

회체가스중합모델에 기초한 연소가스의 파장별 복사 성질

김 옥 중* · 송 태 호**
(1998년 11월 28일 접수)

WSGGM-Based Spectral Modeling for Radiation Properties of Combustion Products

Ook Joong Kim and Tae-Ho Song

Key Words: Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model(WSGGM, 회체가스중합모델), Absorption Coefficient(흡수계수), Emissivity(방사율), Intensity(복사강도)

Abstract

This work describes the low-resolution spectral modeling of the water vapor, carbon dioxide and their mixtures by applying the weighted-sum-of-gray-gases model (WSGGM) to each narrow band. Proper modeling scheme of gray gas absorption coefficients vs temperature relation is suggested. Comparison between the modeled emissivity calculated from this relation and the 'true' emissivity obtained from the high temperature statistical narrow band parameters is made for a few typical narrow bands. Low resolution spectral intensities from one-dimensional layers are also obtained and examined for uniform, parabolic and boundary layer type temperature profiles using the obtained WSGGM's with several gray gases. The results are compared with the narrow band spectral intensities obtained by a narrow band model-based code with Curtis-Godson approximation. Good agreement is found between them. Data bases including optimized modeling parameters and total and low-resolution spectral weighting factors are developed for water vapor, carbon dioxide and their mixtures. This model and obtained data bases, available from the authors' internet site, can be appropriately applied to any radiative transfer equation solver.

기호설명

- E : 오차의 표현
- I : 복사 강도($W/m^2 \cdot sr$)
- I_{bn} : 파장에 따른 흑체 복사($W \cdot cm/m^2 \cdot sr$)
- k_i : 회체 가스의 흡수 계수($1/m$)
- k_{io} : 모델링 상수(K^2/atm)
- L : 경로 길이(m)
- M : 회체가스의 수
- P : 압력(atm)
- s : 시선(line of sight)에 따른 거리(m)

T : 온도(K)

W : 가중치

그리스문자

a_i : 흡수계수 모델을 위한 상수(K)

ϵ : 가스 방사율

η : 파수(wavenumber)(cm^{-1})

ρ_{abs} : 가스의 밀도(kg/m^3)

하첨자

b : 흑체

i : 회체 가스

m : 모델치

max : 최대치

* 회원, 한국기계연구원 열유체환경연구부

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

- min : 최소치
- t : 모델링의 기준이 되는 참(true) 값
- η : 파수

상첨자

- : 밴드 평균

1. 서론

수증기나 이산화탄소와 같은 복사에 관여하는 가스들의 복사 물성치 예측은 노, 보일러 및 가스 터빈 등의 고온 열전달 문제를 해석하는데 매우 중요하다. 일반적으로 가스의 흡수/방사 스펙트럼 특성은 가스의 종류, 온도, 압력 등에 따라 크기와 위치가 변화하는 수많은 선의 형태로 나타나며 이에 따라 가장 정확한 모델 방법으로는 Hartmann 등⁽¹⁾ 과 Rothman 등⁽²⁾의 선간법(line-by-line)이 있다. 그러나 이 방법은 적외선 영역에 대해 약 10^6 개(0.001cm^{-1} 의 분해능을 고려할 경우)가 넘는 계산이 요구되므로 공학적인 측면에서 적용은 불가능하다. 그러므로 공학적 응용성이 우수한 근사 모델의 개발이 매우 활발히 이루어졌으며 이들 중 좁은밴드모델(narrow band models⁽³⁻⁵⁾), 넓은밴드모델(wide band model⁽⁶⁻⁸⁾) 및 회체가스 중합모델(weighted-sum-of-gray-gases model^(9,10))은 현재 널리 이용되고 있다. 일반적으로 밴드모델의 경우에는 플랑크(Planck) 함수의 변화율 무시할 수 있는 일정한 파장 구간에 대해서 평균한 투과율(transmissivity)이나 흡수율(absorptivity)이 계산된다. 따라서 가장 적합한 복사전달방정식(Radiative Transfer Equation, RTE) 해법으로는 구분전달법(Discrete Transfer Method⁽¹¹⁾)이 있으며 구분좌표법(Discrete Ordinate Method⁽¹²⁾)에도 약간 의 수정을 가하면 적용이 가능하다. 이러한 밴드 모델은 온도와 가스의 농도가 불균일한 경우에는 Curtis-Godson^(13,14) 이나 Lindquist-Simmons⁽¹⁵⁾ 형태의 근사가 요구된다. 이와 같은 불균일한 매질 내에서의 복사열전달에 대한 최근의 연구(Zhang 등⁽¹⁶⁾ 및 Kim 등⁽¹²⁾)에 따르면 좁은밴드 내에서도 복사강도와 흡수계수간의 상관관계가 매우 중요하며, 이 상관관계를 모두 고려해 주게 되면 RTE의 형태가 복잡해지고 이에 따라 계산 시간도 길어지게 됨을 보이고 있다

반면 회체가스중합모델, CK모델(correlated-k

model^(17,18), CKFG모델(correlated-k-fictitious-gas model⁽¹⁹⁾) 및 흡수계수 재분배 방법⁽²⁰⁾ 등은 흡수계수를 직접 계산하거나 모델링함으로써 어떤 복사방정식 해법에도 적용이 가능하다.

여기서 특히 회체가스중합모델의 경우 매우 신뢰성이 높은 방법으로 공학 분야에서 널리 이용되고 있으며 현재 이 방법에 기초한 수정된 모델(spectral group model,⁽²¹⁾ spectral line-based weighted-sum-of-gray-gases model^(22,23) 및 SLWSSG-CK hybrid model⁽²⁴⁾ 등)의 개발이 매우 활발히 이루어지고 있다.

그러나 지금까지의 모델링은 주로 전체 방사율(total emissivity)에 대한 것으로서 파장별 강도를 측정하여 불균일한 비회체 매질내의 온도를 측정하는 토모그래피 기술에 응용이 가능한 파장별 모델링에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다

본 논문에서는 대표적 연소가스인 수증기와 이산화탄소에 대해 회체가스중합모델에 기초하여 개발한 저분해능(low-resolution)의 파장별 복사 물성치의 데이터 베이스에 대해 언급하고자 한다.

2. 모델링 방법

주어진 경로길이와 온도 하에서 회체가스중합 모델에 기초한 파장별 평균 방사율은 다음과 같이 표현된다

$$\bar{\epsilon}_{gm}(T, L) = \sum_k (1 - e^{-k_i L}) W_k(\eta) \quad (1)$$

여기서 k_i 는 이산화된 회체가스의 흡수계수이며 M 과 L 은 각각 회체가스의 수와 경로길이를 나타낸다. 그리고 $W_k(\eta)$ 는 파장별 가중치로서 밴드중심의 파수(band-center wavenumber)에 따라 달라지는 값이며 임의의 파수에서 그 합은 1이 된다. 본 연구에서는 하나의 좁은 밴드에서 하나의 회체가스가 차지하는 파수 구간의 끝과 시작은 모든 온도에 대해 일정한 것으로 가정함으로써 온도가 불균일한 문제의 해석에서 나타나게 되는 Leibniz⁽²¹⁾ 항을 제거하였다

선행 연구^(25,26)에서 고려했던 다양한 형태의 흡수계수와 온도, 압력과의 관계는 최종적으로 전

체 및 파장별 계산에서 우수한 특성을 보인 다음의 형태를 선정하였다.

$$k_i = k_{i0} \frac{P_{abs}}{T^2} e^{-\alpha_i/T} \quad (2)$$

여기서 P 와 T 는 각각 가스의 분압 및 온도이며, k_{i0} 와 α_i 는 모델링 변수이다.

선행 연구에서와 같이 모델링 변수는 다음과 같이 정의한 오차에 대한 식을 최소화하는 방법으로 구했다.

$$E_\eta = \sum_T \sum_L \left(\frac{\bar{\epsilon}_{\eta t}}{\epsilon_{\eta m}} + \frac{\bar{\epsilon}_{\eta m}}{\epsilon_{\eta t}} - 2 \right) \quad (3)$$

여기서 T 와 L 은 각각 모델링 범위내에서 사용된 온도와 경로길이를 나타낸다. 그리고 기호에서 첨자 t 와 m 은 각각 기준치와 모델치를 나타낸다. 기준치인 $\bar{\epsilon}_{\eta t}$ 는 Soufiani와 Taine의 좁은 밴드 프로그램인 SNB⁽⁵⁾를 이용하여 계산하였다.

앞의 식(1)에 Planck 함수를 곱하고 이를 전체 흑체복사강도로 나눈 다음 전체 스펙트럼에 대해 적분을 하게 되면 다음과 같은 전체 방사율에 대한 식을 얻게 된다.

$$\epsilon_m = \sum_{i=1}^M (1 - e^{-k_i L}) W_i(T) \quad (4)$$

여기서 $W_i(T)$ 는 전체 방사율에 대한 가중치로서 다음과 같이 주어진다.

$$W_i(T) = \frac{\sum_{\eta} W_i(\eta) I_{b\eta} \Delta\eta}{I_b}, \quad i=1, \dots, M \quad (5)$$

식에서 알 수 있는 바와 같이 파장별 가중치 $W_i(\eta)$ 는 온도에 따라 변화하지 않은 반면 $W_i(T)$ 는 온도의 함수가 된다. 최소화 방법으로는 Conjugate gradient법⁽²⁷⁾을 사용하였으며 여기에 목적함수의 미분은 해석적인 방법으로 구하여 활용하였다.

3. 수증기에 대한 계산

먼저 1기압하의 수증기에 대한 계산을 수행하였으며 이 때 모델링 온도와 경로길이의 범위는 각각 500~2500K와 0.01~10.0m로 잡았다. 많은 예비 계산 결과물 통하여 5개(1×10^9 , 1×10^8 , 1×10^7 , 1×10^6 , $1 \times 10^5 \text{K}^2/\text{atm}$)의 k_{i0} 와 3개(500, 2000, 5000K)의 α_i 면 충분히 작은 오차를 보이면서 계산이 가능함을 알 수 있었다. 여기서 특히 식(2)로부터 α_i 는 다음의 관계가 성립됨으로

$$\ln \frac{k_i(T_{\max}) T_{\max}^2}{k_i(T_{\min}) T_{\min}^2} = \alpha_i \left(\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}} \right) \quad (6)$$

온도에 대해 주어진 흡수계수 값을 이용하여 α_i 를 구하게 되면 Fig. 1과 같이 나타난다. 앞의 α_i 는 Fig. 1의 종축에서 상,중,하의 값을 선정한 것이다. 전체 스펙트럼 범위 150~9300 cm^{-1} 에 대해 25 cm^{-1} 의 간격으로 계산을 수행하였으며 계산된 파장별 가중치 $W_i(\eta)$ 와 전체 가중치 $W_i(T)$ 는 인터넷 주소(http://radcon7.kaist.ac.kr/database/radiation/nbm_based_wsggm)에 실어두었다.

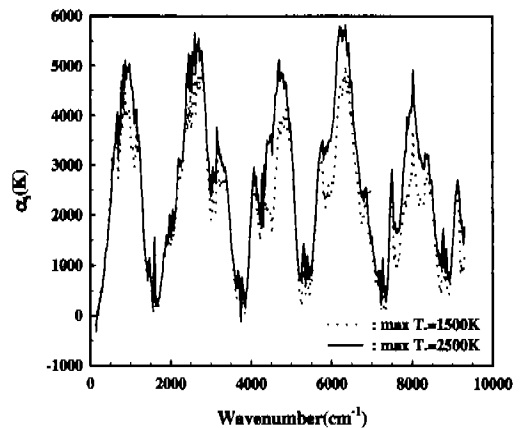


Fig. 1 Variation of temperature.

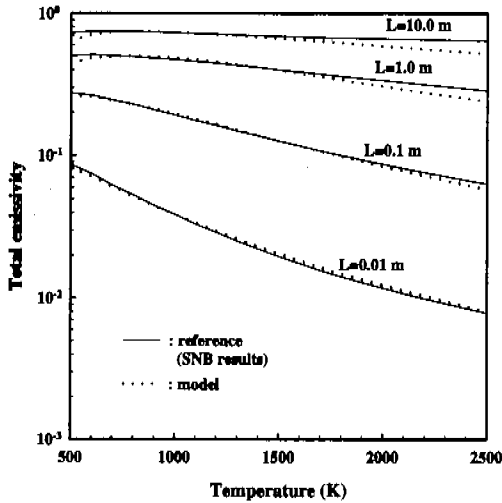


Fig. 2 Comparison of total gas emissivities of pure water vapor at 1 atm for various temperatures and path lengths.

계산의 정확성을 검토하기 위해 다음의 식(7)과 같이 정의한 전체 방사율에 대한 계산 오차를 고려한 온도와 경로길이의 숫자로 나눈 전체 방사율의 평균 오차는 3.1%로 나타났다.

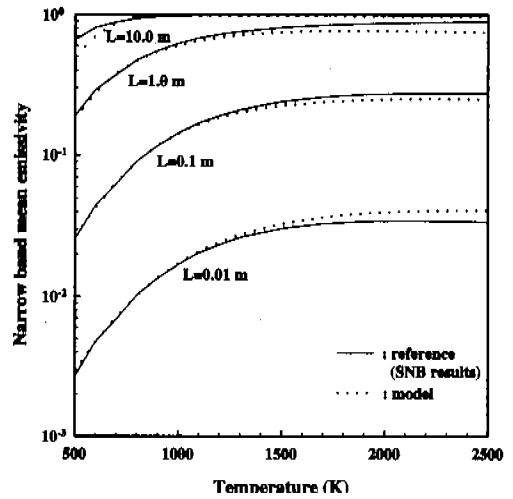
$$E = \sum_T \sum_L \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_m} + \frac{\epsilon_n}{\epsilon_t} - 2 \right) \quad (7)$$

Fig. 2는 계산에 사용된 온도와 경로 길이 범위에 대해 전체 방사율을 비교한 것으로 모델치가 기준치와 잘 일치함을 알 수 있다.

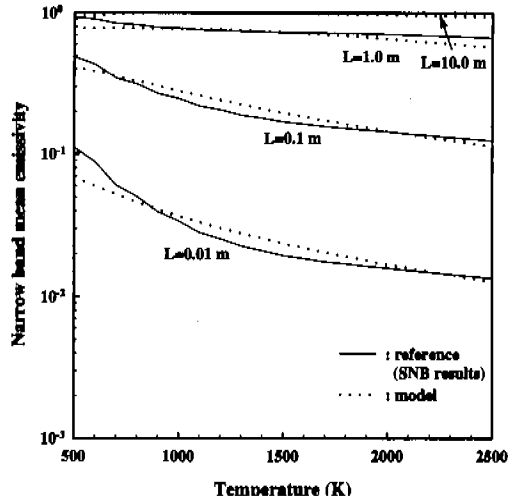
Fig. 3은 두 개의 대표적 좁은 밴드(1200cm⁻¹와 3800cm⁻¹)에서의 파장별 방사율을 비교해 보인 것이다. 그림에 보인 바와 같이 흡수/방사가 약한 밴드의 경우(1200cm⁻¹)에는 온도에 따른 변화가 급격하여 오차가 가장 크게 나타났으며(Fig. 3a) 이 때 식 (3)으로 계산된 평균 오차는 2.1%로 나타났다. 반면 흡수/방사가 강한 밴드(3800cm⁻¹)에서는 오차가 크게 감소하여 평균 오차가 1.1%로 나타났다(Fig. 3b).

3.1 벽면에서의 전복사 감도 계산

제안한 복사 물성치 계산 방법의 타당성을 다양한 온도 분포를 가진 1차원 문제에 적용하여



(a) $\eta=1200\text{cm}^{-1}$



(b) $\eta=3800\text{cm}^{-1}$

Fig. 3 Comparison of total gas emissivities of H₂O for various temperatures and path lengths (a) at $\eta=1200\text{cm}^{-1}$ (b) at $\eta=3800\text{cm}^{-1}$.

조사해 보았다. 문제로는 최근의 연구⁽¹²⁾에서 많이 다루어지고 있어 비교가 용이한 다음에 설명한 세 가지 온도 분포에 대하여 벽면에서의 수직 방향 복사강도 계산을 수행하였다.

먼저 균일한 온도 분포는 내부가 1000K, 양 벽면은 0K인 형태이며 포물선 형태의 온도 분포는 중앙의 온도가 1110K, 양 벽면의 온도가 400K이

다. 그리고 경계층 형태의 온도 분포는 왼쪽 벽면의 온도가 1500K, 반대편 벽면의 온도는 300K이다. 모든 경우에 있어서 전압력은 1기압이며, 벽면은 흑체로서 거리는 0.1~10m이다.

위 문제에서 좁은밴드 평균 파장별 복사강도는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\bar{I}_{\eta m}(0) = \sum_{\eta=1}^M \int_0^L k_i(\eta, s) I_{b\eta}(s) W_i(\eta) \exp\left(-\int_0^s k_i(\eta, s') ds'\right) ds \quad (8)$$

따라서 전 복사 강도는 다음과 같이 모든 좁은 밴드에 대한 합을 취하면 구할 수 있게 된다.

$$I(0) = \sum_{\eta} \bar{I}_{\eta m}(0) \Delta\eta \quad (9)$$

그러나 위의 방법에 따라 전 복사강도를 구하게 되면 계산량이 많아지므로 전 복사강도만을 계산할 필요가 있을 경우에는 다음과 같이 전체 스펙트럼에 대한 가중치를 이용하면 계산이 용이하게 된다.

$$I_m(0) = \sum_{i=1}^N \int_0^L k_i(s) I_b(s) W_i(T(s)) \exp\left(-\int_0^s k_i(s') ds'\right) ds \quad (10)$$

Table 1은 식(8)~(10)을 이용하여 구한 벽면에서의 전 복사강도를 Curtis-Godson 근사법을 이용한 좁은밴드 계산 프로그램인 SNB의 계산 결과와 비교해 보인 것이다. Table에서 괄호 안의 숫자는 기준치 대비 상대오차를 나타낸 것으로서 고려한 경로길이들에 대하여 기준치 대비 상대 오차가 약 5% 이내임을 알 수 있으며, 식(9)에 의한 결과와 식(10)에 의한 계산 결과도 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 벽면에서의 저분해능의 파장별 복사강도 계산

식(8)을 이용하여 각 좁은 밴드에 대한 벽면에서의 복사 강도를 계산한 결과물 Fig. 4에 보였다.

Table 1 Comparison of computed total intensities ($W/m^2 \cdot sr$) at the wall for H_2O (Numbers in parenthesis are percent error from SNB).

Path length (m)	Temp. profiles	Uniform T. type	Parabolic T. type	Boundary layer T. type
0.1	SNB	3452.5	3063.4	1152.4
	Eq. (9)	3517.3 (+1.9)	3195.3 (+4.3)	1159.6 (+0.6)
	Eq. (10)	3519.1 (+1.9)	3202.5 (+4.5)	1126.0 (+2.3)
1.0	SNB	8498.5	6127.1	6439.0
	Eq. (9)	8696.9 (+2.3)	6398.5 (+4.4)	6595.2 (+2.4)
	Eq. (10)	8704.5 (+2.4)	6406.9 (+4.6)	6225.5 (-3.3)
10.0	SNB	13197.9	7085.4	21783.0
	Eq. (9)	13214.5 (+0.1)	7251.5 (+2.3)	22057.4 (+1.3)
	Eq. (10)	13227.9 (+0.2)	7259.5 (+2.3)	19573.7 (-10.1)

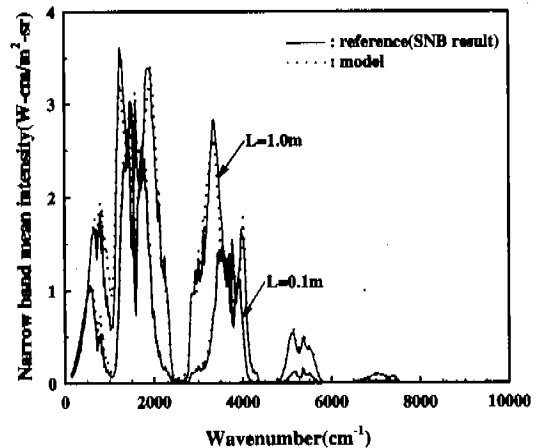


Fig. 4 Narrow band mean intensity at the wall for various temperature profiles(H_2O).

Fig. 4는 포물선 형태의 온도 분포에 대한 결과로서 다른 두 가지 온도 형태에 대해서도 거의 동일한 결과를 보였다. 그림에서 볼 수 있는 바

와 같이 각 좁은밴드에 대해서 모델치가 기준치와 매우 잘 일치하나 파장별 방사율에서 오차가 크게 나타난 1200cm⁻¹의 부근에서 약간 오차가 커짐을 알 수 있다.

이와 같은 파장별 복사강도의 오차 크기보다 음과 같이 가중치를 고려하여 정의하고 그 결과를 Table 2에 보였다.

$$E = \frac{\sum_{\eta} \left(\frac{\bar{I}_{\eta m}(0)}{\bar{I}_{\eta}(0)} + \frac{\bar{I}_{\eta m}(0)}{\bar{I}_{\eta}(0)} - 2 \right) \bar{I}_{\eta}(0)}{\sum_{\eta} \bar{I}_{\eta}(0)} \quad (12)$$

표에서 파장별 복사 강도의 오차는 수 퍼센트 정도이며 전 복사 강도에 비해 더 작은 값으로 나타남을 알 수 있다.

4. 이산화탄소에 대한 계산

수증기와 동일한 온도와 경로길이 범위에 대하여 1기압하의 이산화탄소에 관한 계산도 수행하였다. 이산화탄소의 경우에는 예비적 계산 결과 동일 수준의 방사율 모델링 오차를 얻기 위해서는 수증기에 비해 약 2배의 회체 가스가 요구되었으며 결과적으로 6개(3 × 10¹⁰, 3 × 10⁹, 3 × 10⁸, 3 × 10⁷, 3 × 10⁶, 1 × 10⁵K²/atm)의 k₀와 5개(500, 2000, 5000, 8000, 15000K)의 α_i를 선택하였다.

여기서 α_i는 식(6)을 이용하여 수증기와 마찬가지로 방법으로 취하였다. 이산화탄소의 흡수/방사

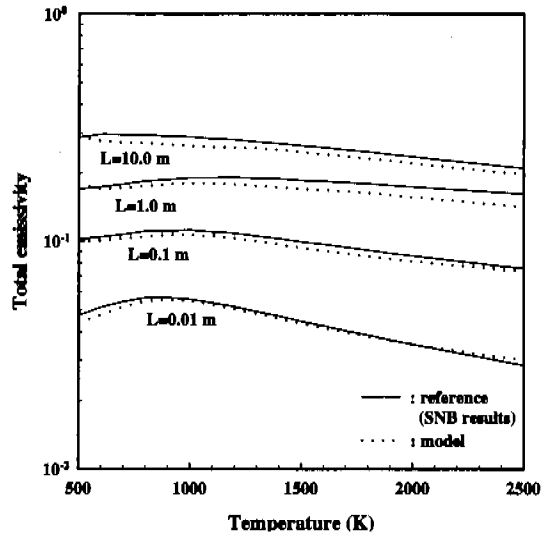


Fig. 5 Comparison of total gas emissivities of CO₂ at 1 atm for various temperatures and path lengths.

구역인 150~6000cm⁻¹ 범위에 대하여 25cm⁻¹의 간격으로 계산을 수행하였으며 파장별 및 전체 스펙트럼에 대한 가중치는 앞에서 언급한 인터벡 주소에 실어 두었다.

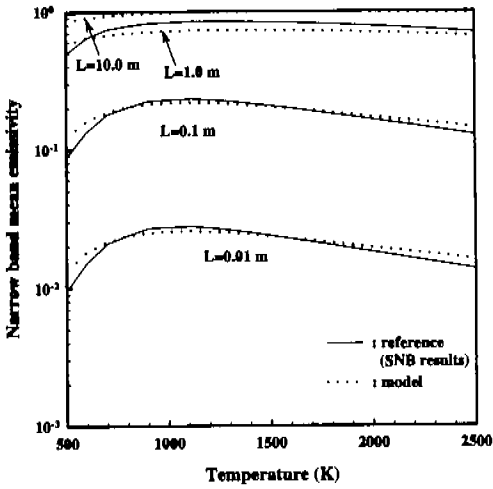
이산화탄소의 경우, 전체 방사율에 대한 모델링 오차는 2.1%로 나타났으며 Fig. 5에 보인 바와 같이 고려한 온도와 경로범위 내에서 기준치와 모델치가 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 6은 파장별 방사율을 비교한 것으로 방사율의 온도에 따른 변화가 비교적 완만한 경우(775cm⁻¹)에는 평균 모델링 오차가 1.3%로 매우 작으나 온도에 따라 급격하게 변화하는 경우(2175cm⁻¹)에는 2.4%로 회체 가스의 수물 2배로 늘렸음에도 불구하고 수증기 경우의 최대 오차와 비슷한 값을 보였다.

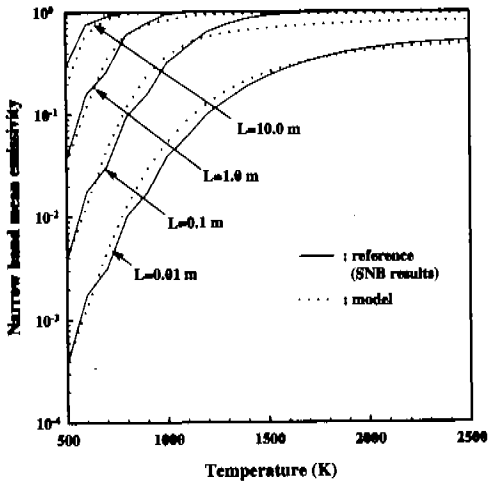
Table 3은 앞에서 언급한 1차원 문제에 대하여 벽면에서의 전 복사 강도 계산 결과를 보인 것으로 오차가 수증기에 비해 약 2배인 5~10% 정도가 됨을 알 수 있다. Table 4는 식(12)로써 계산한 평균 오차로서 수증기에 비해 크게 나타났다. 그리고 Fig. 7은 포물선 형태의 온도 분포에 대하여 파장별 복사 강도를 SNB 계산 결과와 비교해 보인 것으로서 방사율의 오차가 크게 발생한 2175cm⁻¹ 부근을 제외하고는 기준치와 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2 Average spectral errors(%) of intensity at the wall for H₂O.

Path length (m)	Temp. profiles	Uniform T. type	Parabolic T. type	Boundary layer T. type
0.1		0.9	1.2	0.9
1.0		0.9	2.2	0.6
10.0		0.9	3.8	0.5



(a) $\eta=775\text{cm}^{-1}$



(b) $\eta=2175\text{cm}^{-1}$

Fig. 6 Comparison of total gas emissivities of CO₂ for various temperatures and path lengths (a) at $\eta=775\text{ cm}^{-1}$ (b) at $\eta=2175\text{ cm}^{-1}$.

5. 수증기와 이산화탄소의 혼합물에 대한 계산

최종적으로 이산화탄소와 수증기가 분압비 2:1, 1:1, 1:2로 혼합된 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 여기서 이산화탄소의 분압은 0.15기압으로

Table 3 Comparison of computed total intensities ($\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}$) at the wall for CO₂ (Numbers in parenthesis are percent error from SNB).

Path length (m)	Temp. profiles	Uniform T. type	Parabolic T. type	Boundary layer T. type
0.1	SNB	1970.6	1304.5	2159.1
	Eq. (9)	1874.9 (-4.9)	1219.1 (-6.5)	2366.3 (+9.6)
	Eq. (10)	1921.1 (-2.5)	1259.7 (-3.4)	2689.2 (+24.6)
1.0	SNB	3360.7	1994.7	5209.0
	Eq. (9)	3177.5 (-5.5)	1906.7 (-4.4)	5045.9 (-3.1)
	Eq. (10)	3258.0 (-3.1)	1969.1 (-1.3)	5800.7 (+11.4)
10.0	SNB	5088.2	2743.2	10456.3
	Eq. (9)	4639.4 (-8.8)	2388.8 (-12.9)	9785.4 (-6.4)
	Eq. (10)	4757.9 (-6.5)	2455.5 (-10.5)	11327.4 (+8.3)

Table 4 Average spectral errors(%) of intensity at the wall for CO₂.

Path length (m)	Temp. profiles	Uniform T. type	Parabolic T. type	Boundary layer T. type
0.1		1.4	4.6	1.7
1.0		1.7	4.5	0.5
10.0		7.1	19.1	0.2

서 나머지 기체는 질소로 채워져 전체 압력은 1기압이 되는 경우를 고려하였다.

변수 k_{i0} 와 α_i 는 이산화탄소에서 사용한 값을 적용하였으며 역시 25cm^{-1} 간격으로 $150\text{--}9300\text{ cm}^{-1}$ 범위에 대하여 모델링하였다. 각 혼합물에

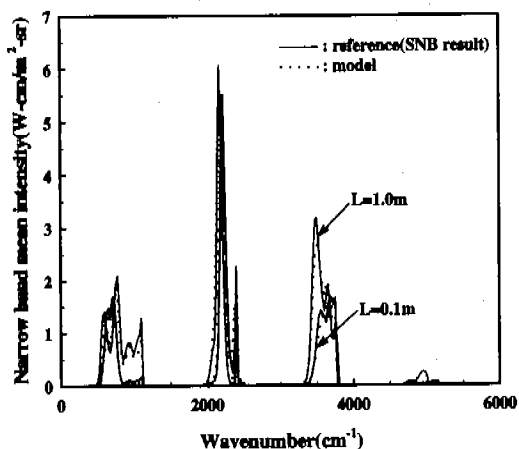


Fig. 7 Narrow band mean intensity at the wall for various temperature profiles(CO₂).

대한 전체 및 파장별 가중치는 동일한 인터넷 주소에 실어두었다.

Table 5는 경로 길이 1m인 경우에 대하여 앞의 1차원 문제에 대한 벽면에서의 복사강도물 계산한 결과를 기준치와 비교한 것으로서 전 복사강도 및 파장별 복사 강도의 오차가 수증기의 경우와 비슷한 수준으로 잘 일치함을 알 수 있다.

6. 결 론

희체가스중합모델에 기초하여 연소가스에 대한 저 분해능의 파장별 복사 물성치 계산 방법을 개발하였다. 제안한 방법을 이용하여 전체 방사율과 몇 가지 대표적 좁은 밴드에서의 밴드 평균 방사율 계산을 수행하여 비교한 결과 기준치와 비교적 잘 일치하였다. 또한 몇 가지 불균일한 온도 분포를 가진 1차원 문제에 적용하여 Curtis-Godson근사를 활용한 좁은밴드 계산치와 비교한 결과 수 퍼센트의 오차 내에서 잘 일치하였다. 최종적으로 수증기와 이산화탄소 및 이들 혼합물에 대한 최적화 변수들을 다른 연구자가 이용할 수 있도록 사용법 및 예제와 함께 인터넷 주소에 실어 두었다.

Table 5 Comparison of computed total intensities ($W/m^2 \cdot sr$) at the wall for mixtures when path length is 1.0m (Numbers in parenthesis are percent error from SNB).

P _{CO2} : P _{H2O}	Items	Temp. profiles	Uniform T. type	Parabolic T. type	Boundary layer T. type
2:1	Total intensity	SNB	4741.7	3557.5	3923.0
		Eq. (9)	4711.6 (-0.6)	3638.8 (+2.3)	3780.3 (-3.6)
		Eq. (10)	4717.6 (-0.5)	3646.7 (+2.5)	3827.2 (-2.4)
	Average spectral errors(%)		1.7	1.4	0.4
1:1	Total intensity	SNB	5249.6	3983.2	3998.7
		Eq. (9)	5254.8 (+0.1)	4123.4 (+3.5)	3840.8 (-3.9)
		Eq. (10)	5259.6 (+0.2)	4130.5 (+3.7)	3880.1 (-3.0)
	Average spectral errors(%)		0.3	1.4	0.5
1:2	Total intensity	SNB	5626.2	4308.7	3943.2
		Eq. (9)	5634.5 (+0.1)	4499.9 (+4.4)	3741.2 (-5.1)
		Eq. (10)	5643.5 (+0.3)	4509.2 (+4.7)	3779.1 (-4.2)
	Average spectral errors(%)		0.2	1.3	0.7

참고문헌

- (1) Hartman, J. M., Levi Di Leon, R. and Taine, J., 1984, *JQSRT*, 32, pp. 119~127.
- (2) Rothman, L. S., Gamache, R. P., Tipping, R. H., Rinsland, C. P., Smith, M. A. H., Benner, D. C., Devi, V. M., Flaud, J. M., Peyret, C. C., Goldman, A., Massie, S. T., Brown, L. R. and Toth, R. A., 1992, *JQSRT*, 48, pp. 469~507.
- (3) Malkmus, W., 1967, *J. of the Optical Society*

- of America, 57, pp. 323~329.
- (4) Ludwig, C. B., Malkmus, W., Reardon, J. E. and Thompson, 1973, NASA SP-3080, Washington, D. C.
- (5) Soufiani, A. and Taine, J., 1997, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 40, pp. 987~991.
- (6) Edwards, D. K., 1976, Molecular gas band radiation. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 12, Academic Press, New York, pp. 115~193.
- (7) Modak, A. T., *JQSRT*, 1979, 21, pp. 131~142.
- (8) Lallemand, N. and Webber, R., 1995, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 39, pp. 3273~3286.
- (9) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (10) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, *ASME J. of Heat Transfer*, 104, pp. 602~608.
- (11) Lockwood, F. C. and Shah, N. G., 1981, In *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1405~1414.
- (12) Kim, T. K., Menart, J. A. and Lee, H. S., 1991, *ASME J. of Heat Transfer*, 113, pp. 946~952.
- (13) Goody, R. M., 1964, *Atmospheric Radiation*, Clarendon Press, Oxford, pp. 122~170.
- (14) Young, S. J., 1977, *JQSRT*, 18, 1~28.
- (15) Lindquist, G. H. and Simmons, F. S., 1972, *JQSRT*, 12, pp. 807~820.
- (16) Zhang, L., Soufiani, A. and Taine, J., 1988, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 31, pp. 2261~2272.
- (17) Goody, R., West, R., Chen, L. and Crisp, D., 1989, *JQSRT*, 42, pp. 539~550.
- (18) Riviere, P., Scutaru, D., Soufiani, A. and Taine, 1994, J., In *Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference*, Vol.2, Brighton, UK, pp. 129~134.
- (19) Riviere, P., Soufiani, A. and Taine, J., 1992, *JQSRT*, 48, pp. 187~203.
- (20) Lee, P. Y. C., Hollands, K. G. and Raithby, G. D., 1996, *ASME J. of Heat Transfer*, 118, pp. 394~400.
- (21) Song, T. H. and Viskanta, R., 1986, *ASME Paper No. 86-WA/HT-36*.
- (22) Denison, M. K. and Webb, B. W., 1993, *ASME J. Heat Transfer*, 115, pp. 1004~1012.
- (23) Denison, M. K. and Webb, B. W., 1995, *ASME J. Heat Transfer*, 117, pp. 359~365.
- (24) Denison, M. K. and Webb, B. W., 1994, In *Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference*, Vol. 2, Brighton, UK, pp. 19~24.
- (25) Kim, O. J. and Song, T. H., 1996, *Numerical Heat Transfer, Part B : Fundamentals*, 30, pp. 453~468.
- (26) Kim, O. J. and Song, T. H., 1997, *Radiation '97 International Symposium on Radiative Transfer II*, Kusadasi, Turkey, pp. 445~459.
- (27) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, New York.