

Soot 입자를 고려한 로켓 플룸의 적외선 스펙트럼 예측

조성민^a · 남현재^b · 김덕현^c · 권오준^{a,*}

A Prediction of Infrared Spectrum of Rocket Plume with Considering Soot Particles

Sung Min Jo^a · Hyun Jae Nam^b · Duk Hyun Kim^c · Oh Joon Kwon^{a,*}^aDepartment of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea^bThe 1st R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea^cPGM R&D Lab., LIG Nex1 Co. Ltd, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: ojkwon@kaist.ac.kr

ABSTRACT

In the present study, numerical predictions of infrared spectrum of rocket plume with considering effect of particles based on approximation theories were performed by using a line-by-line radiation model with radiation databases. The high-resolution radiation databases were used to predict thermal emission spectra of gas molecules within the rocket plume regime. The particles were modeled as soot particles by using 1st term approximation of Mie theory and Rayleigh approximation. The reliability of modeled effect of soot particles using the two approximation theories was verified, and the spectral radiance of rocket plume was predicted based on the verification. The results were improved in the short wavelength range by considering the effect of soot particles.

초 록

본 연구에서는 복사 데이터베이스 기반의 LBL 모델과 근사 이론에 기초한 입자의 영향이 고려된 로켓 플룸의 적외선 스펙트럼 예측을 수행하였다. 로켓 플룸 내에 존재하는 가스 분자의 스펙트럼을 예측하기 위하여 고해상도 복사 데이터베이스를 이용하였다. 로켓 플룸 내에 존재하는 입자는 수트 입자로 모델링 하였으며 미 이론의 1항 근사 및 레일리 근사를 적용하였다. 두 이론의 적용에 대한 타당성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 로켓 플룸의 적외선 스펙트럼을 예측하였다. 수트 입자의 영향을 고려함으로써 짧은 파장 영역 내에서 향상된 로켓 플룸의 스펙트럼 예측 결과가 도출되었다.

Key Words: Radiation Database(복사 데이터베이스), Line-by-Line Model(흡수선 누적 모델), Soot Particle(수트 입자), First Term Approximation of Mie Theory(미 이론의 1항 근사), Rayleigh Approximation(레일리 근사)

Received 2 June 2015 / Revised 7 July 2015 / Accepted 10 July 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 춘계학술대회(2015. 5. 28-29,

부산 해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

 a_n, b_n : Mie scattering coefficients

c	: speed of light
E_l	: lower state energy
I_η	: spectral radiance
k	: Boltzmann constant or absorptive index
K	: Voigt function
l	: optical path length
m	: complex index of refraction
Q	: partition function
Q_{abs}	: absorption efficiency factor
Q_{ext}	: extinction efficiency factor
Q_{scat}	: scattering efficiency factor
S_η	: spectral line intensity
x	: size parameter
β_η	: spectral extinction coefficient
ϵ_λ	: spectral emissivity
η	: wavenumber
γ	: half width at half maximum
κ_η	: spectral absorption coefficient
Φ	: normalized line profile function
τ_η	: spectral transmissivity

1. 서 론

고체 또는 액체 연료의 연소를 통해 비행하는 로켓이나 유도무기의 경우 연소 생성물로부터 강한 열복사가 방출된다. 이들 열복사 중 많은 부분이 적외선(infrared) 파장 영역에 집중되며, 연소반응의 결과로 생성되는 연소생성물의 종류 및 조성에 따라 상이한 복사 에너지를 방출한다. 따라서 이들로부터 방출되는 열복사는 비행체의 탐지 또는 탐지감소 등의 전략적인 목적으로 이용될 수 있다. 특히, 열복사의 탐지에 관한 기술은 각국의 전략위성이나 조기경보시스템의 주요 부분을 담당하기 때문에 연관 분야에 대한 관심이 고조되고 있다.

열복사에 대한 정보는 복사전달방정식을 해석함으로써 얻을 수 있다. 복사전달방정식을 해석하기 위해서는 분자 및 입자의 흡수계수(absorption coefficient)를 비롯하여 다양한 분광 데이터(spectroscopic data)가 필요하다. 따라서

이러한 분자 및 입자의 분광 데이터를 도출하는 것이 중요한 관심사가 된다.

Rothman 등은 다양한 원자 및 분자에 대한 분광 상수를 포함한 복사 데이터베이스, High-resolution TRANsmission(HITRAN) 데이터베이스를 제시하였으며, 이를 바탕으로 지속적인 갱신을 통해서 고온 및 고해상도 조건에 특화된 High-TEMPerature molecular spectroscopic database(HITEMP2010)를 제시하며 복사 데이터베이스의 기준을 정립하였다[1-3].

Tashkun 등은 이산화탄소에 특화된 고해상도 복사 데이터베이스, Carbon Dioxide Spectroscopic Databank(CDSD-4000)를 제시하였으며 이를 이용하여 고온 조건에서 보다 향상된 적외선 복사 예측 결과를 제시하였다[4]. Jansons 등은 복사 데이터베이스를 이용하여 line-by-line(LBL) 모델의 결과를 계산하고 이를 실험 결과와 비교하였으며[5], Ozawa 등은 복사 데이터베이스 기반의 LBL 기법과 수트(soot) 입자의 영향이 고려된 비평형 복사 모델을 제안하였다[6].

로켓 플룸 문제 중, 많은 경우에 미연소 입자의 영향을 고려하여야 보다 정확한 복사 예측이 가능하며, 특히 고체연료의 경우 이러한 경향은 더욱 심화된다[6,7]. 로켓 플룸 문제 중 다수의 경우에 미연소 입자의 크기가 적외선 영역의 파장(wavelength)에 비하여 충분히 작다고 가정할 수 있다[8]. 이 경우 미연소 입자는 수트 입자로 대표될 수 있다. 다수의 연구자들에 의해 수트 입자에 관한 근사적인 복사 이론들이 연구되어 왔으며, 이들 중 대부분이 실험에 의한 경험적 결과에 근거하였다[9,10].

본 연구에서는 복사 데이터베이스를 활용한 LBL 모델을 이용하여 주요 연소 생성물인 수증기, 이산화탄소, 일산화탄소분자에 대한 분광 데이터를 도출하였으며, 이를 위해 최신의 고해상도 데이터베이스인 HITEMP2010과 CDSD-4000을 활용하였다. 이와 더불어 로켓 플룸 내에 존재하는 입자를 수트 입자로 모델링 하였으며 미(Mie) 이론의 1항 근사 및 레일리(Rayleigh) 근사를 적용하여 수트 입자의 광학적 특성을 관찰하고 미 이론과 비교하였다. 이를 바탕으로 복

사전달방정식을 해석하여 로켓 플룸의 스펙트럼을 예측하였다. 예측 결과들을 타 연구자의 실험 값과 비교하였으며 서로 잘 일치하는 결과가 도출되었다. 또한, 수트 입자의 영향을 고려함으로써 짧은 파장 영역에서 향상된 스펙트럼 예측 결과가 도출되었다.

2. 이 론

2.1 복사 데이터베이스 및 모델링

연소 반응에 의해 로켓 플룸 내에 존재하는 주요한 분자의 스펙트럼 예측을 위해 고해상도 복사 데이터베이스를 활용한 LBL 모델을 적용하였다. HITEMP2010 데이터베이스로부터 수증기 및 일산화탄소의 흡수계수를 도출하였으며, 이산화탄소에 대해서는 CDSD-4000 데이터베이스를 이용하였다. 위의 복사 데이터베이스에는 천이의 에너지 차이, 그에 따른 선 세기(line strength), 선 퍼짐(line broadening) 효과 등에 관한 분광 상수를 포함하고 있다.

에너지 천이에 의한 가스 분자의 흡수계수 $\kappa(\eta-\eta_0)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa(\eta-\eta_0) = S_\eta(T) n_{sp} \Phi(\eta-\eta_0) \quad (1)$$

Eq. 1에서 $S_\eta(T)$ 는 에너지 천이가 일어난 파수와 기준온도에서의 선 세기, n_{sp} 는 해당분자의 수밀도, 그리고 $\Phi(\eta-\eta_0)$ 는 선 퍼짐 효과에 따른 선폭 증가함수이다. 이때, η_0 는 선폭 증가함수의 중심 파수를 의미하며 압력 편이(pressure-shift)에 대한 보정이 고려되어 있다. 복사 데이터베이스에서는 파수 범위에 대하여, 기준온도 $T_{ref} = 296 K$ 및 기준압력 $p_{ref} = 1 atm$ 에서의 선 세기 $S_\eta(T_{ref})$ 를 제공하며 이로부터 특정 온도 및 압력에서의 선 세기는 Eq. 2와 같이 표현된다.

$$S_\eta(T) = S_\eta(T_{ref}) \frac{Q(T_{ref})}{Q(T)} \frac{e^{-E_i/kT}}{e^{-E_i/kT_{ref}}} \frac{1 - e^{-hc\eta/kT}}{1 - e^{-hc\eta/kT_{ref}}} \quad (2)$$

이때, h 는 플랑크 상수, k 는 볼츠만 상수, c 는 빛의 속도, 그리고 E_i 은 해당 천이에서 낮은 에너지 준위 값을 나타낸다. $Q(T)$ 는 특정 온도에 대한 분배함수(partition function)이며 Fischer 등이 제안한 서브루틴을 이용하였다[13].

Eq. 1에서 선폭 증가함수 $\Phi(\eta-\eta_0)$ 는 대기압 조건에서는 충돌에 의한 선폭 증가효과인 로렌츠 퍼짐(Lorentz broadening)이 주를 이룬다. 그러나 로켓 플룸 문제와 같이 고온 조건일 경우 도플러(Doppler) 효과에 의한 도플러 퍼짐(Doppler broadening)의 영향이 증가한다[14]. 따라서 로렌츠 및 도플러 퍼짐의 혼합 효과를 고려한 포크트 선 형태(Voigt line shape)를 적용하였으며 그 형태는 Eq. 3과 같다.

$$\Phi(\eta-\eta_0) = \frac{1}{\gamma_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} K(x, y) \quad (3)$$

$$x = \frac{\eta-\eta_0}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2} \quad (4)$$

$$y = \frac{\gamma_L}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2} \quad (5)$$

이때, $K(x, y)$ 는 포크트 함수로 로렌츠 및 도플러 퍼짐의 컨볼루션(convolution)형태로 표현되며 Humlíček 알고리즘을 이용하여 계산하였다[15]. γ 는 반값 반폭(Half Width at Half Maximum, HWHM)으로 선폭 증가의 특성을 나타낸다. 로렌츠 및 도플러 퍼짐에 대한 반값 반폭은 각각 Eq. 6, 7과 같다.

$$\gamma_L = \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{n_T} (\gamma_{C_{air}}(p-p_s) + \gamma_{C_{seif}} p_s) \quad (6)$$

$$\gamma_D = \frac{\eta_0}{c} \sqrt{2k \ln 2 \frac{T}{m}} = 3.5906 \times 10^{-7} \eta_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (7)$$

n_T 는 온도의 지수승, $\gamma_{C_{air}}$ 와 $\gamma_{C_{seif}}$ 는 각각 T_{ref} 및 p_{ref} 일 때 대기 충돌과 자가 충돌에 의한 선폭증가 효과에 대한 계수이며 복사 데이터베이

스에서 제공하는 값이다. m 과 M 은 각각 분자의 질량과 물질량을 의미한다.

선폭 증가의 영향으로 선 간의 중첩이 일어난게 되며, 이는 파수 η 의 밴드범위 내에 포함된 개별 선의 흡수계수들의 합으로 표현된다. 결과적으로 가스 분자의 흡수계수는 Eq. 8과 같이 표현된다.

$$\kappa_{\eta} = \sum_i \kappa_{\eta,i} \quad (8)$$

균질(homogeneous)하고 등온(isothermal)조건인 가스층(gas layer)에 대하여 파수 η 에서의 투과율(transmissivity) τ_{η} 및 방사율(emissivity) ϵ_{η} 는 Eq. 9, 10과 같이 나타난다.

$$\tau_{\eta} = e^{-\kappa_{\eta}l} \quad (9)$$

$$\epsilon_{\eta} = 1 - \tau_{\eta} = 1 - e^{-\kappa_{\eta}l} \quad (10)$$

이때, l 은 광학 길이(optical path length)를 의미하며, 매질내의 산란(scattering)의 영향은 배제하였다. 여러 분자의 혼합물(mixture)은 단순히 다수의 복사체의 집합으로 취급할 수 있다. 따라서 혼합물의 투과율 및 방사율의 관계는 Eq. 11과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{\eta,mix} &= 1 - \epsilon_{\eta,mix} = \prod_{m=1}^N \tau_{\eta,m} \\ &= \exp\left(-\sum_m \kappa_{\eta,m}l_m\right) \end{aligned} \quad (11)$$

파수 η 에서 복사 강도(spectral radiance)는 방사율과 플랑크 함수의 곱으로 표현되며, Eq. 12과 같다.

$$I_{\eta}(T) = \epsilon_{\eta} \frac{2hc^2\eta^3}{\exp(hc\eta/kT) - 1} \quad (12)$$

2.2 수트 입자의 영향

입자에 의한 복사의 영향을 정확하게 모델링

하는 것에는 어려움이 따르며 많은 연구자들이 실험 결과에 의존한 경험적 연구를 진행해왔다. 입자에 의한 열복사 효과는 스펙트럼 영역의 파장 대비 입자의 상대적 크기, 입자의 재질, 그리고 입자간 거리에 따라 달라진다. 입자의 상대적 크기를 의미하는 파라미터 x 와 입자의 재질과 관계되는 복소 굴절률(complex index of refraction) m 은 다음과 같다.

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (13)$$

$$m = n - ik \quad (14)$$

Eq. 13, 14에서 a 는 입자의 반지름, λ 는 파장, n 은 굴절지수(refractive index), k 는 흡수지수(absorptive index)를 나타낸다. 본 연구에서는 입자간 거리가 충분히 크기 때문에 산란이 서로 독립적으로 일어난다고 가정하였다[8].

입자의 다양한 종류 가운데 수트 입자는 탄화수소계 연료의 연소반응에서 발생하는 미연소 탄소입자를 의미한다. 주로 연료농후(fuel-rich)조건에서 발생하며, 로켓 플룸 문제에서 고려되는 대표적인 입자이다. 일반적으로 수트 입자는 크기가 충분히 작기 때문에 x 가 1보다 매우 작다고 간주할 수 있다($x \ll 1$). Tien과 Lee는 수트 입자의 광학 성질이 화염의 종류에 큰 영향을 받지 않는 것과 고온 조건에서 복소 굴절률이 온도에 대한 민감도가 적음을 서술하였다[16].

본 연구에서는 로켓 플룸에 존재하는 입자를 수트 입자로 모델링 하였으며, 이를 위하여 미이론의 1항 근사와 레일리 근사를 적용하였다. 수트 입자의 형상은 일정한 크기를 갖는 구체(sphere)로 가정하였으며, 이론의 적용에 필요한 파라미터들은 문헌조사를 통해 획득하였다[9-12].

2.2.1 미이론의 1항 근사

입자의 영향을 포함하여 복사 열전달을 서술할 때 미이론이 널리 사용된다. 미이론을 구성하는 계수들은 리카티-베셀(Riccati-Bessel) 함수로부터 구할 수 있다[11]. 그러나 미이론에 필

요한 계수들을 엄밀하게 구하기 위해서는 복소수 계산과 더불어 무한급수 형태를 고려해야 하므로, 경우에 따라 과도한 계산 자원이 요구될 수 있다. 많은 연구자들의 선행 연구에 의해 수트 입자와 같이 작은 크기의 입자에 대해서는 미 이론의 1항 근사를 적용하면 계산의 효율성이 보장됨과 더불어, 미 이론의 엄밀한 표현과 비교할 때 99% 이상의 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다[12].

미 산란 계수(Mie scattering coefficient)의 1항 근사 a_1 , b_1 과 입자에 의한 산란정도를 나타내는 산란 효율 인자(scattering efficiency factor) Q_{scat} 및 흡광 효율 인자(extinction efficiency factor) Q_{ext} 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_1 = \frac{\psi'_1(y)\psi_1(x) - m\psi_1(y)\psi'_1(x)}{\psi'_1(y)\zeta_1(x) - m\psi_1(y)\zeta'_1(x)} \quad (15)$$

$$b_1 = \frac{m\psi'_1(y)\psi_1(x) - \psi_1(y)\psi'_1(x)}{m\psi'_1(y)\zeta_1(x) - \psi_1(y)\zeta'_1(x)} \quad (16)$$

$$Q_{scat} = \frac{6}{x^2} Re(|a_1|^2 + |b_1|^2) \quad (17)$$

$$Q_{ext} = \frac{6}{x^2} Re(a_1 + b_1) \quad (18)$$

Eq. 15-18에서 $y = mx$ 의 복소함수에 대하여 ψ_1 , ζ_1 는 리카티-베셀 함수이며 베셀 및 한켈(Hankel) 함수와 관계된다[8]. 수트 입자에 의한 흡수의 정도를 나타내는 흡수 효율 인자 Q_{abs} 와 흡수계수 κ_η , 그리고 흡광계수 β_η 는 다음의 Eq. 19-21과 같이 정의된다.

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{scat} \quad (19)$$

$$\kappa_\eta = \pi a^2 N_T Q_{abs} \quad (20)$$

$$\beta_\eta = \pi a^2 N_T Q_{ext} \quad (21)$$

Eq. 20, 21에서 N_T 는 수트 입자의 수밀도

(number density)를 의미하며 수트 입자의 크기 분포(distribution)에 대한 정보를 포함하고 있다.

2.2.2 레일리 근사

수트 입자와 같이 매우 작은 크기의 입자를 고려할 때, 미 이론의 1항 근사이외에도 레일리 근사를 적용할 수 있다. 레일리 근사에 대한 표현은 미 이론의 일반해에 $x \rightarrow 0$ 의 극한을 고려함으로써 얻을 수 있으며, Q_{scat} 및 Q_{ext} 에 대한 표현은 다음의 Eq. 22, 23과 같다.

$$Q_{scat} = \frac{8}{3} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 x^4 \quad (22)$$

$$Q_{ext} = -4Im \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) x \approx Q_{abs} \quad (23)$$

수트 입자에 대한 가정($x \ll 1$)에 따라 Eq. 22의 우변에서 $x^4 \ll x$ 이므로 Eq. 23의 $Q_{ext} \approx Q_{abs}$ 가 성립하며, 이는 산란의 영향을 무시할 수 있음을 의미한다. 이로부터 수트 입자의 흡수계수 κ_η 는 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa_\eta = -Im \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) 6\pi f_v \eta \quad (24)$$

Eq. 23, 24에서 Im 은 복소수의 허수부(imaginary part)를 의미한다. f_v 는 수트 입자의 체적분율(volume fraction)을 의미한다. Eq. 24로부터, 레일리 근사를 적용할 수 있는, 충분히 작은 입자의 경우 흡수계수는 입자의 크기 분포에 독립적이며 단위체적당 입자가 갖는 체적분율에 관계된다.

Eq. 20, 24에서 도출한 흡수계수는 Eq. 8에서 도출한 가스 분자의 흡수계수와 함께 혼합물의 분광 데이터를 도출하기 위해 이용될 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 절에서는 앞서 서술한 복사 데이터베이스

를 이용한 복사 모델을 적용하여, 추진제와 산화제의 연소 반응에 의한 주요 연소 생성물인 수증기, 이산화탄소, 일산화탄소 및 이들의 혼합물에 대한 흡수계수를 도출하였으며, 이로부터 적외선 스펙트럼을 예측하고 타 연구자의 실험 결과와 비교하였다. 또한 근사 모델에 따른 수트 입자의 광학적 특성을 비교하였으며 이를 실제 로켓 플룸 문제에 적용하여 복사 강도를 예측하고 실험 결과와 비교하였다.

3.1 복사 모델 검증

복사 모델을 검증하기 위하여 실험에 의해 획득된 가스 분자의 분광 데이터와 비교하였다. 가스 분자의 분광 데이터를 얻기 위한 실험 장비는 일반적으로 [17]의 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 매질의 광학 길이를 조절하기 위한 드롭-튜브(drop-tube) 장치와 스펙트럼 측정을 위한 분광기가 이용된다. 가스 분자의 분광 데이터를 측정하기 위한 실험의 간략한 절차는 다음과 같다. 가스 증기 발생장치로부터 예열된 N_2 와 혼합된 가스 증기가 분사된다. 이때, 가스 매질의 경로는 대기 중의 이산화탄소나 수증기 등의 영향을 방지하기 위해 dry N_2 로 처리되어 있다. 위치에 따른 가스 분자의 물분율은 크로마토그래프(chromatograph)를 이용하여 측정되며, N_2 만 포함하여 측정된 투과율과 가스 분자를 포함한 투과율의 차이를 측정함으로써 특정 가스 분자의 투과율이 측정된다. 실험의 신뢰도를 제고하기 위하여, 다수의 실험을 실시하고 통계적 연산에 따라 실험 결과를 도출한다. 실험 구성 및 절차에 관한 보다 자세한 서술은 [17-20]에 제시되어 있다. Fig. 1-4는 실험값과 예측에 의한 결과를 비교한 것이다. 이때, 실험값에 대한 오차는 실험값으로부터 예측 값의 차이로 정의되었다. Fig. 1은 수증기가 많이 방출된다고 알려진 2.7 및 6.3 μm 밴드 영역에 대하여, 실험을 통해서 관측된 스펙트럼[17]과 HITEMP2010 데이터베이스를 이용해 예측된 스펙트럼을 비교한 것이다. 실험의 결과는 대기압 및 $T=1000$ K 조건에서 광학길이 20 cm의 100% 수증기에 대하여 측정된 것이다. 실험의 결과와 비교할 때, 스캐터가

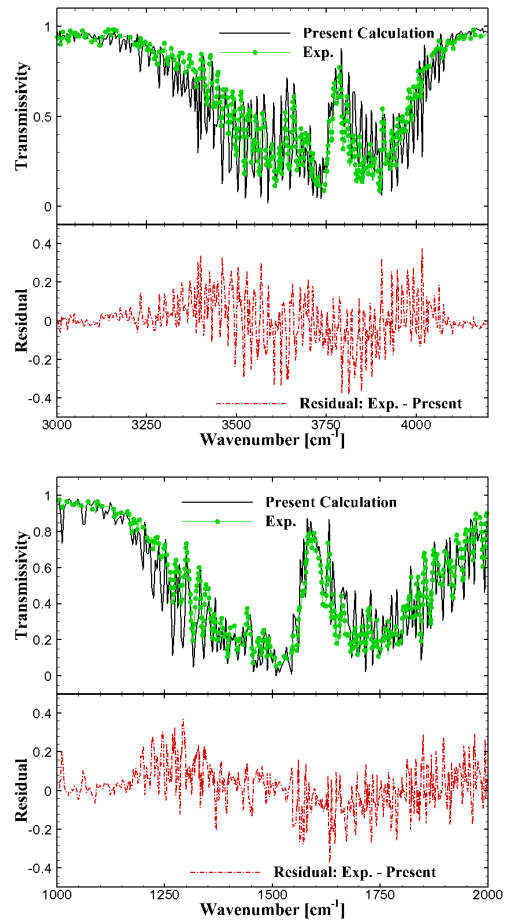


Fig. 1 Comparison of simulated transmissivity with measurement[17] at $p=1$ atm, $T=1000$ K, $l=20$ cm for 100% H_2O in the 2.7 μm (top) and 6.3 μm (bottom) band.

크게 나타나는 데이터에 대하여 오차를 분석했기 때문에 그 결과 역시 스캐터가 다소 강하게 나타나지만, 전반적인 경향이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 CDSD-4000데이터베이스를 이용한 이산화탄소의 스펙트럼 예측 결과를 실험 결과[18]와 비교한 것이며, 위와 아래 그림은 각각 이산화탄소가 많이 방출된다고 알려진 2.7, 4.3 μm 에서의 결과를 나타낸다. 각 밴드의 중심과 윙 부분에서 약간의 오차가 발생하였으나 전반적으로 잘 일치하는 경향이 나타났다. Fig. 1, 2에서, 측정 장비의 실제 해상도를 고려하여 스펙트럼 예

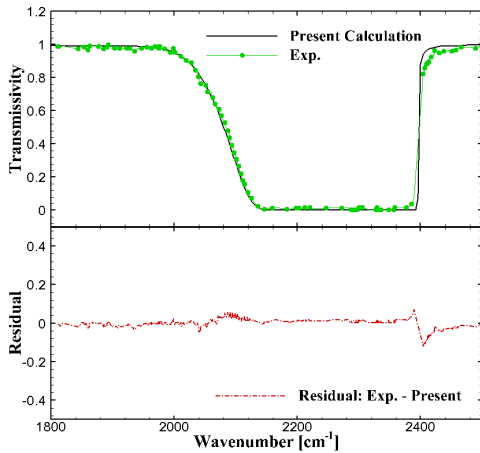
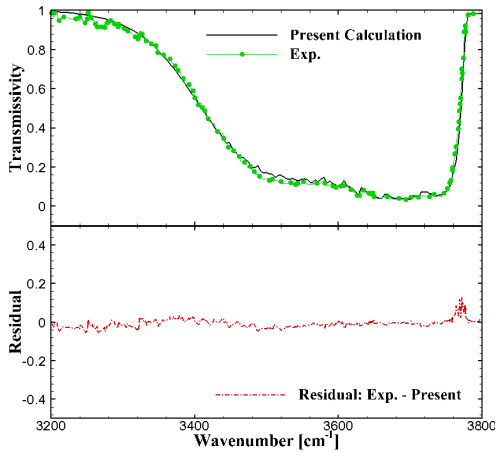


Fig. 2 Comparison of simulated transmissivity with measurement [18] at $p=1$ atm, $T=1550$ K, $l=50$ cm for 100% CO_2 in the $2.7 \mu m$ (top) and $4.3 \mu m$ (bottom) band.

측 또한 4 cm^{-1} 해상도를 갖도록 처리하였다[21].

Fig. 3은 $1900\text{-}4500 \text{ cm}^{-1}$ 의 파수 범위에서, 일산화탄소 분자에 대하여 실험을 통해 관측된 스펙트럼[19]과 HITEMP2010 데이터베이스를 이용해 예측된 스펙트럼을 비교한 것이다. 실험의 결과는 $p=2 \text{ atm}$ 및 $T=1500 \text{ K}$ 조건에서 광학길이 20 cm 의 100% 일산화탄소에 대하여 측정된 것이다. 고온조건임에도 불구하고 일산화탄소가 비교적 많이 방출되는 $1900\text{-}2400 \text{ cm}^{-1}$ 과 $4000\text{-}4400 \text{ cm}^{-1}$ 의 파수 영역은 각각 일산화탄소의 fundamental, first overtone 밴드에 해당한다. 실험의 결과와 비교할 때, 2200 cm^{-1} 밴드의 영

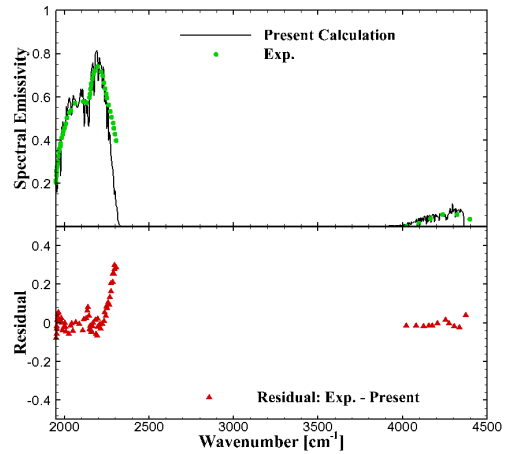


Fig. 3 Comparison of simulated spectral emissivity with measurement [19] at $p=2$ atm, $T=1500$ K, $l=20$ cm for 100% CO in the $1900\text{-}4500 \text{ cm}^{-1}$ range.

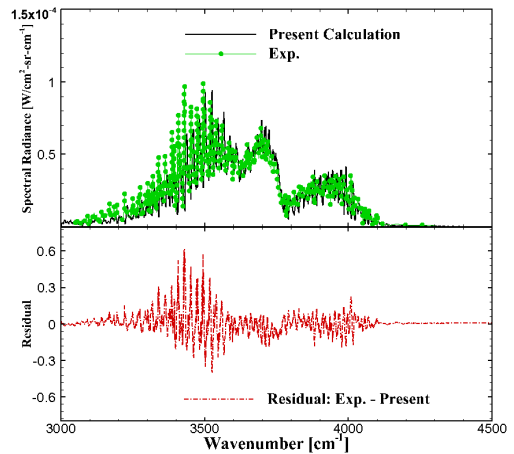


Fig. 4 Comparison of calculated spectral radiance of mixture with measurement [20] at $p=1$ atm for 7.5% H_2O and 3.7% CO_2 .

에서 다소 오차가 나타났지만, 이는 4200 cm^{-1} 파수 영역으로 이동함에 따라 나타나는 단순한 수치오차로 판단된다. 이외의 부분에서는 전반적인 경향이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 수증기와 일산화탄소의 혼합물에 대하여 복사 데이터베이스를 이용한 예측 결과와 실험 결과[20]를 비교한 것이다. Fig. 3의 결과로부터 $3000\text{-}4500 \text{ cm}^{-1}$ 영역에서는 일산화탄소의

영향이 상대적으로 적기 때문에 그 영향이 고려되지 않았다. 수증기에 대해서는 HITEMP2010 데이터베이스를 이용하였으며 이산화탄소에 대해서는 CDSD-4000을 이용하였다. 1차원 LOS (Line-of-Sight) 방법을 이용하여 11개의 점에 대한 분광 복사량(spectral radiance) 예측이 수행되었다. 실험은 연소화염의 반경방향 온도장을 측정하기 위해 진행되었으며, 스펙트럼 예측을 위한 온도장과 광학길이 등의 정보는 실험 결과[20]의 정보를 이용하였다. 실험의 결과와 비교할 때, 전반적인 경향이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 약 3500 cm^{-1} 이하의 파수 영역에서 실험값 대비 다소 과소 예측되는 경향이 나타났다. 이는 다음 두 가지 요인에 의한 것으로 판단된다. 첫째, 스캐터(scatter)가 심하게 나타나는 스펙트럼 영역에서 수행된 계수화(digitizing)에 의한 수치오차, 둘째, 실험장비의 신호 합성에 의한 실제 오차율이 명확히 명시되지 않은 조건 하에서, 그 영향을 임의로 고려하여 계산된 점이다.

위의 결과로부터 본 연구에 사용된 복사 데이터베이스 및 복사 모델의 신뢰성을 확인하였다.

3.2 근사 모델에 따른 수트 입자의 특성

수트 입자의 광학적 특성 변화를 근사 모델에 따라 관찰하였으며 그 결과를 미 이론의 해와 비교하였다.

Fig. 5는 크기 파라미터 x 에 따른 흡광 및 산란 효율인자를 나타낸 것이다. 복소 굴절률은 $n=2.0$, $k=1.0$ 으로 고정하였으며 $0 \leq x \leq 1$ 의 범위를 고려하였다. 입자의 크기가 충분히 작은 범위에 대해서는 세 가지 모델이 거의 차이가 없다. 하지만 수트 입자로 가정할 수 있는 범위를 벗어나는 $x \geq 0.3$ 부터는 레일리 근사는 미 이론 및 미 이론의 1항 근사에 의한 결과와 다소 차이가 나는 결과를 유발한다. 미 이론의 1항 근사는 미 이론의 결과와 거의 차이가 없는 결과가 도출되었다. 파장대비 입자의 상대적 크기, x 가 커짐에 따라서 산란이 흡광 효율에서 차지하는 비중이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이로부터 입자의 크기가 작지 않을 때에는 산란의 영향을 고려해

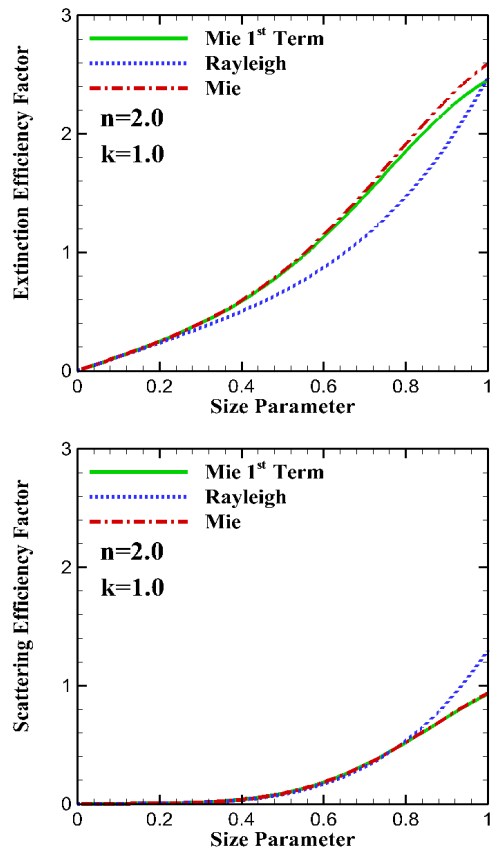


Fig. 5 Comparison of calculated extinction efficiency factor(top) and scattering efficiency factor(bottom) depending on models in the range of size parameter, 0-1.

야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6는 흡수지수 k 에 따른 흡광 및 산란 효율인자를 나타낸 것이며, $0.01 \leq k \leq 50.0$ 의 범위를 고려하였다. 굴절지수와 크기 파라미터는 $n=2.0$, $x=0.1$ 로 고정하였다. 입자의 크기가 충분히 작은 범위이므로 세 가지 모델에 의한 결과에 큰 차이가 없다. 하지만 흡수지수가 커짐에 따라 레일리 근사 결과에서, 미 이론이나 미 이론의 1항 근사와는 약간의 차이가 관찰되었다. 미 이론의 1항 근사는 전반적으로 미 이론과 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 파장대비 입자의 크기가 매우 작은 $x=0.1$ 에 대해서는 산란의 영향이 무시할 수 있을 만큼 작은 스케일로 관찰되었다. 이로부터 입자의 크기가 충분히 작은,

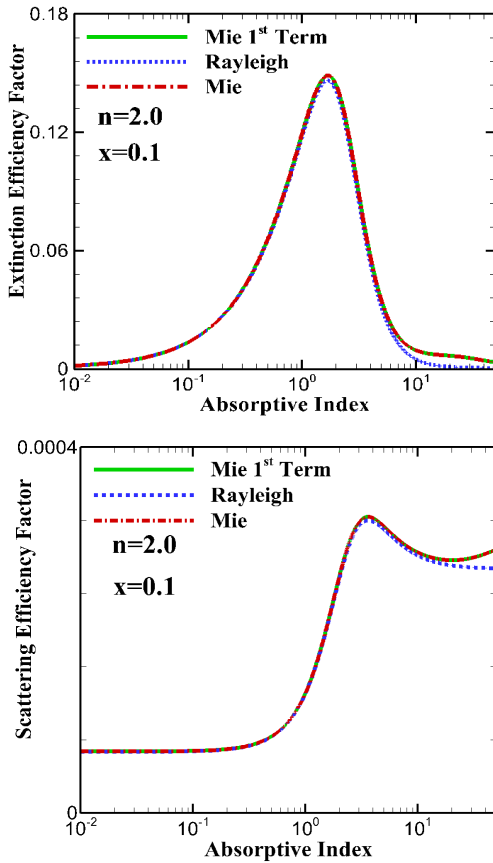


Fig. 6 Comparison of calculated extinction efficiency factor(top) and scattering efficiency factor(bottom) depending on models in the range of absorptive index, 0.01-50.0.

수트 입자와 같은 경우에는 산란의 영향이 무시될 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5, 6의 결과로부터 레일리 근사는 입자의 크기가 커짐에 따라 정확도가 저하되는 결과를 보였으나, 수트 입자와 같이 그 크기가 매우 작은 경우에는 미 이론이나 미 이론의 1항 근사와 더불어 수트 입자의 광학적 특성을 나타내기 위해 적용될 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, 미 이론의 1항 근사는 대부분의 경우에 미 이론의 해와 대등한 결과를 주는 것을 알게 되었고, 복잡한 미 이론을 대신하여 적용될 수 있는 적절한 근사모델임을 확인하였다.

3.3 로켓 플룸의 스펙트럼 예측

앞서 서술한 복사 데이터베이스 및 복사 모델, 그리고 수트 입자에 대한 근사 이론을 적용하여 실제 로켓 플룸에서 방출되는 스펙트럼을 예측하고 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 7-9은 Deimling 등의 실험결과에 대하여 스펙트럼 예측 결과를 나타낸 것이다. Deimling 등은 니트라민(nitramine) 추진제를 이용하는 로켓 플룸에 대하여 2-10 μm 의 파장 영역에 대한 복사 강도를 측정하였다[7]. 실험의 조건은 $p=40 \text{ atm}$, $T=2230 \text{ K}$ 이며 연소 생성물의 조성은 22.3% H_2O , 9.2% CO_2 , 8.6% CO , 5.21% 수트 입자로 구성되어있다.

수증기 및 일산화탄소에 대하여 HITEMP2010 데이터베이스를 이용하였으며 이산화탄소에 대해서는 CDS-4000 데이터베이스를 이용하였다. 복사강도의 예측은 온도 및 조성이 일정한 단일 층을 가정하여 1차원 LOS 방법을 이용하였다.

Fig. 7에서는 미 이론의 1항 근사와 미 이론의 결과를 비교하였다. 두 경우의 혼합물의 복사강도 예측 결과가 실험값과 잘 일치하는 경향이 나타났다. 미 이론의 1항 근사와 미 이론의 결과 사이의 차이가 충분히 적게 나타났으므로 본 문제에 대하여 미 이론의 1항 근사를 적용함으로써 계산의 효율성을 높일 수 있다.

Fig. 8에서는 미 이론의 1항 근사와 레일리 근사 모델에 따른 복사강도 예측 결과를 비교하였다. 또한, 수트 입자의 영향이 포함되지 않은 경우의 복사강도 예측 결과도 함께 나타내었다. 수트 입자의 영향이 고려되지 않은 경우에는 수증기, 이산화탄소, 일산화탄소에 의한 영향이 포함되었으며, 짧은 파장 영역에서 실험의 결과와 명확한 차이가 나는 것을 알 수 있다. 특히 2-4.2 μm 영역에서 실험에 대한 차이가 두드러지며, 수트 입자를 고려함으로써 스펙트럼 예측 결과가 향상된 것을 확인하였다. 본 연구에 의해 확인된 수트 입자를 고려한 스펙트럼 예측 기술은 로켓 플룸을 동반하는 비행체 탐지에 적용될 수 있다. 수트 입자에 의한 영향을 고려함으로써 고체 연료와 액체 연료의 판별 능력을 향상하고, 보다 정확한 스펙트럼 예측 데이터베이스를 구축하여 탐지 능력 향상에 기여할 수 있다. 더불어

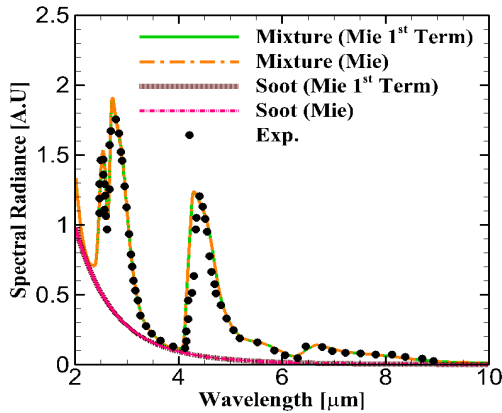


Fig. 7 Calculated spectral radiance of Mie 1st term approximation and Mie theory in the 2-10 μm range, compared with experimental measurement[7].

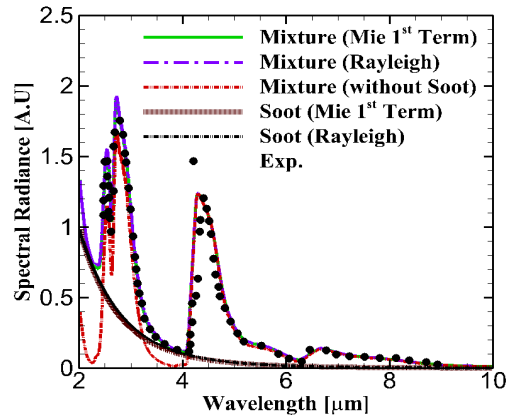


Fig. 8 Calculated spectral radiance of Rayleigh and Mie 1st term approximation in the 2-10 μm range, compared with experimental measurement[7].

어, 본 연구의 결과가 피탐지성 저감에 이용될 경우, 플룸에 의한 탐지 저감을 위하여 노즐의 설계 및 연료와 산화제의 종류와 그 혼합 비율 등에 반영되어 피탐지성을 저감함으로써 비행체의 생존성을 높이는데 적용될 것으로 기대된다.

미 이론의 1항 근사 및 레일리 근사 모두 수트 입자의 영향을 적절히 예측하여 실험값과 비교할 때 더욱더 정확한 복사강도를 예측하였으며 두 방법 사이의 차이는 매우 근소하였다.

Fig. 9에서는 미 이론의 1항 근사를 적용한 로켓 플룸의 복사강도 예측 결과를 혼합물 및 각종 연소생성물에 대하여 나타내었다. 수증기의 경우 2.7, 6.3 μm 영역에서, 이산화탄소의 경우 2.7, 4.3 μm 영역에서 강한 복사를 방출하는 것을 알 수 있다. 일산화탄소는 약 4.6 μm 에서 상대적으로 적은 복사를 방출하고 있으며, 약 2.4 μm 에서는 매우 적은 복사를 방출하고 있다. 이는 Fig. 3에서 도출된 경향과 일치한다. 수트 입자의 경우 약 2.4-2 μm 영역에서 강한 복사를 방출한다. 이는 수학적인 관점에서, 2.2절에 유도된 수트 입자의 흡수계수가 파장에 반비례하기 때문에 짧은 파장 영역에서 Eq. 13에 의한 수트 입자의 복사 방출이 강하게 나타나기 때문이다. 또한, 물리적인 관점에서 파장대에 따른 수트 입자의 흡수계수 변화는 특정 파장에 대한 수트

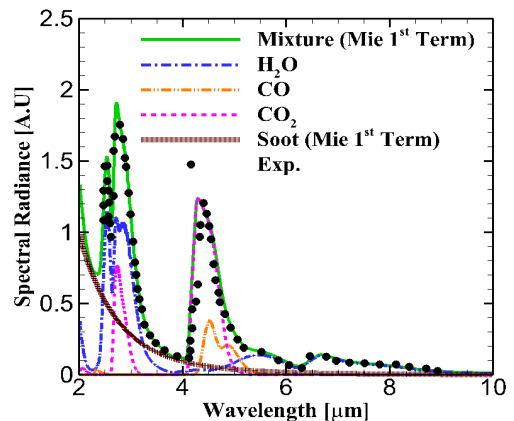


Fig. 9 Predicted contributions of radiating species including soot to the spectrum of rocket plume in the 2-10 μm range, compared with experimental measurement[7].

입자의 상대적인 크기가 변화하기 때문이며, 본 연구의 2.2절에서 유도된 수트 입자의 흡수계수는 그 크기가 파장 대비 충분히 작은 크기 ($x \ll 1$)에 대하여 유도되었으므로 수트 입자의 상대적인 크기가 작게 나타나는 짧은 파장대에서 그 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. Fig. 9의 분자 별 복사강도 분석으로부터 3-4.2 μm 영역에서 가스 혼합물을 구성하는 수증기, 이산화탄소, 일산화탄소는 복사 방출을 거의 하지 않

는 것을 알 수 있다. 따라서 해당 파장 영역에서 복사를 방출하는 주요 방사체는 수트 입자임을 추론할 수 있으며, 수트 입자의 영향을 고려하여야 보다 정확한 스펙트럼 예측이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 복사 데이터베이스 기반의 LBL 모델과 근사 이론에 기초한 입자의 영향이 고려된 로켓 플룸의 적외선 스펙트럼 예측을 수행하였다. 로켓 플룸 내에 존재하는 주요 연소 생성물 가스로는 수증기, 이산화탄소, 일산화탄소를 고려하였으며 수증기 및 일산화탄소에 대해서는 HITEMP2010 데이터베이스를, 이산화탄소에 대해서는 CDS-4000 데이터베이스를 이용하였다. 로켓 플룸 내에 존재하는 입자는 수트 입자로 모델링 하였으며 미 이론의 1항 근사 및 레일리 근사를 적용하였다. 두 이론의 적용에 대한 타당성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 로켓 플룸의 스펙트럼 예측 결과를 도출하였다. 예측 결과는 타 연구자의 실험 결과와 비교하여 잘 일치하는 경향이 도출되었으며, 수트 입자의 영향을 고려함으로써 짧은 파장 영역 내에서 스펙트럼 예측 결과를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과로부터, 로켓 플룸의 적외선 스펙트럼 예측에는 입자의 영향이 고려되어야 보다 정확한 결과가 획득되는 것을 확인하였다. 로켓 플룸의 적외선 신호 예측을 통한 비행체의 피탐지성 저감 과정에서 본 연구의 결과가 수트 입자의 영향에 대한 근사해를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업 (No. 2011-0020808)의 지원 및 한국과학기술원-LIG Nex1 산학협동연구의 재원으로 차세대 정

밀 유도무기 핵심기술연구의 지원(Y15-003)을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

References

1. Rothman, L.S., Rinsland, C.P., Goldman, A., Massie, S.T., Edwards, D.P., Flaud, J.-M., Perrin, A. et al., "The HITRAN Molecular Spectroscopic Database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 Edition," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 60, Issue 5, pp. 665-710, 1998.
2. Rothman, L.S., Gordon, I.E., Barbe, A., Chris Benner, D., Bernath, P.F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L.R., Compargue, A., Champion, J.-P., Chance, K., Coudert, L.H., Dana, V., Devi, V.M., Fally, S., Flaud, J.-M., Gamache, R.R., Goldman, A. et al., "The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 110, Issue 9-10, pp. 533-572, 2009.
3. Rothman, L.S., Gordon, I.E., Barber, R.J., Dothe, H., Gamache, R.R., Goldman, A., Perevalov, V.I., Tashkun, S.A. and Tennyson, J., "HITEMP, the High-temperature Molecular Spectroscopic Database," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 111, Issue 15, pp. 2139-2150, 2010.
4. Tashkun, S.A. and Perevalov, V.I., "CDS-4000: High-resolution, High-temperature Carbon Dioxide Spectroscopic Databank," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 112, Issue 9, pp. 1403-1410, 2011.
5. Jansons, M., Lin, S. and Rhee, K.T.,

- "Infrared Spectral Analysis of Engine Preflame Emission," *International Journal of Engine Research*, Vol. 9, pp. 215-237, 2011.
6. Ozawa, T., Garrison, M.B. and Levin, D.A., "Accurate Molecular and Soot Infrared Radiation Model for High-temperature Flows," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 21, Issue 1, pp. 19-27, 2007.
 7. Deimling, L., Liehmann, W., Eisenreich, N., Weindel, M. and Eckl, W., "Radiation Emitted from Rocket Plumes," *Propellants Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 22, Issue 3, pp. 152-155, 1997.
 8. Modest, M.F., *Radiative Heat Transfer*, 2nd ed., Academic Press, Massachusetts, USA, 2003.
 9. Chang, H. and Charalampopoulos, T.T., "Determination of the Wavelength Dependence of Refractive Indices of Flame Soot," *Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, Vol. 430, Issue 1880, pp. 577-591, 1990.
 10. Ayrancı, I., Vaillon, R., Selcuk, N., Andre, F. and Escudie, D., "Determination of Soot Temperature, Volume Fraction and Refractive Index from Flame Emission Spectrometry," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 104, Issue 2, pp. 266-276, 2007.
 11. Van de Hulst, H.C., *Light Scattering by Small Spheres*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY., USA, 1957.
 12. Changsik, K., Lior, N. and Okuyama, K., "Simple Mathematical Expressions for Spectral Extinction and Scattering Properties of Small Size-parameter Particles, Including Examples for Soot and TiO₂," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 55, Issue 3, pp. 391-411, 1996.
 13. Fischer, 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 and Radiative Transfer*, Vol. 82, No. 1, pp. 401-412, 2003.
 14. Wang, A. and Modest, M.F., "Importance of Combined Lorentz-Doppler Broadening in High-Temperature Radiative Heat Transfer Applications," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 126, Issue 5, pp. 858-861, 2004.
 15. Humlíček, J., "Optimized Computation of the Voigt and Complex Probability Functions," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 27, Issue 4, pp. 437-444, 1982.
 16. Lee, S.C. and Tien, C.L., "Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames," *International Symposium on Combustion*, Vol. 18, Issue 1, pp. 1159-1166, 1980.
 17. Bharadwaj, S.P. and Modest, M.F., "Medium Resolution Transmission Measurements of Water Vapor at High Temperature," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, Issue 4, pp. 374-381, 2006.
 18. Bharadwaj, S.P. and Modest, M.F., "Medium Resolution Transmission Measurements of CO₂ at High Temperature-an Update," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 103, Issue 1, pp. 146-155, 2007.
 19. Abu-Romia, M.M. and Tien, C.L., "Measurements and Correlations of Infrared Radiation of Carbon Monoxide at Elevated Temperatures," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 6, Issue 2, pp. 143-167, 1966.
 20. Simmons, F.S., Arnold, C.B. and Lindquist, G.H., "Measurement of Temperature

-
- Profiles in Flames by Emission-Absorption Spectroscopy," *NASA-CR-120894*, 1972.
21. Nam, H.J. and Kwon, O.J., "Infrared Radiation Modeling of NO, OH, CO, H₂O, and CO₂ for Emissivity/Radiance Prediction at High Temperature," *Infrared Physics and Technology*, Vol. 67, pp. 283-291, 2014.