다. 스프레이는 DPM을 이용하여 50 µm 크기의 구 형태의 물 입자로 가정하여 스프레이 출구면과 수직한 방향으로 분사하였다. 노즐입구조건은 엔진 성능 분석 프로그램인 GASTURB를 통해 도출된 결과를 적용하였다. 또한 Table 2에 나타난 바와 같이 노즐 입구로 유입되는 유동은 Soot가 없는 완전 연소로 가정하여 N₂ 74%, H₂O 13%, CO₂ 13%로 설정하였다.

3. 분사량에 따른 해석결과

3.1 분사 범위 선정

항공기는 함정과 달리 물을 공급하는 것에 제한적인 환경으로 효율을 극대화하기 위해 적절한 물 분사량을 정하는 것이 필요하다. 우선 노즐 출구에서 생성되는 배기 플룸 유량 (20.5 kg/s)을 100%로 설정하고 샘플링 연구를 통해 물 분사 유량에 따른 온도 경향성을 분석하였다. Fig. 5는 물 분사 유량 변화에 따른 배기 플룸의 평균 온도를 나타낸 것이다. 해석 결과 약 5 kg/s (25%)까지 분사량에 따라 플룸의 평균 온도가 현저하게 낮아지다가 이후 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향성을 참고하여 전체 물 분사량 범위를 0-25%로 설정하여 유동해석을 진행하였다. Table 3에 나

Table 2 Mole fraction of species

Boundary	Species			
	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
Free stream	0.79	0.21	-	-
Inlet	0.74	-	0.13	0.13

Table 3 Cases with different flow rate ratios

Case #	Flow rate ratio (Exhaust gas/water-liquid)
1	0
2	0.05
3	0.1
4	0.15
5	0.2
6	0.25

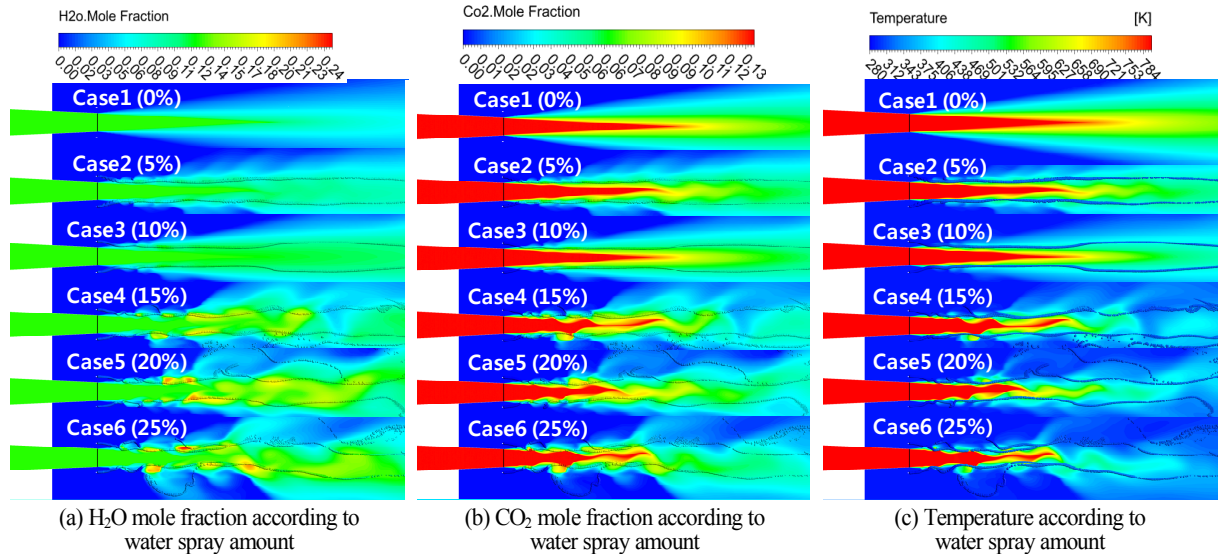


Fig. 6 Mole fraction of CO_2 , H_2O and temperature contour for varying amount of water spray

탄산 바와 같이 분사량을 5%씩 증가하여 총 6 Case 해석모델을 통해 물 분사량에 따른 유동 특성을 분석하였다.

3.2 유동 해석결과

정상 유동해석을 통해 6 Case의 유동해석 결과를 도출하였으며, Contour가 안정적이고 Residual과 Net Mass Flow Rate가 일정한 값 이하로 도달하였을 때, 수렴되었다고 판단하였다. 물, 이산화탄소 분자의 몰분율, 온도는 Fig 6에 제시되어 있다. 이산화탄소 분자의 고유진동수가 4~4.5 μm 밴드에 영향을 미치고, 물 분자의 고유진동수가 5.5~7.5 μm 밴드에 영향을 미치기 때문에 플룸 IR신호는 온도와 더불어 이산화탄소, 물의 농도 변화도 마찬가지로 고려해야 한다. Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 물 입자의 분사량이 증가함에 따라 물 분사에 의해 플룸 고온부의 길이가 선형적으로 짧아지는 것을 확인할 수 있다. Case 3 (10%)까지 축방향 대칭으로 플룸이 형성되고 외부 유동과 혼합되지만, Case 4 (15%) 이후 플룸의 형상이 비대칭적이고 불안정성을 가지며 외부 유동과의 혼합이 불규칙한 양상으로 변한다. 이러한 불안정성은 추력 손실을 초래하므로 원인 분석을 통해 적절한 분사량을 설정하는 것이 필요하다. Fig. 6(a)에 제시된 물의 몰분율을 살펴보면 플룸과 물입자가 거의 접촉하지 않는 Case 3 (10%)까지 물의 몰분율의 변화가 없고, 입자와 플룸이 거의 평행하게 진행된다. 반면 Case 4 (15%) 이후 분사량이 증가할수록 입자와 플룸이 충돌하면서 접촉되는 영역의 몰분율이 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 위, 아래에 위치한 스프레이에서 분사되는 물 입자의 거동이 독립적으로 분사되어 플룸의 양상에 영

향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 이산화탄소의 몰분율을 나타낸다. 본 연구에서는 단일 액체만 분사하여 이산화탄소의 최대 몰분율은 0.13으로 동일하다. 그러나 플룸의 형상이 변형됨에 따라 이산화탄소 몰분율 또한 비대칭적인 형태를 가진다. 분사량 증가에 따른 온도는 Fig. 6(c)에 제시되어 있다. 플룸은 최대 810K, 물 입자의 온도는 최대 330K까지 도달한다. 물 분자는 기화로 인해 온도가 일정 수준 이상 높아지지 않는다. 입자의 거동을 살펴보면, 분사량이 증가함에 따라 물입자가 플룸의 고온영역에 더욱 가까워지는데, 이는 밀도가 증가하여 압력이 높아지기 때문으로 판단된다. 그러나 중심부의 고온영역에는 도달하지 못한다. 물분사가 적용되지 않은 Case 1 (0%)과 다른 해석 모델들을 비교했을 때, 전체적으로 플룸 고온부의 길이가 감소하였으며, 물분자의 몰분율이 증가하고 이산화탄소 분자의 몰분율은 일정한 것을 확인하였다. 그러나 분사율이 15% 이상 증가하면, 플룸이 비대칭적인 형태를 가지는 것을 확인하였다. 이와 같이 플룸이 비대칭적이고 불안정하게 변화하는 것은 Kelvin-Helmholtz 불안정성(Instability) 메커니즘에 의해 야기되었다고 판단된다. Kelvin-Helmholtz 불안정성은 밀도가 다른 두 유체의 경계면에서의 속도 차이로 인해 발생한다. 이때 입자의 지름에 따라 입자의 거동이 달라지는데, 작은 입자($d_p < 5 \mu\text{m}$)는 유동 흐름에 지배를 받는 반면, 큰 입자($d_p > 25 \mu\text{m}$)는 유동의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 Aggarwal 등[20]의 논문에 따르면, 중간 크기의 입자($d_p = 10 \mu\text{m}$)는 유동의 방향을 따라가지 않으면서, 유동의 영향으로 가스 입자보다 넓게 분산되고, 특히 분사 속도가 빠를수록 더 많

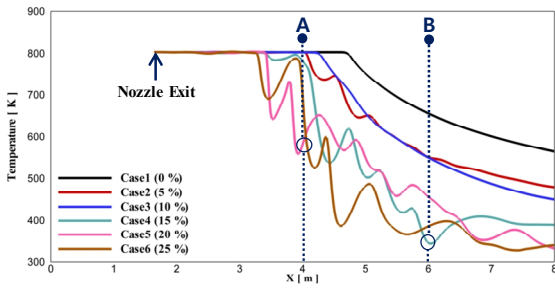


Fig. 7 Axial temperature distribution

이 분산되는 결과가 나타났다. 본 연구에서 적용되는 물 입자의 초기 지름은 50 μm 로 큰 입자에 해당하지만, 플룸과의 상호간섭으로 인한 기화로 지름이 줄어들어 중간 크기의 입자가 된다. 모든 해석모델에서 입자의 지름을 50 μm 로 동일하게 해석을 진행하였음에도 불구하고 분사율 15% 이상 분사하였을 때 분산되는 이유는 분사 유량의 증가로 분사 속도가 증가하여 더 넓게 분산되는 것으로 판단된다.

분사량에 따른 축방향 온도 분포는 Fig. 7에 제시하였다. 노즐 출구 중심선으로부터 온도 분포를 도출하였으며, 노즐 출구에서의 플룸 온도는 802K으로 형성된다. Case 1 (0%)는 오직 외부 유동과 혼합을 통해 플룸 온도가 감소하며, 온도 감소율이 가장 낮다. 또한 분사량이 증가할수록 플룸 온도가 감소하기 시작하는 지점과 노즐 출구 간 거리가 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 이는 분사량이 증가할수록 물 입자와 배기 플룸 간 접촉 면적이 증가하여 플룸의 냉각속도가 빨라지기 때문으로 판단된다.

노즐 입구로부터 거리(2, 4, 6, 8 m)에 따른 플룸의 온도 분포를 Fig. 8에 제시하였다. Case 1은 오직 공기 혼합에 의한 냉각효과만 적용되므로 플룸의 온도가 모든 거리에서 가장 높은 것을 확인하였다. Fig. 8(a)에서 플룸의 최대 온도는 모두 802K에서 형성되었다. 또한 플룸이 분포된 면적도 가장 작고 온도 분포가 모두 유사한 형태인데, 이는 스프레이에서 분사된 입자와 플룸이 평행하게 분사되어 물에 의한 냉각이 거의 일어나지 않았기 때문이다. 대신 Fig. 8(a)에서는 냉각에 의한 IR신호 저감은 낮지만, 물 입자가 플룸을 감싸는 형태를 하고 있어 차폐에 의한 IR신호 저감효과가 있다고 판단된다. Fig. 8(b)-(d)에서는 플룸이 냉각되면서 노즐 출구로부터 거리가 멀어질수록 온도가 낮아지고, 플룸이 넓게 확산하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)에서 Case 1의 최대 온도는 802K이며 온도 저감률은 Case 5에서 27.6%, Case 6에서 12.7% 감소하였다. Fig. 8(c)에서는 최대 온도는 655K이며, 온도는 Case 4 경우 47.3%, Case 6 경우 41.2% 감소하였다.

Fig. 8(d)에서 최대 온도는 563K이며, 온도는 Case 4일 때

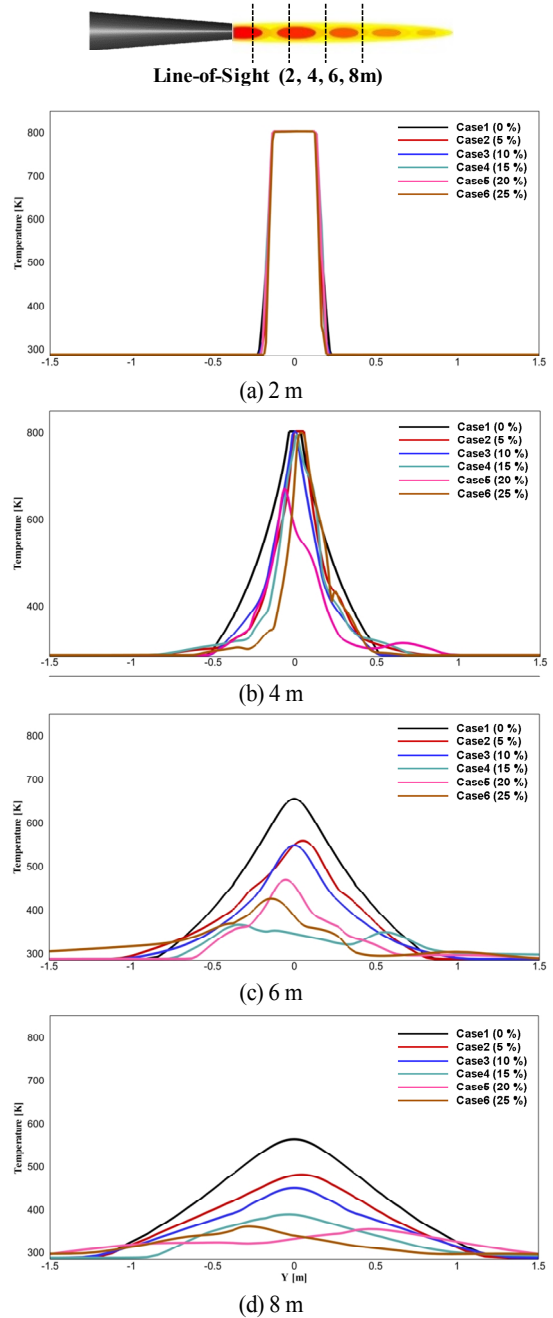


Fig. 8 Lateral temperature distribution

47.3%, Case 6일 때 41.2% 저감되었다. 특히 Fig. 8(b) Case 5와 Fig. 8(c) Case 4의 경우 다른 Case에 비해 분사량 대비 두드러지는 온도 저감을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 7과 같이 분사량이 증가함에 따라 야기된 플룸의 불안정성으로 온도가

급격하게 감소하여 다른 Case 대비 온도 저감이 커진 것으로 판단된다. Fig 7의 A와 B는 Fig. 8(b) Case 5, Fig. 8(c) Case 4의 최대 온도를 나타내며 분사량이 커질수록 플룸이 불안정해지고, 온도가 급격하게 변화하고 A, B 지점에서는 다른 Case보다 최대 온도가 낮은 것을 확인할 수 있다. Fig 8(d)에서는 분사량이 증가할수록 플룸의 최대 온도가 감소하였다. 분사량이 5%씩 증가함에 따라 Case 1 대비 각 Case 별 15%, 20%, 30%, 40%, 40%의 온도 저감을 보였다. Case 2에서 84K으로 가장 큰 온도 차이를 보였고, 분사량이 20% 이후부터 온도 저감효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 물분사 적용 유무에 따른 온도 감소 폭은 크지만, 일정 수준 이상 (15%) 분사하였을 때, 감소 폭이 급격하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

물 입자의 기화는 배기 플룸에 의해 가열된 물과 스프레이에서 분사된 물 사이에서 열전달의 결과로 발생하고, 그 결과 플룸의 온도가 감소한다. 유량비가 적을 때는 분사량이 증가할수록 높은 온도 저감률을 보이지만, 최적량 이상의 물을 분사할 경우 온도 저감효과가 거의 없다. 그 원인은 유량비가 증가하더라도 플룸과 물입자가 접촉하는 면적의 한계로 기화량이 제한적인 것과 지속적으로 기화되는 물입자가 더 이상 기화되지 않는 포화 증기상태에 도달하여 온도 감소율이 낮아지는 것이라고 판단된다.

물 분사 적용됨에 따라 최대 온도는 300K 정도 차이가 발생한다. 또한 노즐 출구로부터 거리가 멀어질수록 물분사 유무에 따른 플룸의 온도 차는 크게 나타난다. Case 1의 경우 $Y = 0$ 을 기준으로 대칭적인 온도분포를 가지는 데 반해, Case 2-6은 플룸의 불안정성으로 비대칭적인 온도가 감소하는 양상을 보인다. 또한 분사율이 15% 이상 증가하면 온도 감소 폭이 둔화한다. 따라서 분사율을 10~15%로 설정하는 것이 온도 저감 효과가 뛰어나면서 플룸의 불안정성 또한 최소화할 수 있다고 판단된다.

Fig. 9은 배기플룸 대비 물 분사유량이 5%, 10%, 20% 일 때, 축방향으로 입자의 질량, 지름, 기화, 온도 분포를 나타낸 것이다. 물 입자는 50 μm 크기의 반지름을 가진 구형의 입자로 가정하고 노즐 출구 위, 아래에 위치한 스프레이에서 배기 플룸과 평행한 방향으로 물을 분사하였다. 분사량이 증가할수록 질량과 지름의 감소율이 줄어드는 것을 Fig. 9(a), (b)를 통해 확인할 수 있다. Fig. 9(b) Case 2 (5%)의 지름은 50 μm 크기로 분사된 후 선형적으로 줄어들다가 30 μm 이후 감소율이 급격하게 증가하는데, 이는 지름이 감소할수록 부피대비 표면적이 증가하여 기화가 가속화되기 때문으로 판단된다. Case 3 (10%) 또한 마찬가지로 선형적으로 지름이 감소하다 10 μm 에서 급격하게 기화되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(c)는 거리에 따른 기화량을 나타낸 것이다. 분사량이 증가할수록 플룸과 물 입자의 접촉면적이 증가하여 기화량이 증가한다. Case

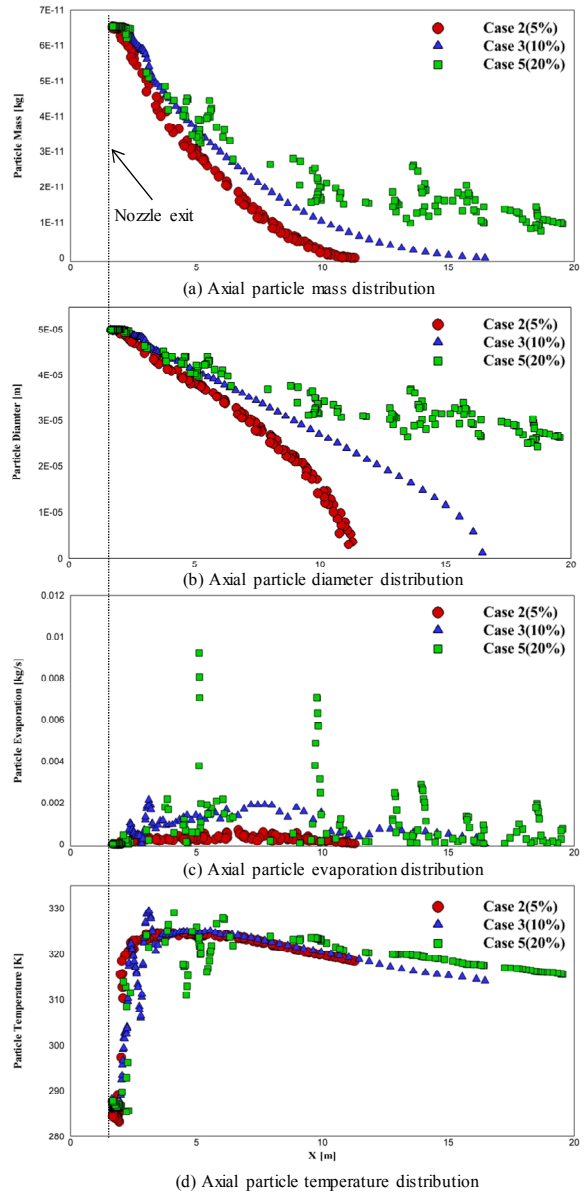


Fig. 9 Axial particle distribution of nozzle

2 (5%)는 플룸이 안정적이고 기화량이 일정하나, Case 5 (20%)는 반복적인 충돌로 불안정한 플룸 형태이고 기화량이 불규칙하다. Fig. 9(d)를 보면 분사량과 관계없이 물 입자와 플룸 입자가 처음 만났을 때, 입자 온도가 가장 높으며 이후 서서히 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 노즐 출구로부터 거리가 멀어지면서 물 입자의 기화로 인해 지속적으로 플룸 온도가 냉각되기 때문으로 판단된다. 분사량에 따른 입자의 최대 온도 및 온도 저감률은 큰 차이가 없으나, 플룸이 불안정

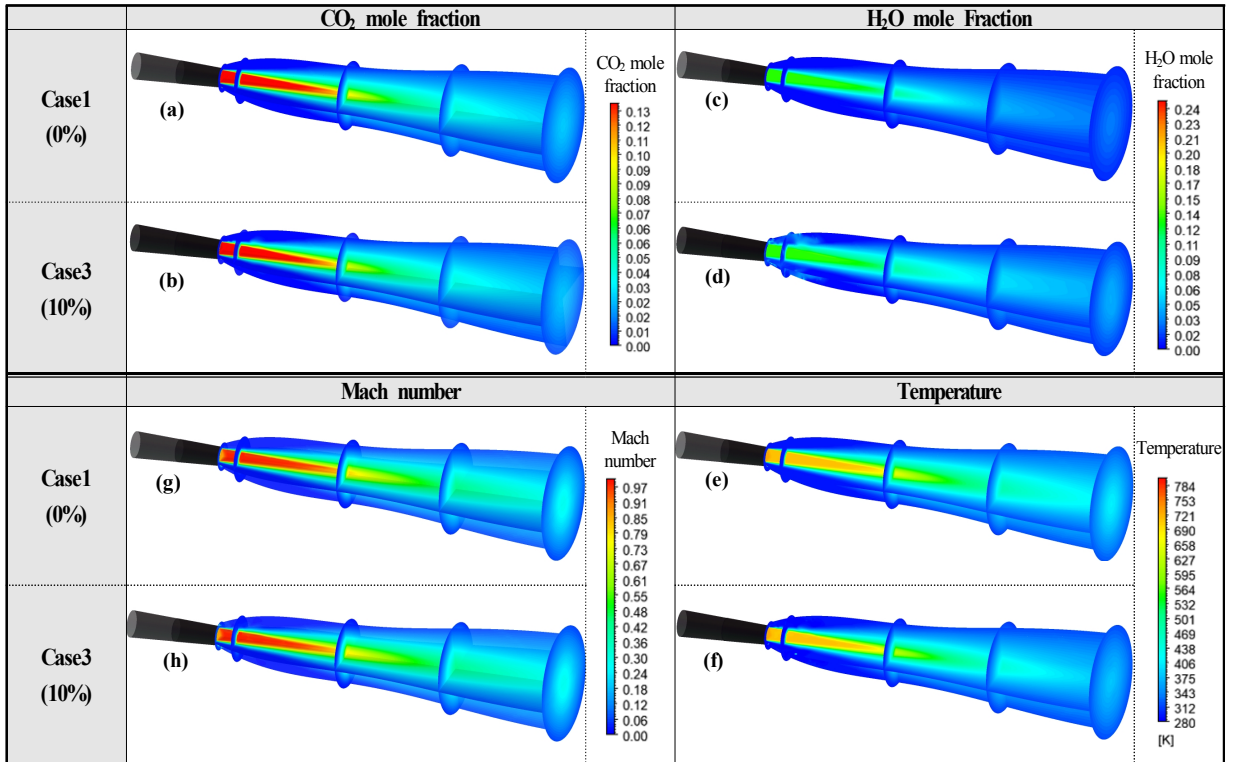


Fig. 10 Mole fraction of CO₂ and H₂O, mach number, temperature distribution

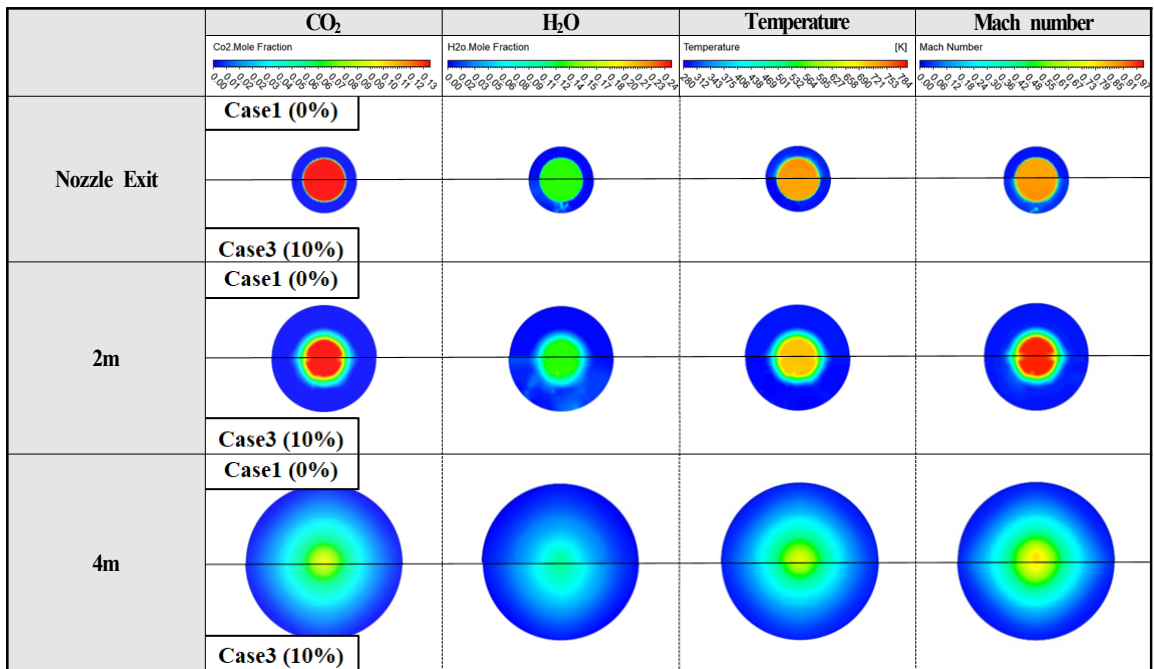


Fig. 11 Mole fraction of CO₂ and H₂O, mach number, temperature distribution

한 Case 5 (20%)의 축방향 도메인 3~6 m 구간에서 입자의 온도가 급격하게 변하는 것을 확인하였다. 이는 입자와 플룸 간 반복적인 충돌에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 물 분사 적용에 따른 3D 해석결과

앞서 적절한 분사 범위를 선정하고, 분사량에 따른 유동 및 입자의 변화에 대해 전반적으로 살펴보았다. 해석결과 분사율이 15% 이상일 때, 불안정성으로 인해 플룸이 비대칭으로 형성되고 이로 인한 추력손실이 예상되었다. 따라서 플룸이 상대적으로 안정하고 대칭인 형태를 띠는 분사율 10%를 물 분사 해석 조건으로 설정하여 물분사 유무에 따른 유동특성을 비교 분석하였다. 물분사 유무에 따른 노즐 출구에서의 추력은 물분사를 적용하지 않았을 때 1160 lbf, 물분사를 적용하였을 때 1159 lbf로 나타났다. 따라서 물분사 유무에 따라 추력 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 분사적용에 따른 이산화탄소 분자와 물 분자의 물분율, 마하수, 온도를 3D 분포로 나타낸 것이다. 이산화탄소 분자의 물분율을 나타내는 Fig. 10(a), (b) 모두 2D 분포 결과와 동일하게 분사량과 관계없이 모두 0.13이 최댓값으로 나타났다. 물 분자 물분율을 보면 분사기법이 적용되지 않은 Fig. 10(c)에 비해 Fig. 10(d)의 플룸 길이가 길고, 최댓값이 0.11 높은 것을 확인할 수 있다. 온도 분포를 살펴보면 플룸의 길이는 분사가 적용되지 않은 Fig. 10(e)가 Fig. 10(f)보다 길고, 넓게 확산한 것을 볼 수 있다. 마하수는 분사율에 따른 차이가 미미한 것으로 나타났다. Fig. 11은 노즐 입구에서부터 거리에 따른 2D 분포를 나타낸 것이다. 노즐 출구(1.639 m), 2, 4 m에 따른 이산화탄소와 물 분자의 물분율, 마하수 및 온도의 단면을 각각 제시하였다. 이산화탄소 분자 물분율의 경우 2D 단면분포에서 큰 변화가 없고, 물 분자의 물분율은 앞서 확인한 바와 같이 물분사 적용함에 따라 각 단면에서 농도가 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 2 m에서 2D 온도 분포를 살펴보면, 물 분사에 의해 고온부가 기존의 원형에서 형상이 변형된 것으로 판단되며, 물이 직접 분사되는 아랫부분에서 가장 많은 변형이 발생하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 액체 분사기법 적용에 따른 유동 및 입자의 특성을 파악하기 위해 다상유동 모델인 DPM 기법을 적용하여 물 입자 분사량에 따른 전산해석을 수행하였다. 배기가스 질량 유량을 100%로 산정하였을 때, 플룸의 온도 저감률을 통해 적절한 분사유량 범위를 선정하였으며, 분사량에 따라 총 6가지 조건에서 해석을 진행하였다. 이후 플룸의 형상이

대칭적이면서 최대한의 온도 저감 효과를 가진 해석조건을 선정하였다. 선정된 해석조건을 적용하여 물 분사 유무에 따른 3D 해석을 진행하였다.

우선 배기플룸 유량을 100%로 선정하고 샘플링 연구를 통해 온도 저감률을 확인하였다. 샘플링 연구 결과 분사율 25%까지 급격한 온도 감소율이 나타났으며, 이에 따라 분사범위를 0~25%로 선정하고 분사량에 따른 유동 및 입자의 특성을 연구하였다. 그 결과 분사량이 증가할수록 플룸 온도가 감소하는 것으로 나타났다. 분사량 10%까지 플룸이 대칭, 안정적이며, 15%부터 비대칭, 불안정성을 보인다. 이는 Kelvin-Helmholtz 불안정성 메커니즘에 의한 것으로 판단된다. 분사율 20% 이후 온도 감소량의 차이가 거의 없는데 이는 최적량 이상의 물을 분사하여 온도감소량이 미미한 것으로 판단된다. 또한 분사량 5%, 10%, 20%에서의 입자의 거동을 보았을 때, 분사량이 증가할수록 질량과 지름의 감소율이 줄어드는 것을 확인하였다.

플룸이 안정하면서 냉각효과가 뛰어난 분사량 10%를 해석 조건으로 선정하여 물분사 적용 유무에 따른 3D 해석을 진행하였다. 그 결과 물분사 적용 유무에 따라 추력 차이가 거의 없으며, 물 분사기법 적용 시, 물 분자의 물분율은 증가하고, 고온부의 플룸 길이는 줄어드는 것을 확인하였다.

항공기에서 물 분사를 적용하기 위해서는 중량, 물 온도 유지, 증기로 인한 가시화 등 여러 이슈를 가지고 있지만, 물 분사를 통한 온도 감소 효과는 상당한 것으로 나타나, 온도의 영향이 지배적인 IR신호 또한 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 농도 조절을 통해 차폐를 이용한 IR신호 저감 효과도 있을 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 추후 분사 기법을 이용한 IR신호 저감기술 연구의 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 2011, Moon, H., Yang, Y.R., Chun, S.H., Choi, S.M., Myong, R.S. and Cho, T.H., "Computational of Flow Field and Infrared Signature in Aircraft Exhaust System for IR Reduction Design," *Journal of the Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.39, No.7, pp.652-659.
- [2] 2011, Chun, S.H., Yang, Y.R., Moon, H., Myong, R.S. and Cho, T.H., "Computational Investigation of Nozzle Flow

- Fields at Various Flight Conditions for Aircraft Infrared Signature Analysis," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.3, pp.15-21.
- [3] 2018, Lee, J.H., Lee, H.J., Yang, B.J., Myong, R.S. and Kim, W.C., "Numerical Analysis of Thermal Flow Field According to Shape of Exhaust Nozzle of UCAV and Jet On/Off," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.23, No.1, pp.77-85.
- [4] 2019, Chae, J.H., Lee, J.H., Lee, J.W., Ha, N.K., Kim, D.G., Jang, H.S. and Myong, R.S., "Computational Analysis of Effects of Thermal Flow Field and Chemical Components on the IR Signature in the Exhaust Plume of a Micro Jet Engine," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.24, No.3, pp.101-111.
- [5] 2016, An, C.H., Kang, D.W., Baek, S.T. and Myong, R.S., "Analysis of Plume Infrared Signatures of S-Shaped Nozzle Configurations of Aerial Vehicle," *Journal of Aircraft*, Vol.53, No.6, pp.1768-1778.
- [6] 2018, Jo, H.N., "The Status of Stealth Technology for the Aircraft Propulsion System," *The Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Vol.26, No.1, pp.532-535.
- [7] 2020, Nageswara Rao, A. and Kushari, A., "Underexpanded Supersonic Jets from Elliptical Nozzle with Aft Deck," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.36, No.1, pp.138-152.
- [8] 2019, Cheng, W., Wang, Z., Zhou, L., Sun, X. and Shi, J., "Investigation of Infrared Signature of Serpentine Nozzle for Turbofan," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.33, No.1, pp.170-178.
- [9] 1988, Weisrose, S.A., Davidson, R. and Lindner, M., "Aerosol Effects on Jet-Engine IR Radiation," *Infrared Technology XIV*, Vol.972, pp.144-160.
- [10] 2005, Guamieri, J.A., "Thermal Signature Reduction Through Liquid Nitrogen and Water Injection," Texas A&M University, Doctoral Dissertation.
- [11] 2016, Tyagi, A. and Subbarao, P.M.V., "Feasibility Studies on Use of Water Mist for Plume Infrared Suppression," *International Journal of Engineering Invention*, Vol.5, No.3, pp.33-44.
- [12] 2015, Li, J., Jiang, Y., Yu, S. and Zhou, F., "Cooling Effect of Water Injection on a High-Temperature Supersonic Jet," *Energies*, Vol.8, No.11, pp.13194-13210.
- [13] 2019, Eom, H.O., Bae, J.Y., Lee, N.K., Kim, J.H., Nam, J.Y., Jo, H.N. and Cho, H.H., "Intake Performance Characteristics according to S-duct Cross Section Shape in UAV," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.23, No.5, pp.107-114.
- [14] 2019, Noh, S.Y., Bae, J.Y., Kim, J.H., Nam, J.Y., Jo, H.N. and Cho, H.H., "Analysis of Flow and Infrared Signature Characteristics according to UCAV Nozzle Shape," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.23, No.5, pp.27-35.
- [15] 2018, Jung, S.M. and Jo, H.N., "Recent Studies in IR Signature Suppression using Water Spray," *The Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Vol.26, No.2, pp.411-415.
- [16] 2019, Jung, S.M., Jin, J.Y. and Baek, C.W., "An Analysis of the Mass Flow Rate of Water Sprayed to Reduce IR Signature of an Exhaust Gas," *The Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Vol.27, No.2, pp.49-52.
- [17] 2019, Lee, C.R. and Jung, S.M., "Conceptual Design of a Water Spray System for Reducing IR Signature of Exhaust Gas," *The Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Vol.27, No.1, pp.717-720.
- [18] 2018, Ejtehadi, O., "A Second-order Boltzmann-based Continuum Model for Simulation of Dusty Gas Flows in Non-equilibrium Using a Discontinuous Galerkin Method," Gyeongsang National University, Doctoral Dissertation.
- [19] ANSYS FLUENT User's Manual v19.1.
- [20] 1996, Aggarwal, S.K., Yapo, J.B., Grinstein, F.F. and Kailasanath, K., "Numerical Simulation of Particle Transport in Planar Shear Layers," *Computers & Fluids*, Vol.25, No.1, pp.39-59.