〈논 문〉

회체가스중합법에 의한 수증기의 파장별 복사물성치 모델에 관한 연구

김욱중* · 송태호**

(1996년 5월 10일 접수)

A Study on the WSGGM-Based Spectral Modeling of Radiation Properties of Water Vapor

Ook Joong Kim and Tae-Ho Song

Key Words: Radiation(복사), Absorption Coefficient(흡수계수), Narrow Band(좁은 밴드), Emissivity(방사율), Radiation Intensity(복사강도)

Abstract

Low resolution spectral modeling of water vapor is carried out by applying the weighted-sum-of-gray-gases model (WSGGM) to a narrow band. For a given narrow band, focus is placed on proper modeling of gray gas absorption coefficients vs. temperature relation. The gray gas absorption coefficients become the basic radiative properties which can be used for any solution methods for the Radiative Transfer Equation (RTE). Comparison between the modeled emissivity and the 'true' emissivity obtained from a high temperature statistical narrow band parameters is made for the total spectrum as well as for a few typical narrow bands. Application of the model to nonuniform gas layers is also made. Low resolution spectral intensities at the boundary are obtained for uniform, parabolic and boundary layer type temperature profiles using the obtained WSGGM's with 9 gray gases. The results are compared with the narrow band spectral intensities as obtained by a narrow band model-based code with the Curtis-Godson approximation. Good agreement is found between them. Local heat source strength and total wall heat flux are also compared for the cases of Kim et al,[19] which again gives promising agreement.

기 호 설 명

c	: 빛의 속도(m/s)
E	: 오차의 표현
$E(v,J)$	: 진동과 회전 양자수(quantum number)가 각각 v, J인 상태에서의 에너지(J)
h	: 플랑크상수 ($=6.63\times10^{-34}$J·s)
I	: 복사강도(W/m²·sr)
$I_{b\eta}$	: 파장에 따른 흑체복사강도(W·cm/m²·sr)
k	: 볼쯔만상수($=1.38\times10^{-23}$J/K)
k_t	: 회체가스의 흡수계수(1/m)
k_η	: 파장에 따른 흡수계수(1/m)
k_{io}	: 모델링상수
L	: 경로 길이(m)
M	: 회체가스의 수
P	: 압력(m)
s	: 시선(line of sight)에 따른 거리(m)
$S_{vj}^{v'J'}$	: vJ 에서 v'J'로의 천이에 따라 나타난 흡수계수의 적분값

*회원, 한국기계연구원 열유체시스템연구부
**회원, 한국과학기술원 기계공학과

T : 온도(K)
W : 가중치

그리스문자

α_i : 흡수계수 모델을 위한 상수(K)
ϵ : 가스 방사율
η : 파수(wavenumber) (1/cm)
ρ_{abs} : 가스의 밀도(kg/m^3)
σ : 스테판볼쯔만상수($=5.67\times10^{-8}$W/m^2·K^4)

하첨자

abs : 흡수가스
b : 흑체
i : 회체가스
m : 모델치
t : 기준치
η : 파장 혹은 파수

1. 서 론

각종 노(furnace)를 포함하여 보일러, 가스터빈, 우주선 추진기구, 원자로 및 연료전지 등 고온의 열전달문제를 다루는데 있어서 복사 열전달 연구는 매우 중요하다. 이러한 복사열전달에 대한 연구동향은 최근 복사물성치(특히 가스에서의)를 예측하기 위한 이론 모델의 개발 및 측정분야와 복사전달 방정식의 해를 비교적 간단하게 구하기 위한 근사해법에 대한 연구로 크게 대별되고 있다.[1] 이러한 두 가지 연구방향은 완전히 분리, 독립되어 있는 것은 아니며 서로 많은 연관성을 가지고 있다. 특히 비회체가스(nongray gas)의 복사 성질에 대한 모델링은 근사 해법의 계산결과에 큰 영향을 미치게 되므로 가스의 복사 성질의 예측은 매우 중요한 연구 과제가 되고 있다.

가스의 복사 성질에 대한 모델링은 좁은 밴드 모델(Narrow Band Model, Ludwig 등), 넓은 밴드 모델(Wide Band Model, Edwards 등), 회체가스 중합 모델(Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model, Hottel, Smith 등) 및 실험적으로 구한 차트나 그래프 등이 널리 사용되고 있다.[2~6] 이와 같이 여러 가지의 모델링 방법이 있으나 각종 복사 열전달 해법에의 적용면에 있어서 완벽한 것은 없으며 저마다의 장·단점을 보유하고 있다. Song은 이러한 모델링의 평가방법으로, 어떠한 복사방정식 해법에도 이용이 가능하고, 원하는 정확도내에서 손쉽게 확장이 가능하며 계산시간이 너무 길지 않은 점을 만족하면 좋은 모델링의 방법이라고 제시한 바 있다.[7]

다양한 복사 방정식 해법에의 적용성 면에서 가장 이상적인 방법은 가스의 흡수계수를 직접 모델링하는 방법으로서 최근 Goody, Taine 등에 의해 활발하게 연구되고 있는 CK(cumulative-k distribution) 모델이나 Webb 등이 제시한 SLWGGM (Spectral Line Based WSGGM)은 매우 좋은 예가 되고 있다.[8~10] 이 모델들은 모델링에 상당한 노력이 필요하나 일단 모델링이 끝나면 계산시간이 길지 않으며, 쉽게 확장이 가능함을 알 수 있다. 그리고 WSGGM의 경우는 임의의 복사 방정식 해법에 쉽게 적용이 가능한 면에서 최근 주목을 받고 있다.[11] 그러나 이 두 가지 방법을 포함한 지금까지의 모델링은 대상 가스의 파장별(spectral) 특성이 무시된 채 경로 길이(path length)나 압력, 온도 등의 변화에 따른 전체 방사율(total emissivity)이나 그 결과를 이용한 열전달률의 계산이 주 관심대상이 되고 있다.

따라서 본 연구는 앞의 모델들과 같이 흡수 계수를 직접 모델링하면서도 비회체가스의 파장별 복사 전달량이 고려된 가스의 복사물성치 모델을 개발하고자 수행되었다. 이를 위하여 공학적으로 널리 응용이 되고 있는 좁은 밴드(narrow band) 모델의 하나인 Taine의 SNB (Statistical Narrow Band)에 기초하여 파장 특성이 포함된 WSGGM을 수행하였다.[12~14] 개발된 모델을 사용하여 수증기의 방사율을 계산하여 몇 가지 대표적 파장과 전체 파장에 대하여 기준치와 비교하여 보고, 온도 분포가 일정한 형태와 포물선 형태 및 경계층 형태로 알려진 1차원 문제에 대하여 복사강도와 단위면적 당 열유속 등을 계산하여 기준치와 비교함으로써 개발된 모델의 타당성을 보이고자 한다.

2. 모델링 방법

주어진 경로 길이와 온도하에서 25cm^{-1} 정도의 파장 간격에 대하여 WSGGM에 근거한 파장별 가스 방사율(narrow band spectral emissivity, $\varepsilon_{\eta m}$)을 표현하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_{\eta m}(T, L)=\sum_{i=1}^{M}(1-e^{-k_i L})\,W_i(\eta) \qquad (1)$$

여기서 k_i는 이산화(discrete)된 회체가스의 흡수계수(gray gas absorption coefficient)이며, L과 M은 각각 경로 길이(path length)와 회체가스의 수를 나타낸다. 그리고 $W_i(\eta)$는 파장별 가중치로서 좁은 밴드의 파수(wavenumber) η에 따라 달라지는 값이다. 본 연구에서 이 파장별 가중치는 온도에 무관한 것으로 가정하였다. 또한 하나의 좁은 밴드에서 하나의 회체가스가 차지하는 파수 구간의 시작과 끝은 모든 온도에 대하여 일정한 것으로 가정함으로써 온도가 불균일한 매체(inhomogeneous media)에 대하여 복사 전달 방정식을 그 회체가스가 차지하는 파수 구간에 대하여 적분할 때 적분의 위와 아래끝 파수가 위치에 따라 달라지면 나타나게 되는 Leibniz 항을 제거하였다.[10] 온도와 가스의 종류 및 밀도(또는 가스 분압)에 따라 변화하는 흡수계수(k_i)는 다음과 같이 모델링하였다.

$$k_i = k_{io}\frac{P_{abs}}{T^2}e^{-a_i/T} \tag{2}$$

이러한 형태는 참고 문헌[2, 식 (2-65)]에 나타난 이원자 분자의 선 세기(line strength)에 대한 식으로부터 유도하였다. 즉 흡수계수는 가스의 압력에 비례하므로

$$k_i \sim S_{vJ}^{v'J'}P_{abs} \tag{3}$$

로 나타낼 수 있으며, 이원자 분자의 선세기를 나타내는 $S_{vJ}^{v'J'}$는 분배함수(partition function)가 온도에 비례하는 것으로 생각하면 다음과 같이 표현된다.

$$S_{vJ}^{v'J'} = F(\eta)\frac{\rho_{abs}}{P_{abs}T}e^{-E(v,J)/kT}(1-e^{-hc\eta/kT}) \tag{4}$$

여기서 함수 $F(\eta)$는 상수인 $8\pi^3/3hc$와 진동과 회전에 의하여 발생하는 천이현상을 표현하는 행렬들과의 곱을 나타낸다. 그리고 마지막 항 $(1-e^{-hc\eta/kT})$은 실제(true) 흡수계수를 공칭(nominal) 흡수계수로 바꾸어 주는 것을 나타낸다. 따라서 식 (2)는 이 마지막 항과 $F(\eta)$의 곱을 상수 k_{io}로, $-E(v, J)/k$를 a_i로 표현한 것이 된다. 여기서 k_{io}와 a_i는 식 (4)에 나타나 있는 바와 같이 파장의 함수이나 모델링의 편의상 전스펙트럼에 대해 동일한 값을 사용하였다. 이 k_{io}와 a_i값의 선택에 따른 결과의 변화는 추후 언급할 것이다. 최종적으로 각각의 좁은 밴드에서 결정해야 할 모델링 인자로는 회체가스에 대한 가중치 즉 $W_i(\eta)$만 남게 된다.

모델링 변수는 여러 연구자들이 사용했던 것과 마찬가지로 오차에 대한 식을 세우고 이 오차를 최소화함으로써 구하였다. 일반적으로 오차는 하나의 좁은 밴드에 대해서 주어진 온도와 경로 길이의 범위에서의 방사율에 대한 기준치와 모델치의 차이로 나타내며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_\eta = \int_T\int_L g(\varepsilon_{\eta m}, \varepsilon_{\eta t})\,dLdT \tag{5}$$

여기에서 $\varepsilon_{\eta t}$는 그 좁은 밴드에서의 실제 평균 방사율이다. 그리고 $g(\varepsilon_{\eta m}, \varepsilon_{\eta t})$는 오차에 대한 표현으로서 가장 널리 사용되고 있는 함수 형태로는 $g=(1-\varepsilon_{\eta t}/\varepsilon_{\eta m})^2$가 있다. 그러나 이러한 표현은 $\varepsilon_{\eta t}/\varepsilon_{\eta m}\gg 1$일 경우, $\varepsilon_{\eta t}/\varepsilon_{\eta m}\ll 1$일 경우에 비해 오차가 너무 과장되어 나타나며 비슷한 형태인 $g=(1-\varepsilon_{\eta m}/\varepsilon_{\eta t})^2$의 형태에서도 유사한 현상이 발생한다. 따라서 가장 바람직한 함수 형태는 예컨대 $\varepsilon_{\eta t}/\varepsilon_{\eta m}$이 2일 때와 0.5일 때에 동일한 값을 보이는 것이라고 생각된다. 몇 가지의 예비계산결과 $g=(\varepsilon_{\eta t}/\varepsilon_{\eta m}+\varepsilon_{\eta m}/\varepsilon_{\eta t}-2)$의 형태가 $\varepsilon_{\eta t}/\varepsilon_{\eta m}$값의 크기에 관계 없이 좋은 결과를 보여 이를 오차의 표현으로 채택하였다. 그리고 본 연구에서 실제의 계산시는 식 (5)를 다음과 같은 합의 형태로 바꾸어 사용하게 된다.

$$E_\eta = \sum_T\sum_L\left(\frac{\varepsilon_{\eta t}}{\varepsilon_{\eta m}}+\frac{\varepsilon_{\eta m}}{\varepsilon_{\eta t}}-2\right) \tag{6}$$

여기서 T와 L은 모델링 범위내에서 사용된 온도와 경로 길이들을 나타낸다. $\varepsilon_{\eta t}$로 나타낸 방사율의 기준치는 Taine 등의 좁은 밴드 모델 프로그램인 SNB를 사용하여 계산하였다.[12~14] 이 프로그램은 수증기를 포함한 각종 가스의 분광학적(spectroscopic) 데이터 베이스로서 널리 알려진 HITRAN을 기초로 하여 이론적으로 좁은 밴드 모델 변수를 계산한 것으로서 실험적 데이터에 기초한 Grosshandler의 RADCAL과 거의 동일한 것이다.[15,16] 이 두 가지 프로그램 모두 비등온 기체층에 대한 복사강도의 계산에는 Curtis-Godson 근사를 사용한다. 식 (1)과 식 (6)을 이용한 모델링 방법에서 첨자 η를 삭제하고 전체 스펙트럼에 대한 대한 가중치 W_i를 직접 구하는 것이 전통적인 WSGGM이었는데, 이에 비하면 본 방법은 W_i가

좁은 밴드 모델에서의 파수의 함수라는 점에서 다소 모델링이 번거롭다.

최소화 방법으로는 conjugate gradient법을 사용하였으며, 여기에 목적 함수인 식 (6)의 미분치를 해석적인 방법으로 구하여 활용하였다.[17]

계산결과의 비교를 위하여 1기압하의 수증기에 대한 모델링을 수행하였다. 모델링 온도와 경로 길이로는 각각 500~2500K와 0.01~10.0m를 선택함으로써 비교적 넓은 범위에 적용이 가능하도록 시도하였다. 모든 계산에서 각각 3개씩의 k_{io}와 α_i의 조합을 사용함으로써 결과적으로 9개의 회체가스를 이용한 WSGGM을 수행하였다. 먼저 k_{io}로는 1×10^9, 1×10^8, $1\times10^6 K^2/atm$을, α_i로는 500, 2000, 5000K를 사용하였다. 그리고 좁은 밴드의 간격으로는 $25cm^{-1}$를 사용하였으며, 전체 파장의 범위는 $150cm^{-1}$부터 $9300cm^{-1}$까지 계산하였다.

모델링 결과 전체 스펙트럼에 대한 모델링 오차는 5.0%로 나타났다. 여기서 전체 스펙트럼에 대한 모델링 오차는 온도가 균일한 1차원 문제에서 다음에 언급될 식 (9) 및 식 (10)을 이용하여 벽면에 대한 전복사 강도(total intensity)를 계산하고 이것을 그 온도에서의 흑체복사강도로 나누어줌으로써 구한 전방사율(total emissivity)에 대한 오차를 식 (6)과 같은 형태로써 계산한 것이다.

앞의 α_i와 k_{io}는 미리 약간의 통찰력을 가지고 결정하여야 한다. 만일 k_{io}와 α_i를 단 한 종류의 값만을 취하도록 하였다면 식 (2)로부터 각 좁은 밴드에서 온도에 따른 밴드 평균 방사율의 변화는 α_i만으로 결정되며, 특히 최고 및 최저 온도(T_{max}, T_{min})에서의 밴드 평균 방사율의 비를 구하면 α_i에 관하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\ln\frac{k_i(T_{max})\,T_{max}^2}{k_i(T_{min})\,T_{min}^2}=\alpha_i\left(\frac{1}{T_{min}}-\frac{1}{T_{max}}\right) \qquad (7)$$

따라서 기준이 되는 모델 혹은 실험치로부터 k_i를 구할 수 있다면 α_i의 값을 알 수가 있다. Fig. 1은 SNB로부터 구한 k_i를 이용하여 각 스펙트럼에서의 α_i를 보인 것이다. 그림에서 $T_{min}=500K$, 점선은 $T_{max}=1500K$까지를 각각 고려한 경우로서 그림을 보면 온도 범위에 따라 α_i가 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급된 세 가지 α_i값은 Fig. 1에 나타난 범위에서 비교적 작은 값, 중간 정도의 값, 그리고 최고에서 약간 낮은 값을 하나씩 취한 것이다.

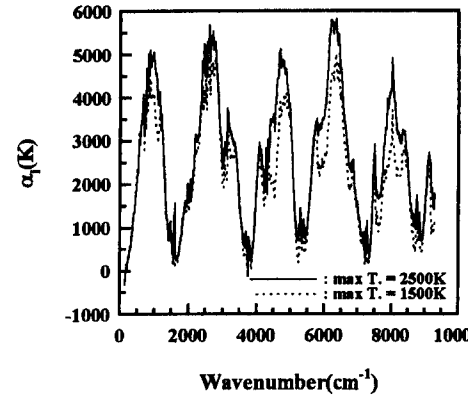


Fig. 1 Variation of temperature constant (α_i)

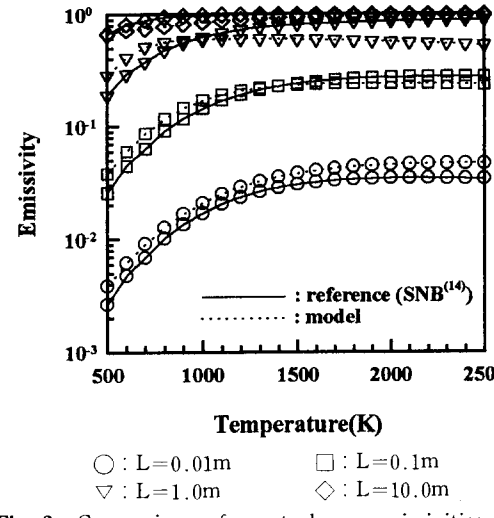


Fig. 2 Comparison of spectral gas emissivities for various temperatures and path lengths at $\eta=1200cm^{-1}$

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 수증기의 대표적인 적외선 흡수/방사 구간인 6.3μm 밴드와 2.7μm 밴드 주위에서의 온도와 경로 길이에 따른 방사율의 계산 결과를 비교한 것이다. 먼저 Fig. 2를 보면 가스의 방사율이 경로 길이에 관계 없이 온도에 따라 증가함을 알 수 있는데 이는 이 파장 구간에서 좁은 밴드 모델에서의 밴드 평균(band averaged) 흡수 계수가 온도에 따라 동일한 경향을 보이기 때문이다. 반면 Fig. 3은 앞의 경우와 달리 온도에 따라 방사율이 감소하는 파장에 대한 대표적인 경우로서 Fig. 2 나 Fig. 3의 경우 모두에 있어서 모델치와 기준치가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

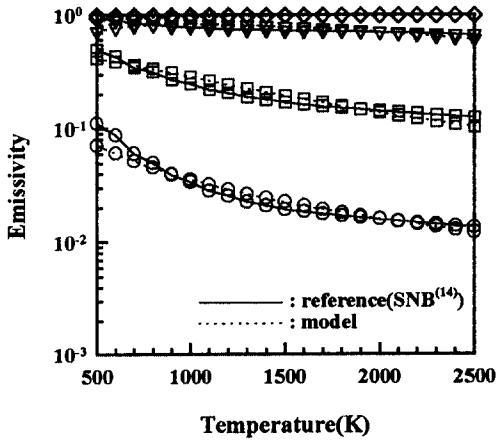


Fig. 2 Comparison of spectral gas emissivities for various temperatures and path lengths at $\eta=3800\text{cm}^{-1}$

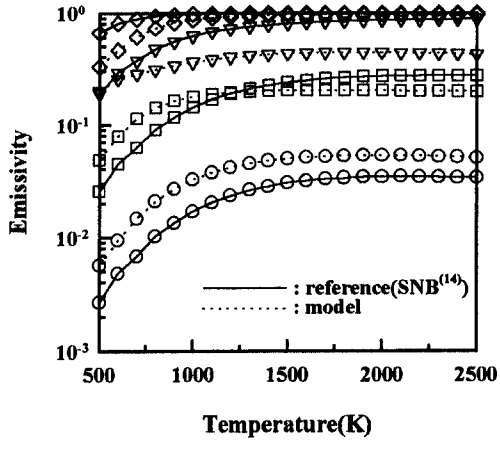


Fig. 4 Comparison of spectral gas emissivities using different temperature constant (a_i) at $\eta=1200\ \text{cm}^{-1}$

한편 Fig. 4는 Fig. 2에서 보인 좁은 밴드(1200 cm^{-1})에 대해 일종의 온도 상수인 a_i의 값만을 500, 1000, 4000K로 변화시켜 모델링한 결과를 보인 것으로서 Fig. 1과 비교하면 결과가 다소 다르게 나타남을 알 수 있다. 이것은 현재 전파장에 걸쳐 동일한 값으로 사용한 k_{io}와 a_i는 엄밀한 의미에서 파장에 따라 변화하는 값임을 보여주는 것으로써 가중치와 함께 이 값들 또한 파장에 따라 변

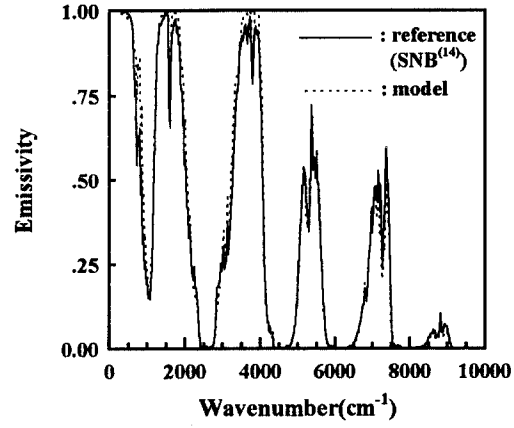


Fig. 5 Comparison of low resolution spectral gas emissivities at T=1000K and L=1.0m

화시키면 더 정확한 계산이 가능함을 알 수 있다. 단 그렇게 한 경우에는 전체 스펙트럼에 있어서의 WSGGM을 생각할 때 적용되는 k_{io}와 a_i의 종류가 너무 많아지므로 전체 스펙트럼에서의 복사 전달량 등을 구하고자 하는 목적에서는 적절치 않다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 하나의 좁은 밴드 대신 전 파장에 대한 결과를 보인 것으로 경로 길이가 1 m, 온도가 1000 K 일 때의 결과이다. 그림을 보면 일부 파장에서 약간 크게 모델링이 된 부분이 존재하나 전반적으로 기준차에 대단히 잘 일치하고 있어 파장별 방사율의 계산에 본 모델이 매우 유용함을 알 수 있다.

3. 모델의 타당성 검토

3.1 벽면에서의 전복사 강도 비교

본 연구에서 개발된 복사 물성치 계산 방법의 타당성을 조사하기 위해 다양한 온도 분포를 가진 1차원 가스 복사 문제를 해석하였다. 문제로는 최근의 연구에서 많이 다루어지고 있어 비교가 용이한 Fig. 6과 같은 세 가지 온도 분포에 대하여 벽면에서의 수직 방향 전복사 강도(total intensity) 계산을 선택하였다.[18,19] 그림에서 알 수 있듯이 균일한 온도 분포는 내부가 1000K, 양 벽면은 0K인 형태이며 포물선 형태의 온도 분포는 중앙의 온도가 1110K, 양 벽면의 온도가 400K이다. 그리고 경계층 형태의 온도분포는 왼쪽 벽면의 온도가 1500K, 다른쪽 벽면의 온도는 300K이다. 모든 경우에 있어서 벽면간의 거리는 1m, 전압력은 1atm이며 기

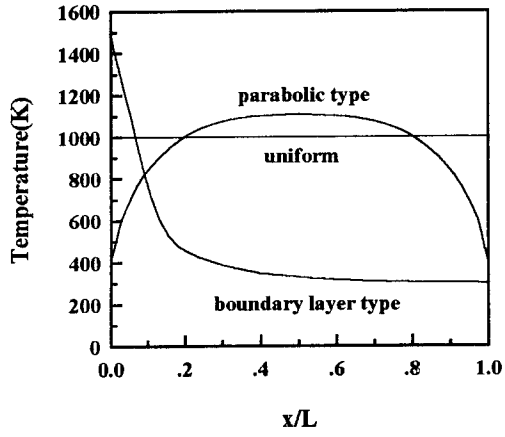


Fig. 6 Temperature profiles

체는 수증기만 존재하고 벽면은 흑체로 고려하였다.

위에서 언급된 1차원 문제의 경우, 벽면에서의 복사 강도는 다음과 같은 간단한 식으로 구할 수 있다.

$$I(0) = \int_0^\infty \int_0^L k_\eta(s) I_{b\eta}(s) \exp\left(-\int_0^s k_\eta(s')\,ds'\right) ds\,d\eta \qquad (8)$$

이것을 파장별 계산의 합의 형태로 나타내면 다음의 식 (9)와 같이 된다.

$$I(0) = \sum_{narrowbands} I_\eta(0)\,\Delta\eta \qquad (9)$$

여기서 $\Delta\eta$ 구간에서의 파장별 복사강도를 본 연구에서 개발한 WSGGM을 적용하여 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$I_\eta(0) = \sum_i^M \int_0^L k_i(\eta\,;\,s)\, I_{b\eta}(s)\, W_i(\eta) \exp\cdot \left(-\int_0^s k_i(\eta\,;\,s')\,ds'\right) ds \qquad (10)$$

모델링 과정을 통하여 구해진 흡수계수와 가중치를 이용하여 구한 결과를 Table 1에 나타내었다. 표에서 기준치는 SNB로 계산한 결과로서 앞에서 이미 언급한 바와 같이 좁은 밴드 모델에 Curtis-Godson 근사를 적용한 것이다. 표를 보면 온도 분포에 관계 없이 본 모델을 사용하여 계산한 값이 기준치에 대해 상대 오차가 약 5%로서 전체 스펙트럼에 대한 모델링 오차와 비슷한 수준으로 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

3.2 벽면에서의 파장에 따른 복사 강도 비교

앞의 경우와 동일한 온도 분포에 대하여 식 (10)에 나타낸 바와 같은 파장에 따른 복사 강도를 구하여 비교하였다. Fig. 7은 계산 결과를 보인 것으로써 기준치는 역시 Curtis-Godson 근사를 적용한 SNB로써 계산한 것이다. 그림을 보면, 포물선과 경계층 형태의 온도 분포에서 일부 파장 구간을 제외하고는 대체적으로 전 파장에 걸쳐 모델치가 계산치와 잘 일치함을 알 수 있다.

이와 같은 파장별 복사 강도 계산에서의 정확도를 알아 보기 위하여 다음과 같이 파장별 복사강도 크기의 가중치를 고려한 오차에 관한 식을 정의하였으며, 계산된 결과를 Table 2에 나타내었다.

$$E = \frac{\sum_\eta |I_{\eta m} - I_{\eta t}|}{\sum_\eta I_{\eta t}} \qquad (11)$$

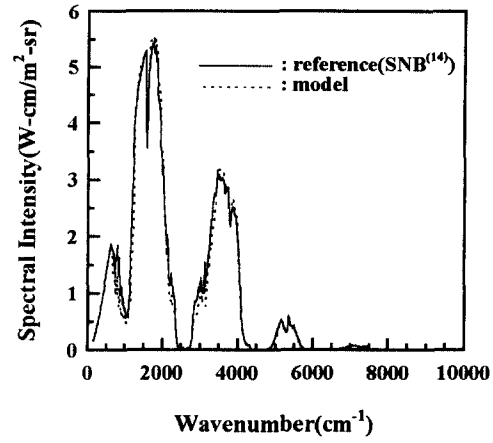
Table 2에서 그 오차는 앞의 전 복사 강도에 비해 약간 큰 10% 정도가 됨을 볼 수 있다. 이렇게 파장별 복사 강도 계산에서의 오차가 커지게 된 것은 상수(k_{io} 및 α_i)들을 파장에 따른 변수로서 구하여 사용하지 않았기 때문으로 생각된다.

3.3 복사 열원 분포 비교

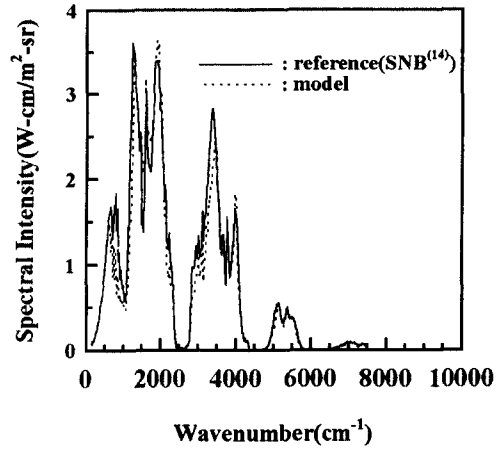
앞에서 고려한 온도 분포에 대하여 복사 열원(radiative heat source) 분포를 구하여 또한 비교하여 보았다. Fig. 8은 계산 결과를 보인 것으로 그림에서 기준치는 Kim의 방법에 의한 정확해(복사강도와 방사율의 상호 관계를 고려한 좁은 밴드

Table 1 Comparison of computed intensities(W/m²·sr) at the wall (numbers in brackets are percent errors from SNB)

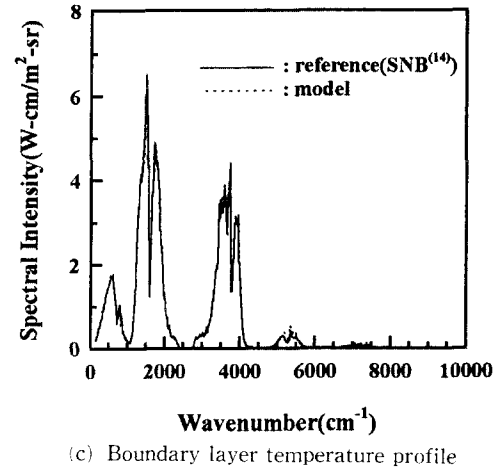
Profiles	Uniform temperature type	Parabolic temperature type	Boundary layer temperature type
SNB	8498.5	6131.7	6413.9
Model	8821.0(+3.8)	6423.6(+4.8)	6341.5(-1.1)



(a) Uniform temperature profile

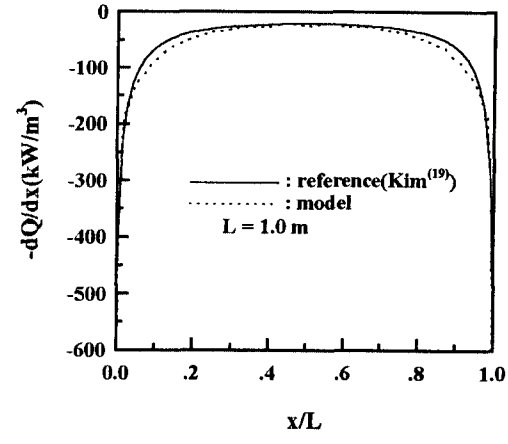


(b) Parabolic temperature profile

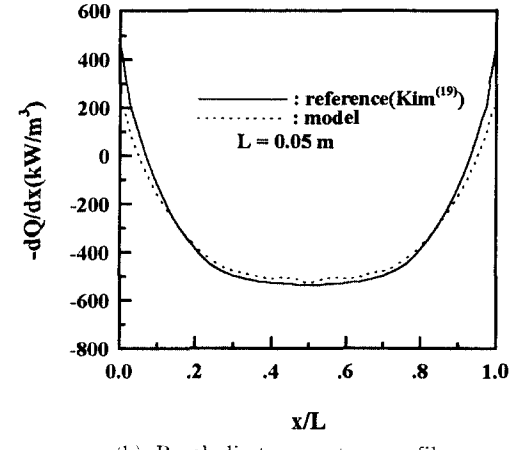


(c) Boundary layer temperature profile

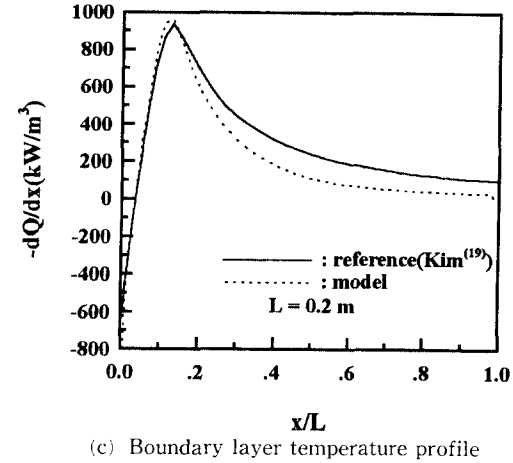
Fig. 7 Spectral intensity at the wall for various temperature profiles



(a) Uniform temperature profile



(b) Parabolic temperature profile



(c) Boundary layer temperature profile

Fig. 8 Comparison of radiative heat source for various temperature profiles

Table 2 Average spectral errors of intensity at the wall

Profiles	Uniform temperature type	Parabolic temperature type	Boundary layer temperature type
Errors(%)	6.5	11.1	11.5

Table 3 Comparison of computed intensities and average spectral errors using refined model (total intensity is in $W/m^2 \cdot sr$ and average spectral error is given by Eq. (11))

Profiles		Uniform temperature type	Parabolic temperature type	Boundary layer temperature type
Narrowing modeling temperatures	Total intensity	8539.8(+0.5)	6131.4(0.0)	6363.3(−0.8)
	Average spectral errors(%)	5.7	10.1	4.8

계산)이며 다만 포물선과 경계층 형태의 온도 분포에 대하여 경로 길이가 그림에 표시된 바와 같이 각각 0.05m, 0.2m로 바뀌어 있다.[19] 경계층 형태의 온도 분포를 제외하고는 대체적으로 서로 잘 일치함을 그림으로부터 알 수 있다. 일반적으로 보아 전체 스펙트럼에 대한 열원 크기 등은 스펙트럼별 계산치 보다 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서 한 가지 언급해야 할 것은 SNB에 의한 계산에 있어서 매질의 온도가 일정하지 않은 경우에는 Curtis-Godson 근사를 적용하는데, 이로 인하여 다소의 오차가 도입되므로 이 방법에 의한 정확해(Kim의 방법[19])와 WSGGM에 의한 결과 중 어떤 것이 절대적인 오차가 작을 것인지는 불분명하다는 것이다. 다만 여기서 말할 수 있는 것은 Kim의 방법은 그동안 신뢰도가 높다는 평판을 받아왔으므로 이 방법이 WSGGM과 유사한 결과를 준다면 이로써 WSGGM의 신뢰성을 또한 반증하는 것으로 생각할 수 있다.

3.4 종합 검토

본 연구에서 사용된 가스 중합법의 경우 일반적으로 모델링 범위(온도 및 경로 길이)나 사용한 회체가스의 수에 따라 정확도가 달라진다. 즉 회체가스의 수가 많을수록, 모델링 범위는 좁을수록 정확도는 향상된다. 온도에 관한 모델링 범위를 앞에서 발표한 문제에 적합하도록 줄여서(500K~1500K) 계산한 결과를 Table 3에 나타냈는데, 이것을 Table 1, 2와 비교하면 벽면에서의 전 복사강도와 파장별 복사강도의 계산 오차가 상당히 감소했음을 알 수 있다. 특히 경계층 형태 온도 분포의 경우 계산결과가 상당히 향상되었음을 볼 수 있으며, 만약 경로 길이의 범위와 회체가스의 수를 조정하면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

4. 결 론

회체가스 중합법에 기초하여 수증기의 파장별 복사 물성치 계산을 수행하였다. 각 좁은 밴드에서의 흡수계수를 몇 가지 상수를 포함한 온도에 관한 함수로 모델링하였으며, 최적화 기법으로 각 파장별 회체가스의 가중치를 계산하였다. 개발된 모델을 이용하여 계산한 온도에 따른 파장별 방사율은 기존의 좁은 밴드 모델로 계산한 기준치와 잘 일치하였다. 또한 균일한 온도 분포와 포물선 및 경계층 형태의 온도 분포를 가진 1차원 문제에 대하여 적용한 결과, 벽면에서의 전 복사강도를 비롯하여 파장별 복사강도 및 복사열원분포 등을 기준치(Curtis-Godson 근사를 이용한 좁은 밴드 계산) 대비 10 % 내외의 오차 범위내에서 계산할 수 있었다. 그리고 모델링 범위를 조절함으로써 보다 향상된 계산 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이상의 연구를 통하여 개발된 파장별 모델링 방법은

전통적으로 WSGGM에서 행하여 오던 전체 스펙트럼에서의 방사율 기준 모델링 방법과 비교하여 모델링의 용이성과 계산 시간의 면에서는 약간 불리하나 좁은 밴드에 대해 흡수 계수를 직접 모델링 한 것이므로 임의의 파장별 복사 방정식 해법에 적용이 가능하며 불균일한 온도 분포의 경우에도 Curtis-Godson 근사 등의 별도의 근사가 필요 없는 면에서 매우 유리하다. 또한 그 계산 결과는 좁은 밴드내의 평균 복사량을 잘 보이고 있으므로 특별한 좁은 밴드들에 대한 복사 강도의 정보가 필요한 기술 분야에 매우 응용도가 높다고 판단된다. 앞으로는 이산화 탄소를 포함한 실제 연소가스 혼합물에 대한 연구를 계속 수행하여 그 결과를 다른 연구자들이 사용할 수 있도록 데이터 베이스화 할 예정이다.

참고문헌

(1) 이준식, 1987, "복사열전달의 근사해법 및 응용, 대한기계학회지," Vol. 27, No. 3, pp. 226~236.

(2) Ludwig, C. B., Malkmus, W., Reardon, J. E. and Thompson, J. A. L., 1973, "Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases," *NASA SP*-3080, Washington, D. C. p. 47.

(3) Edwards, D. K., 1976, "Molecular Gas Band Radiation," *Advances in Heat Transfer,* Vol. 12, Academic Press, New York, pp. 115~193.

(4) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., 1967, *Radiative Transfer,* McGraw-Hill, New York.

(5) Smith, T. F., Shen, Z. F. and "Friedman, J. N., 1982, Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME J. of Heat Transfer,* Vol. 104, pp. 602~608.

(6) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, *Thermal Radiation Heat Transfer,* 3rd ed. McGraw-Hill, New York.

(7) Song, T. H., 1993, "Comparison of Engineering Models of Nongray Behavior of Combustion Products," *Int. J. Heat and Mass Transfer,* Vol. 36, pp. 3975~3982.

(8) Goody, R., West, R., Chen, L. and Crisp, D., 1989, "The Correlated-k Method for Radiation Calculation in Nonhomogeneous Atmospheres," *J. of Quant. Spectrosc. Ratiat. Transfer.* Vol. 42, No. 6, pp. 539~550.

(9) Riviere, P., Scutaru, D., Soufiani, A. and Taine, J., 1994, "A New ck Data Base Suitable from 300 to 2500K for Spectrally Correlated Radiative Transfer in CO2-H2O-Transparent Gas Mixtures," *Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference,* Vol. 2, Brighton, UK, pp. 129~134.

(10) Denison, M. K. and Webb, B. W., 1993, "A Spectral Line-Based Weighted-sum-of- Gray -Gases Model for Arbitrary RTE Solvers," *ASME J. Heat Transfer,* Vol. 115, pp. 1004~1012.

(11) Modest, M. F., 1991, "The Weighted-Sum-of -Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 650~656.

(12) Riviere, P., Langlois, S., Soufiani, A. and Taine, J., 1995, "An Approximate Data Base of H2O Infrared Lines for High Temperature Applications at Low Resolution Statistical Narrow-Band Model Parameters," *J. of Quant. Spectrosc. Ratiat. Transfer.* Vol. 53, No. 2, pp. 221~234.

(13) Scutaru, D., Rosenmann, L. and Taine, J., 1994, "Approximate Intensities of CO2 Hot Band at 2.7, 4.3 and 12μm for High Temperature and Medium Resolution Applications," *J. of Quant. Spectrosc. Ratiat. Transfer.* Vol. 52, No. 6, pp. 765~781.

(14) Soufiani, A. and Taine, J., 1995, High Temperature Gas Radiative Property Parameters of Statistical Narrow-Band Model for H_2O, CO_2 and CO and Correlated-K(ck) Parameters for H_2O and CO_2 in press in *Int. J. Heat and Mass Transfer.*

(15) 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., The HITRAN Molecular Database : Editions of 1991 and 1992, *J. of Quant. Spectrosc. Ratiat. Transfer*. Vol. 48, No. 5/6, pp. 469~507.

(16) Grosshandler, W. L., 1980, "Radiative Heat Transfer in Nonhomogeneous Gases : A Simplified Approach," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1447~1459.

(17) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, NewYork.

(18) Kim, T. K., Menart, J. A., and Lee, H. S., 1991, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Discrete Ordinates Method," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 946~952.

(19) Kim, T. K., 1990, Radiation and Combined Mode Heat Transfer Analysis in Absorbing, emitting, and Mie-Anisotropic Scattering Media Using the S-N Discrete Ordinates Method, Ph. D. thesis, The University of Minnesota.