論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(7), 568-575(2016)
DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.7.568
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

복사 데이터베이스를 활용한 항공기 배기 플룸 IR 신호 해석

조평기*, 구본찬*, 백승욱**, 김원철***

Infrared Signature Analysis of the Aircraft Exhaust Plume with Radiation Database

Pyung Ki Cho*, Bonchan Gu*, Seung Wook Baek** and Won Cheol Kim***
Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology*,**
Agency for Defense Development***

ABSTRACT

For the combat survivability, an infrared signature emitted from aircraft is needed to be predicted and analyzed. In this study, we studied the infrared signature from the exhaust plume from the viewpoint of Infrared(IR) detector. The Line-By-Line method using the radiation database is used for radiative property, and radiative intensity analysis is conducted along 1-D line of sight based on the radiative property. The numerical thermo-fluid field for the plume is conducted by ANSYS FLUENT, while setting the lines of sight having the different detection angle on the thermo-fluid field. We found the high IR signature on the line of sight passing through the locally high temperature region of the plume inside, and the strongest signature from the line of sight toward the nozzle surface. Based on this, it confirms the influence of the surface radiative emission on the infrared signature.

초 록

항공기로부터 방사되는 IR 신호(Infrared : IR)는 전투 생존성 관점에서 예측과 분석이 필요하다. 본 연구에서는 배기 플룸에서 발생하는 IR 신호에 대해 IR 탐지기 관점에서 신호 예측을 수행하였다. 복사 데이터베이스와 이를 활용하는 Line-By-Line 기법을 적용하여 복사 물성치를 해석하고 이를 바탕으로 1차원 Line Of Sight(LOS)에 대해 복사 강도를 해석하였다. 상용 프로그램을 이용하여 노즐의 배기 플룸 열유동장을 해석하였고, 이 플룸 열유동장에 IR 탐지기 관점에서 서로 다른 탐지 각도에 대한 LOS를 설정하여 이에 대한 IR 신호 해석을 수행하였다. 해석을 통해 플룸 내부의 국부적으로 높은 온도 영역을 지나는 LOS에서 강한 IR 신호가 확인되었다. 또한 노즐 벽면을 포함한 LOS에서 가장 강한 IR 신호가 확인되었으며, 이를 통해 고체 벽면에 의한 복사 방사가 IR 신호에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Key Words : Infrared Signature(IR 신호), Radiation Database(복사 데이터베이스), Line-By-line Method(흡수선 누적 모형), Radiation Property(복사 물성치), Spectral Radiant Intensity(파장별 복사강도), Plume(플룸)

† Received : November 30, 2015 Revised : June 7, 2016 Accepted : June 8, 2016
** Corresponding author, E-mail : swbaek@kaist.ac.kr

Ⅰ. 서 론

현대전(modern war)에서 전투기, UAV과 같은 전술항공기의 활용성과 운용범위가 증대됨에 따라 이들의 전투 생존성(combat survivability)에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 전투 생존성을 위협하는 대표적 요인은 바로 항공기에서 발생하는 Infrared(IR) 신호이다. 항공기에서 발생하는 IR 신호 중에서 추력 발생을 위한 수축-팽창 노즐로부터 생성된 배기 플룸은 높은 온도의 연소가스로 구성되어 있어 매우 강한 IR 신호를 방사한다. 이렇게 강한 IR 신호들은 IR 탐지기에 의해 쉽게 탐지되어 열 추적 미사일과 같은 항공기 위협 요소에 의한 항공기 손실 가능성을 증가시킨다.

이러한 이유로 항공기의 저피탐성 확보를 위해 항공기에서 방사되는 IR 신호를 예측하고 분석하려는 다양한 연구들이 수행되고 있다. Mahulikar et al. [1]는 전투 생존성 관점에서 항공기 IR 신호의 예측과 분석을 수행하였다. Yi et al. [2]는 항공기 후방 동체에 복사 차폐막을 적용하여 IR 신호의 변화를 확인하였다.

IR 신호는 복사 신호에서 IR 파장 영역에 해당하는 신호를 의미하기 때문에 복사 현상에 대한 이해가 필요하다. 복사 현상 해석에 있어 매질의 복사 특성을 나타내는 복사 물성치의 확보는 필수적이다. 1960년대 대기의 복사 물성치를 계산하기 위해 개발된 복사 데이터베이스는 다양한 복사 현상의 해석적 연구와 실험적 연구에 사용되고 있다. Nam et al. [3] 은 H_2O, CO_2 뿐만 아니라 CO, NO와 OH 분자에 대해 복사 데이터베이스를 활용하여 복사 물성치를 해석하였다. 또한 복사 데이터베이스의 해석결과와 실험적 결과를 비교하는 연구들도 수행되었다. 대표적으로 Depraz et al. [4] 는 CO_2의 main band에서 복사 물성치 측정 결과와 고해상도 복사 데이터베이스 CDSD-4000을 이용한 해석결과와 비교를 수행하였다. 복사 데이터베이스에 관한 다양한 연구들이 수행되고 있음에도 불구하고 현재 항공기 IR 신호 예측에 이를 활용하는 연구들은 부족한 상황이다.

본 연구에서는 항공기 배기 플룸에서 방사되는 IR 신호의 수치적 연구를 위해 복사 데이터베이스와 이를 활용하는 Line-By-Line(LBL) 기법을 적용하여 복사 물성치를 계산하였다. 계산된 복사 물성치를 바탕으로 Line Of Sight(LOS)에 대해 layered integration 기법을 사용하여 복사 신호를 해석하였다. 이를 통해 IR 탐지기 관점에서 노즐 표면의 고체 복사 방사를 고려한 배기 플룸의 IR 신호 스펙트럼의 예측과 분석을 수행하였다.

Ⅱ. 본 론

2.1 복사 물성치 모델링

복사 열전달 및 신호를 해석하기 위해서는 매질의 흡수계수(absorption coefficient), 방사율(emissivity), 투과율(transmissivity)과 같은 복사 물성치에 대한 정보가 필요하다. 복사 물성치를 상수 값으로 고려하는 회색 가스(gray gas) 가정을 사용해 복사 열전달 및 신호를 해석하기도 하지만, 실제 기체는 비회색 가스(non-gray gas)로 온도, 압력, 파장, 기체의 종류에 따라 고유한 복사 물성치를 갖는다. 그러므로 IR 복사 신호 해석에 앞서 특정 온도, 압력, 파장, 화학종 몰분율에 따른 매질의 복사 물성치 정보가 확보되어야 한다. 현재까지 비회색 가스의 복사 물성치를 해석하기 위한 많은 기법들이 개발되었고, 이러한 기법들은 IR 신호 해석에 있어 고려되어야 할 매우 중요한 요소이다. 이 기법들 중 복사 데이터베이스를 이용하는 LBL 기법이 가장 정확한 것으로 알려져 있어, 본 연구에서는 복사 물성치 예측 기법으로 LBL 기법을 이용하여 해석을 수행하였다.

2.1.1 복사 데이터베이스

복사 데이터베이스는 복사 물성치 해석을 위한 분광상수(spectroscopic parameter)를 제공한다. 대표적인 복사 데이터베이스로는 HITRAN (High Resolution Transmission), HITEMP (High-Temperature Molecular Spectroscopic Database) 등이 있다[5, 6]. HITRAN은 H_2O, CO_2, CO 등 총 47가지 분자의 분광상수를 제공하며 원래의 개발 목적인 대기 조건에 적합하기 때문에 온도 1500K 이상의 조건에서 상대적으로 낮은 정확도를 갖는다. HITEMP는 H_2O, CO_2, CO, NO, OH 총 5가지 분자의 분광상수를 제공하며 H_2O, CO_2에 대해 상당히 많은 수의 에너지 천이를 포함하고 있다. 특히 저온에서 활성화되지 않고 고온에서만 활성화되는 에너지 천이를 포함하고 있기 때문에 HITRAN과 다르게 1500 K 이상의 고온 영역에서도 높은 정확도를 갖는다[7]. 가장 먼저 개발된 HITRAN을 따라 HITEMP, CDSD 등 다른 복사 데이터베이스도 같은 데이터 형식을 갖는다. 데이터베이스에서 1개의 행은 해당 파수에서의 에너지 천이를 나타

Table 1. Radiation database

Variable	No.	Meaning	Unit
Mol	1	Molecule number	-
I	2	Isotopologue number	-
ν'	3	Transition wavenumber	cm^{-1}
$S_{\nu'}$	4	Line Intensity	cm^{-1}/(molecule cm^{-2})
γ_{air}	6	Air-broadened half-width	$cm^{-1}atm^{-1}$
γ_{self}	7	Self-broadened half-width	$cm^{-1}atm^{-1}$
E_l	8	Lower-state energy	cm^{-1}
n	9	Temperature-dependence exponent of γ_{air}	-
δ	10	Air pressure-induced shift	$cm^{-1}atm^{-1}$

낸다. Table 1에 19개의 분광 선 상수(spectral line parameter) 중 9개의 상수에 대한 정보를 정리하였다. No.는 데이터베이스에서 횡방향의 표기 순서이다. Mol은 분자 종류를 나타내는 ID 넘버이다. H_2O는 1, CO_2는 2이며, HITRAN은 47인 SO_3까지 넘버링 되어 있다. I 는 동위원소에 대한 ID 넘버로 자연에서 풍부한 동위원소 순으로 번호가 할당되어 있다. ν'는 에너지 천이가 일어나는 파수(wavenumber)이며 $S_{\nu'}$는 해당 단일분자의 에너지 천이에 의해 발생한 선세기(line intensity or line strength)이다. γ_{air}과 γ_{self}는 각각 대기효과, 자가충돌에 의한 선폭증가의 반값반폭(Half Width at Half Maximum, HWHM)이다. E_l은 에너지 천이가 발생했을 때 낮은 에너지 준위이며, n은 대기효과에 의한 선폭증가의 온도에 대한 영향을 반영하기 위한 계수, δ 또한 대기효과에 의한 선폭증가에서 압력에 의한 파수 이동을 계산하기 위한 상수이다. 위 4가지 선폭증가와 관련된 상수들은 선폭증가 함수 계산에 활용된다. 복사 데이터베이스가 제공하는 분광선 상수들은 기준온도 T_0는 296 K, 기준압력 1 atm에서의 정의된 값들이다.

2.1.2 복사 데이터베이스 활용 기법

LBL 기법은 복사 데이터베이스를 이용하여 복사 물성치를 계산하는 기법으로 특정 파수에 대한 복사 물성치를 계산하기 위해서는 복사 데이터베이스가 제공하는 모든 에너지 천이를 고려해야 한다. 온도 T에 대한 선세기는 다음의 식으로부터 계산한다.

$$S_{\nu'}(T) = S_{\nu'}(T_0)\frac{Q(T_0)}{Q(T)}\frac{e^{-E_l hc/kT}}{e^{-E_l hc/kT_0}}\frac{1-e^{-h\alpha'/kT}}{1-e^{-h\alpha'/kT_0}} \quad (1)$$

$$Q(T) = Q_{rot}(T)\,Q_{vib}(T) \quad (2)$$

$$Q_{rot} = \frac{1}{2}\frac{kT}{hcB_e} \quad \text{for } CO_2$$

$$Q_{rot} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{A_e B_e C_e}\left(\frac{kT}{hc}\right)^3} \quad \text{for } H_2O$$

$$Q_{vib} = \prod_{n=1}^{m}\left[1-\exp\left(-\frac{hc\nu_n}{kT}\right)\right]^{-d_n}$$

여기서 $Q(T)$는 온도에 대한 분배함수(total internal partition function)로 일반적으로 각 모드 별 에너지 준위를 고려한 Direct sum에 의해 계산되지만 많은 계산 시간이 소요되어 CO_2와 H_2O에 대해서 조화 진동자(harmonic oscillator)와 강체 회전자(rigid rotator) 가정을 사용하여 계산을 수행하였다[8, 9]. CO_2는 직선형 분자이며 H_2O는 비직선형 분자로서 이러한 서로 다른 분자구조로 인해 식 (2)에서처럼 다른 회전 분배함수를 갖는다. H_2O의 회전 분광 상수는 각각 27.379, 14.5844, 9.5256, CO_2는 0.39162이다. 두 분자 모두 3가지 진동 모드를 가지며, H_2O의 축퇴도(d_n)는 3가지 모드에서 모두 1이며, CO_2의 경우 1, 2, 1이다. 각 모드별 진동 상수는 Table 2에 나타내었다.

대표적인 복사 물성치인 흡수계수는 다음과 같이 계산된다. ν는 계산하고자 하는 위치의 파수를 나타낸다.

$$\alpha_\nu = \sum_{isp}^{nsp}\sum_{\nu'} S_{\nu',isp}(T)\,n_{isp}\,\phi(\nu-\nu') \quad (3)$$

흡수계수는 온도 T에서의 선 세기와 선폭증가 함수(line broadening function)의 곱의 합을 통해 계산 할 수 있다. 총 n개의 기체 성분(nsp)으로 구성된 혼합 기체의 경우 각 기체 성분(isp)의 부분압력을 고려하여 각각의 기체에 해당하는 흡수계수를 모두 더함으로써 계산이 가능하다. n_{isp}는 해당 기체 성분의 분자 수밀도를 나타낸다.

선폭증가함수는 로렌츠(Lorenz)와 도플러(Doppler) 선 모양을 합성곱(convolution)으로 표현한 포크트 선 모양(Voigt line shape)을 사용하

Table 2. Vibration constant

Mol.	ν_1	ν_2	ν_3
H_2O	3656.65	1594.78	3755.79
CO_2	1341.54	667.40	2359.16

였다. 포크트 선 모양은 이상적분 형태의 식으로 표현되기 때문에 많은 계산시간이 소요된다. 본 연구에서는 계산 효율성을 고려하여 근사 포크트 선 모양 함수를 사용하여 보다 효율적으로 포크트 선 모양 함수를 계산하였다[10]. 포크트 반값 반폭 γ_V는 로렌츠 반값반폭 γ_L과 도플러 반값반폭 γ_D으로 표현되며 포크트 선 모양 함수는 다음과 같이 표현된다. 식 (6)의 M은 분자량, u는 원자 질량 단위이다.

$$\begin{aligned}\phi_V(\nu-\nu',\gamma_L,\gamma_D) &= \phi_V(\nu-\nu',\gamma_V) \\ &= c_L\phi_L(\nu-\nu',\gamma_V)+c_D\phi_D(\nu-\nu',\gamma_D) \\ &= c_L\frac{1}{\pi}\frac{\gamma_V}{(\nu-\nu')^2+\gamma_V^2} \\ &\quad + c_D\frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi\gamma_V^2}}exp\left[-\ln 2\frac{(\nu-\nu')^2}{\gamma_V^2}\right]\end{aligned} \tag{4}$$

$$\phi_L(\nu-\nu') = \frac{1}{\pi}\frac{\gamma_L}{\pi(\nu-\nu')^2+\gamma_L^2} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\gamma_L &= \left(\frac{T_0}{T}\right)^n\gamma_{air}(P_0,T_0)(P-P_s) \\ &\quad +\gamma_{self}(P_0,T_0)P_s\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\phi_D(\nu-\nu') = \\ &\left(\frac{1}{\gamma_D}\right)\left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)\exp\left[-\ln 2\frac{(\nu-\nu')^2}{\gamma_D^2}\right]\end{aligned} \tag{6}$$

$$\gamma_D(\nu-\nu') = \frac{\nu'}{c}\sqrt{\frac{2kT\ln 2}{Mu}}$$

2.2 복사 전달 방정식

기체 매질에 의한 복사 에너지의 흡수, 방사, 산란을 포함하는 복사 전달 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{1}{c}\frac{\partial I_\nu}{\partial t}+\frac{\partial I_\nu}{\partial s} &= j_\nu-\alpha_\nu I_\nu-\sigma_{s\nu}I_\nu \\ &\quad +\frac{\sigma_{s\nu}}{4\pi}\int_{4\pi}I_\nu(\hat{S}_i)\phi_\nu(\hat{S}_i,\hat{S})d\Omega_\nu\end{aligned} \tag{7}$$

항공기 추진기관은 로켓 추진기관과 다르게 완전 연소로 인해 그을음(soot)과 같은 고체 입자의 배출이 적어 복사 산란 특성을 무시할 수 있다. 산란 특성과 시간에 대한 복사 강도의 변화를 무시한 복사 전달 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial I_\nu}{\partial s} = \alpha_\nu I_{b\nu}-\alpha_\nu I_\nu = \alpha_\nu(I_{b\nu}-I_\nu) \tag{8}$$

복사 열유속 벡터, $I_\nu(s)$의 경로 s에 따라 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}I_\nu(s) &= I_\nu(0)e^{\left[-\int_0^s\alpha_\nu(s'')ds''\right]} \\ &\quad +\int_0^s I_{b\nu}(s')e^{\left[-\int_{s'}^s\alpha_\nu(s'')ds''\right]}\alpha_\nu(s')ds'\end{aligned} \tag{9}$$

Layered integration 기법은 LOS가 통과하는 매질은 여러 매질 층의 연속으로 구성되어 있고 특정 길이를 갖는 하나의 매질 층은 층 내에서 국부적인 열평형(local thermodynamic equilibrium)을 이룬다고 가정한다[11]. 이를 통해 n번째 매질층에 대한 복사 강도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}I_{\nu,n}(S_n) &= I_{\nu,n-1}(s_{n-1})\tau_{\nu,n}+I_{b\nu,n}(T_n)(1-\tau_{\nu,n}) \\ &= I_{\nu,0}(0)\xi_0+\sum_{p=1}^{n}I_{b\nu,p}(T_p)(1-\tau_{\nu,p})\xi_p \\ \xi_p &= \prod_{k=p+1}^{n}\tau_{\nu,k}\ ,\ \xi_n=1\end{aligned} \tag{10}$$

여기서 τ_ν는 해당 파수에 대한 투과율(transmissivity)을 나타낸다. 기체 매질 층에 입사하는 복사 에너지는 Beer's 법칙에 따라 감쇠되며 흡수계수 α_ν와 광학길이(optical length) l로 나타낼 수 있다.

$$\tau_\nu = \exp(-\alpha_\nu l) = 1-\epsilon_\nu \tag{11}$$

2.3 해석 코드 검증

플룸의 IR 신호를 해석하기에 앞서 복사 물성치와 복사 강도에 대한 해석 코드의 검증이 필수적이다. 검증은 선행 연구자들의 실험 또는 해석 연구 결과와 비교를 통해 수행되었다.

복사 데이터베이스를 활용하는 LBL 기법을 검증하고자 Jansons et al. [12]의 해석 결과와 비

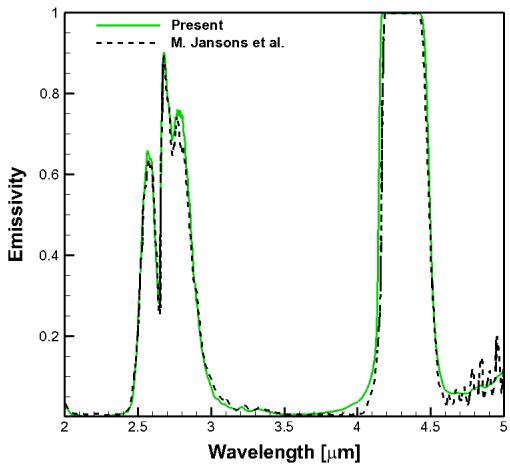

Fig. 1. Emissivity of mixture

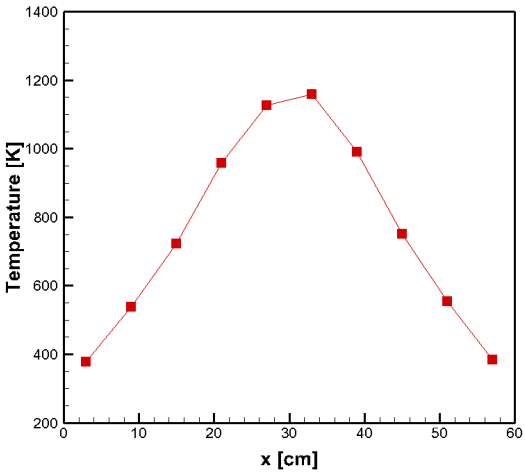

Fig. 2. Temperature distribution

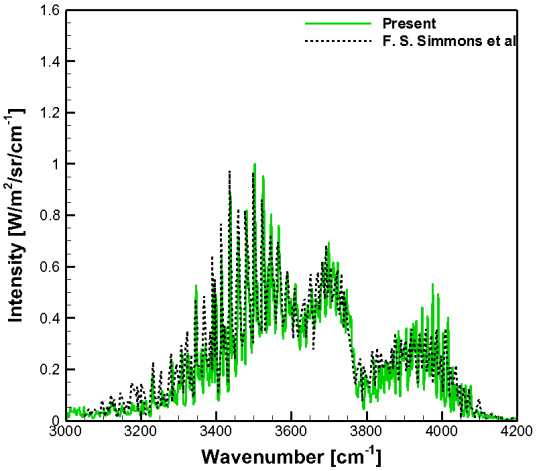

Fig. 3. Radiative intensity of mixture

교하였고 Fig. 1은 비교 결과를 보여 주고 있다. 선행 연구의 해석 조건과 동일한 조건에서 해석을 수행하였다. 활용한 복사 데이터베이스는 선행 연구자와 동일하게 HITRAN으로 사용하였으며 온도 800 K, 압력은 1 atm, 광학길이 2 cm에서의 CO_2 9.5%, H_2O 19%, N_2 71.5%로 구성된 혼합기체에 대한 방사율을 계산하였다.

혼합기체의 복사 강도 해석 결과의 적합성 검증을 위해 Simmons et al. [13]의 실험 측정 결과와 비교하였다. 선행 연구자는 총 60 cm의 광학길이를 갖는 챔버를 각각 6 cm의 동일한 길이를 갖는 10개의 셀로 구성하여 각각의 셀마다 서로 다른 온도를 설정해 복사 강도 측정 실험을 수행하였다. Fig. 2는 혼합기체의 위치에 따른 온도분포를 나타낸다. 실험 조건은 압력 1 atm, 광학길이 60 cm 에서 CO_2 3.7%, H_2O 7.1%, N_2 89.2% 이며, Fig. 3은 본 연구의 해석 결과와 선행 연구자의 측정 결과를 비교 결과 그래프이다.

선행 연구자들의 해석 또는 실험 결과와 본 연구의 해석 결과가 잘 일치함을 Fig. 1과 3을 통해 확인할 수 있다. 이를 통해 본 연구에 활용한 코드의 신뢰성과 적합성을 입증하였고, 해석 코드를 실제 플룸 열유동장에 확장하여 적용할 수 있다고 판단하였다.

2.4 플룸 IR 신호 해석

플룸 IR 신호 해석을 위해 팽창비는 1.2, 노즐 목 면적은 0.47743 m^2을 갖는 F-16 급 엔진의 수축-팽창 노즐을 사용하였다. 상용 프로그램인 ANSYS FLUENT 14.0을 이용해 열유동 해석을 수행하였으며 비행 조건은 고도 5 km에서 마하 0.9로 설정하였다. 노즐 입구에서는 Jet-A 연료($C_{11}H_{22}$)가 식 (12)와 같이 1-step의 완전 연소하여 몰 퍼센트 CO_2 13%, H_2O 13%, N_2 74%로 구성된 연소 가스를 방출하고 외부 자유류는 해당 고도의 일반 대기 성분과 동일하다고 가정하였다.

$$C_{11}H_{22} + 16.5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 11CO_2 + 11H_2O + 62.04N_2 \quad (12)$$

Figure 4와 5는 플룸의 온도 분포와 CO_2 몰분율 분포를 보여주고 있다. 노즐 목 직후에는 노즐 내의 경사 충격파로 인해 불연속적인 온도 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다. 팽창비가 낮아 노즐 출구를 지난 후에는 플룸 진행 방향으로 온도분포가 일정하게 감소하는 것처럼 보이지만, 플룸 중앙부에 국부적으로 온도가 높은 영역이

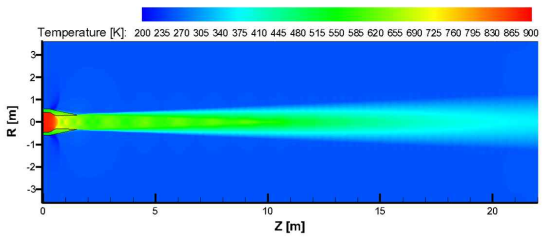

Fig. 4. Temperature distribution

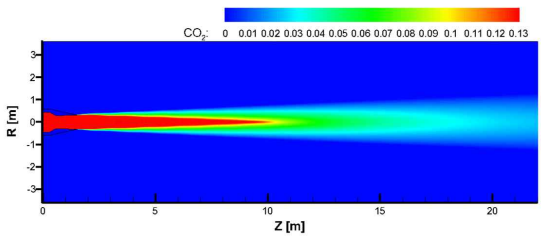

Fig. 5. Mole fraction of CO_2

존재한다. CO_2 몰분율은 플룸 진행 방향으로 갈수록 감소하며 H_2O는 매우 유사한 몰분율 분포를 갖는 것을 확인하였다. 이러한 분포를 갖는 이유는 노즐 입구 조건으로 CO_2와 H_2O의 몰분율을 동일하게 설정하였고, 자유류 영역에서 CO_2와 H_2O의 몰분율이 매우 작기 때문이다.

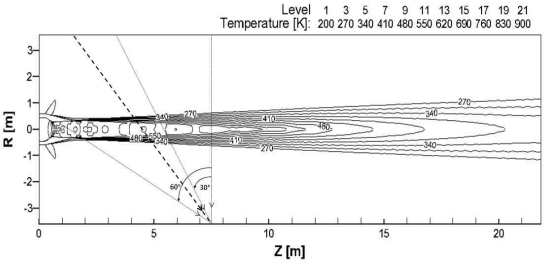

Fig. 6. Lines of sight at the plume

해석된 노즐 플룸의 열유동장을 바탕으로 IR 신호를 해석하였으며, HITEMP-2010 복사 데이터베이스를 활용하였다. IR 탐지기 관점에 IR 신호 해석을 수행하기 위해 플룸 진행 방향으로는 노즐 입구로부터 노즐 길이 1.5 m의 5배인 7.5 m, 플룸 반경 방향으로는 3.6 m 떨어진 지점을 탐지기 위치로 고정하였다. 또한 탐지기 위치에서 탐지 각도에 따른 IR 신호를 예측하기 위해 플룸 정 측면을 관통하는 LOS와 이를 기준으로 반시계방향으로 각각 30°, 60° 회전시킨 LOS를 설정하여 총 3개의 탐지 각도에 따른 IR 신호를 해석하였다. 노즐 벽면의 IR 신호 영향을 확인하기 위해 60° LOS는 노즐 팽창부 내부를 통과해 노즐 벽면까지 설정하였다. 또한 노즐의 표면 재료는 니켈 합금으로 가정하여 노즐의 고체 방사율을 파장에 관계없이 0.87로 일정하게 설정하였다.

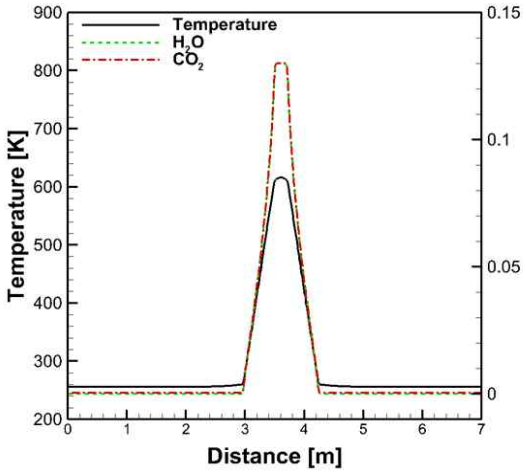

Fig. 7. Temperature and mole fraction of right side LOS at the plume

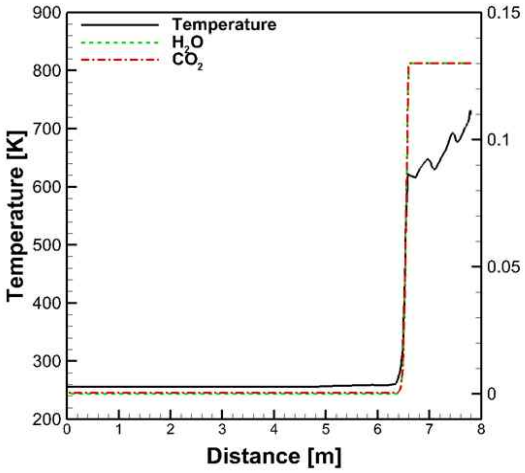

Fig. 9. Temperature and mole fraction of 60° LOS at the plume

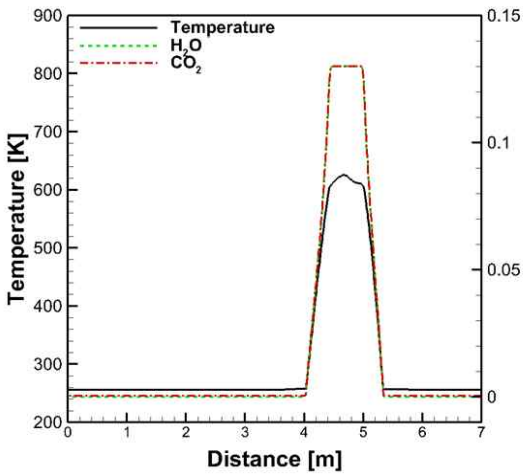

Fig. 8. Temperature and mole fraction of 30° LOS at the plume

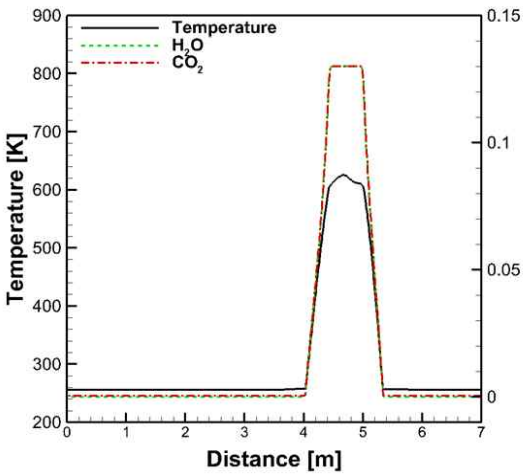

Fig. 10. Temperature and mole fraction of 40° LOS at the plume

Figure 7, 8, 9는 고정된 IR 탐지기로부터 설정된 각도 별 LOS의 거리에 대한 온도 분포와 CO_2, H_2O의 몰분율 분포를 나타낸다. 각각의 LOS는 서로 다른 길이를 가지며, 플룸 영역을 지난 이후 동일한 분포를 갖기 때문에 정 측면과 30°의 7 m까지 나타내었다. 반면에 60°의 경우 노즐 벽면까지의 거리인 7.8 m까지 분포를 나타내었다.

60° LOS의 몰분율은 다른 LOS와 비슷한 분포를 갖지만 온도 분포의 경우 증가와 감소를 반복하는 형태의 분포를 갖는다. 이러한 이유는 바로 LOS가 플룸 영역을 지나서 노즐 팽창부에 생성된 경사 충격파로 인한 불연속적인 온도 분포 영역을 관통하게 설정되었기 때문이다.

Figure 11은 3 방향 LOS의 2 - 12 μm (833 - 5000 cm^{-1}) 영역에서 파수에 대한 IR 신호 예측 결과를 나타낸 것이다. 다른 LOS와 다르게 60° LOS는 노즐 벽면을 포함하기 때문에 고체 복사 방사를 고려하여 해석하였다.

Figure 11을 통해 30°와 정 측면은 비슷한 경향의 IR 신호를 보이며 60°는 다른 형태의 매우 강한 IR 신호를 나타내고 있다. 30°와 정 측면 LOS의 IR 신호는 CO_2와 H_2O에 의해 2.7 μm (3600 cm^{-1}), 4.3 μm (2300 cm^{-1}), 5 - 8.3 μm (1200 - 2000 cm^{-1}) 영역에서 강한 IR 신호가 확인되었다. 반면에 60°의 경우 IR 신호의 경향이 고체 복사 신호의 경향과 매우 흡사한 것을 확인할 수 있다. 비교를 위해 노즐 벽면 온도 670 K에 대한 방사율 0.87의 흑체 복사 방사를 표시하였다. 약 4.3 μm (2300 cm^{-1}) 영역에서 고체 방사에 의한 강한 IR 신호가 플룸과 플룸 외부 대기에 의해 흡수되었음을 추측할 수 있다.

또한 30°의 LOS보다 정 측면의 LOS에서 더 큰 IR 신호를 확인 할 수 있다. Figure 7과 8을 통해 정 측면의 LOS에서 전체적으로 더 높은 온도 분포를 가지기 때문에 이러한 결과가 도출되었다. 정 측면 LOS에서 더 높은 온도 분포를 갖는 이유는 플룸 영역 내에서 국부적으로 높은 온도 영역을 관통하기 때문이며, 국부적으로 높은 온도 영역의 영향을 확인하기 위해 플룸 내부의 높은 온도 영역을 지나는 40°의 LOS를 설정하여 IR 신호 예측을 수행하였다.

Figure 12는 정 측면, 30°, 40°에 대한 IR 신호를 비교한 그래프이다. 정 측면 보다는 40°에서 더 강한 IR 신호를 확인할 수 있다. Figure 10은 40° LOS에 대한 온도와 몰분율 분포를 나타낸다. 온도와 몰분율 모두 정 측면 LOS보다 높으며, 이러한 이유로 더 강한 IR 신호가 예측되었다. 이를 통해 온도에 따른 IR 신호의 상관관계를 파악하고, 탐지 각도가 노즐 출구를 향함에 따라 IR 신호가 무조건적으로 증가하지 않는 사실을 확인하였다.

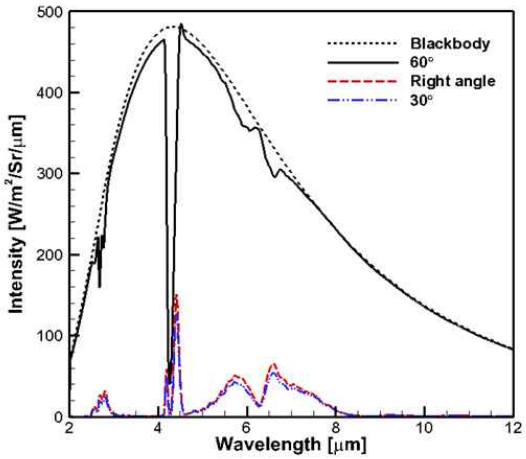

Fig. 11. Spectral radiant intensity at plume

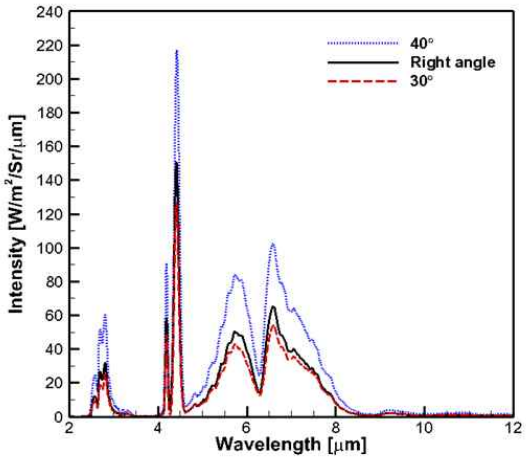

Fig. 12. Spectral radiant intensity at plume

III. 결 론

본 연구에서는 복사 데이터베이스와 이를 활용하는 복사 물성치 계산 기법인 LBL 기법을 이용하여 1차원 LOS에 대한 IR 신호 예측과 분석을 수행하였다. 프로그램 코드 검증을 위해 선행 연구자의 해석 결과 또는 측정 결과와 비교하였다. ANSYS FLUENT를 통해 계산한 노즐의 플룸 열유동장을 활용하여 플룸을 관통하는 LOS를 설정하였고 이에 대한 IR 신호의 해석이 수행되었다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 온도와 몰분율 분포에 따라 고유한 복사강

도를 보이며 LOS상의 온도와 몰분율이 높을수록 더 강한 IR 신호를 보였다.

2. 일반적으로 노즐 출구로부터 멀어질수록 온도와 CO_2, H_2O 몰분율의 감소로 인해 낮은 IR 신호가 관찰되지만, 플룸 내부의 국부적으로 높은 온도 영역에서는 상대적으로 높은 신호가 관찰되었다.

3. 노즐 표면을 향하는 LOS의 경우에는 고체 복사와 유사한 형태의 IR 신호가 관찰되었다. 이를 통해 플룸의 IR 신호에서 기체에 의한 IR 복사 방사보다 노즐 표면에 의한 IR 복사 방사가 지배적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

1) Mahulikar, S. P., Rao, G. A., Sonawne, H. R., and Prasad, S. S., “Infrared Signature Studies of Aircraft and Helicopters,“ *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, August 18 – 21. 2009, pp.26~30.

2) Yi, K. J., Baek, S. W., Kim, M. Y., Lee, S. N., and Kim, W. C., “The Effects of Heat Shielding in Jet Engine Exhaust Systems on Aircraft Survivability”, *Numerical Heat Transfer*, Part A, Vol 66, 2014, pp.89~106.

3) Nam, H. J., and Kwon, O. J., “Infrared radiation modeling of NO, OH, CO, H_2O, and CO_2 for emissivity/radiance prediction at high temperature”, *Infrared Physics & Technology*, Vol 67, Nov. 2014, pp. 283-291

4) Depraz, S., Perrin, M. Y., Ph. Rivière, Soufiani, A., “Infrared emission spectroscopy of at high temperature. Part II: Experimental results and comparisons with spectroscopic databases,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol 113, Jan. 2012, pp.14~25.

5) Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. C., Bernath, P. F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L. R., Compargue, A. et al., “The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database”, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol 110, 2009, pp.533~572.

6) Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barber, R. J., Dothe, H., Gamache, R. R., Goldman, A., Perevalov, V. I., Tashkun, S. A., & Tennyson, J., “HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database,” *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,* Vol 111, Oct. 2010, pp.2139~2150.

7) Fisher, J., Gamache, R. R., Goldman, A., Rothman, L. S., and Perrin, A., “Total Internal Partition Sums for Molecular Species in the 2000 Edition of the HITRAN Database,” *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,* Vol. 82, 2003, pp.401-412.

8) Bonnie J. McBride and Sanford Gordon, “Thermodynamic Functions of Several Triatomic Molecules in the Ideal Gas State,” *The Journal of Chemical Physics*, Vol 35, Dec. 1961, pp.2198~2206.

9) Gamache, R. R., Kennedy, S., Hawkins, R., Rothman, L. S., “Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere,” *Journal of Molecular Structure*, 2000, pp. 407~425.

10) Liu, Y., Lin, J., Huang, G., Guo, Y., Duan, C., “Simple Empirical Analytical Approximation to the Voigt Profile”, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol 18, 2010, pp.666~672.

11) Ye, Q., Sun, X., Zhang, C., Shao, L. and Wang, Y., “Modeling and Simulation of Infrared Radiation from Rocket Plume at Boostiong Stage,” *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*, 2009.

12) Jansons, M., Lin, S., Rhee, K. T., “Infrared Spectral Analysis of Engine Preflame Emission”, *International Journal of Engine Research*, Vol 9, 2008, pp.215~237.

13) Simmons, F. S., Arnold, C. B., and Lindquist, G. H., “Measurement of Temperature Profiles in Flames by Emission-Absorption Spectroscopy”, *National Aeronautics and Space Administration*, 1972.