

이산화탄소-수증기 혼합가스에 대한 파장별 회색가스가중합법에서 회색가스재조합에 대한 연구

박 원 희* · 김 태 국*

(2002년 8월 12일 접수, 2002년 12월 7일 심사완료)

Study on Regrouping of Gray Gases in spectral WSGGM for Arbitrary Mixtures of CO₂ and H₂O Gases

Won-Hee Park and Tae-Kuk Kim

Key Words: Radiation(복사), WSGGM(회색가스가중합법), Transmissivity(통과율), Gas Mixture(혼합가스), Gray Gas Regrouping(회색가스 재조합), Overlapping Band(겹침밴드)

Abstract

The WSGG-based narrow band model was employed to solve the radiative transfer equations along isothermal and non-isothermal paths through CO₂-H₂O-N₂ gas mixtures at 1 atm. When the WSGGM is applied for arbitrary gas mixtures by considering the multiplication property of transmissivity in overlapping bands, the number of gray gases is significantly increased. To reduce the computation time, three different regrouping methods for the gray gases are tested in obtaining the mean absorption coefficient for each gray gas group. Among them, the regrouping method by minimizing the regrouping error shows the best results. For the isothermal media, 10 gray gases show fairly good agreement with the results by statistical narrow band(SNB) model which are regarded as reference solutions. For non-isothermal media, 20 gray gases show good agreement with reference solutions.

기호설명

<p>E : 재조합 오차를 나타내는 목적함수</p> <p>I : 복사강도 [$W/m^2 \cdot sr$]</p> <p>k : 흡수계수 [m^{-1}]</p> <p>L : 경로길이 [m]</p> <p>M : 순수가스의 회색가스 수</p> <p>N_{mix} : 혼합가스의 회색가스 수</p> <p>N_{new} : 재조합 후의 회색가스 수</p> <p>P_{abs} : 대기압 [$1 atm$]</p> <p>s : 거리 [m]</p>	<p>T : 온도 [K]</p> <p>W : 가중치</p> <p style="text-align: center;">그리스문자</p> <p>α_i : 모델링상수 [K]</p> <p>ϵ : 방사율</p> <p>τ : 통과율</p> <p style="text-align: center;">상첨자</p> <p>$-$: 좁은밴드 평균</p> <p style="text-align: center;">하첨자</p> <p>b : 흑체</p> <p>η : 파장</p>
--	---

+ 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : kimtk@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5282 FAX : (02)814-9476

* 중앙대학교 대학원

i	: i 번째 회색가스
j	: j 번째 격자
mix	: 혼합가스
new	: 재조합

1. 서론

비회색가스에 대하여 정확하며 효율적인 모사를 할 수 있는 모델의 개발은 많은 실용적인 장치들의 설계에서뿐만 아니라 연소 현상 및 화염 구조에 대한 기초 연구에 있어서도 매우 중요하다. 비회색 복사열전달을 해석하는 모델 중 가장 정확한 모델은 모든 복사선을 직접적으로 계산하는 line-by-line^(1,2)법이라 할 수 있다. 하지만 이 모델의 경우 복사에 관여하는 모든 파장대를 고려하고자 할 경우 약 10^6 개의 복사선을 고려해야하므로 공학적인 계산을 하기에는 계산량이 너무 많다. 그러므로 근사적인 여러 가지 모델들이 제안되고 있다. 이들 중 한정된 파장 구간에서의 복사 성질을 평균하여 나타내는 방법으로 밴드모델이 있으며 밴드의 두께에 따라 넓은 밴드모델^(3,4)과 좁은밴드모델⁽⁵⁻⁷⁾로 나눌 수 있다.

가스복사의 파장별 특성을 잘 나타낼 수 있는 좁은밴드모델들은 두가지 유형으로 나뉘어 질 수 있다. 첫 번째는 SNB (Statistical Narrow Band) 모델로 밴드의 통과율을 구하는 방법이며, 이 방법을 이용하여 복사열전달방정식을 해석할 경우에는 몇 가지 어려움이 있다. 즉, 매체가 균일하지 않거나 온도의 변화가 있을 때 Curtis-Godson 근사법⁽⁸⁾등으로 그 시선에 대한 평균적인 통과율을 구해야 한다는 점이다. Zhang et al.⁽⁹⁾과 Kim et al.⁽¹⁰⁾은 복사강도와 통과율 간의 상관관계가 좁은밴드에서도 중요하게 작용한다고 지적하였으며, 이러한 상관관계에 대한 고려는 복사열전달 방정식의 해석을 매우 복잡하게 하며 계산시간은 기하급수적으로 증가될 수 있다. 두 번째로는 Hottel et al.⁽¹¹⁾에 의하여 제안된 회색가스 가중합법(WSGGM, Weighted Sum of Gray Gases Model)의 개념을 근거로한 방법들이다. 이러한 방법들로는 좁은밴드에서의 회색가스가중합법(WSGGM based narrow band)^(12,13)과 correlated-k(CK)⁽¹⁴⁾ 모델 등이 있으며, 이 방

법들은 흡수계수에 대한 정보를 산출하여 내므로 어떠한 복사열전달 기법에도 쉽게 이용될 수 있는 이점이 있다.

비교적 간단하며 높은 정확도를 보이는 회색가스가중합법은 여러 개의 회색가스의 가중합으로 총괄 방사율을 모델링하는 방법으로 Smith⁽¹⁵⁾의 모델링 결과가 많이 이용되고 있으며, Modest⁽¹⁶⁾는 이러한 회색가스가중합법이 임의의 복사열전달방정식에 쉽게 적용이 가능한 것을 증명해 바 있다. 그러나 기존의 총괄방사율을 모델링하는 회색가스가중합법이나 좁은밴드에서의 회색가스가중합법의 연구 등은 모두 순수 이산화탄소나 수증기 또는 고정된 분압으로 혼합된 가스에만 적용되어 왔으며 불균일한 매체에 대하여는 사용할 수 없었다.

본 연구에서는 혼합가스에 대한 좁은밴드에서의 통과율이 각 가스 별 통과율의 곱으로 나타낼 수 있다는 성질을 이용하여 임의의 비율로 혼합된 혼합가스를 대상으로 회색가스가중합법의 적용에 대한 연구를 하였다. 이 과정에서 중첩되는 밴드로 인하여 많은 수의 회색가스를 고려하여야 하는 문제가 발생하는데 이 문제는 흡수계수의 크기가 비슷한 회색가스들을 재조합(regrouping)하는 방법에 의하여 회색가스의 수를 줄임으로서 실용화가 쉽도록 하였다.

2. 모델 및 해석 방법

2.1 중첩밴드에서의 회색가스가중합법

단일 성분으로 구성된 가스의 경우 주어진 경로 길이, 온도 하에서의 좁은밴드평균통과율(narrow band mean transmittance, $\bar{\tau}_\eta$)은 다수의 회색가스에 의한 통과율을 가중적으로 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\tau}_\eta = \sum_i^M W_i(\eta) e^{-k_i L} \quad (1)$$

여기서 k_i 는 i 번째 회색가스의 흡수계수, L 은 경로길이, M 은 회색가스의 수이고, $W_i(\eta)$ 는 각 회색가스의 가중치를 나타낸다. 흡수계수는 다음과 같은 모델식을 고려하였다.⁽¹³⁾

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

여기서 P_{abs} 는 대기압이며 k_{i0} 와 α_i 는 각각 흡수계수 모델 상수를 나타낸다.

좁은 밴드 내에서 CO₂ 및 H₂O로 구성된 혼합가스에 의하여 중첩되는 평균통과율은 각 가스별 평균통과율을 곱하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁹⁾

$$\bar{\tau}_{\eta, mix} = \bar{\tau}_{\eta, CO_2} \cdot \bar{\tau}_{\eta, H_2O} \quad (3)$$

여기서, 각 가스의 좁은밴드 평균통과율은 회색가스가중합법을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 식 (3)에 나타낸 혼합 가스의 통과율을 식 (1)과 같은 모양으로 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{\tau}_{\eta, mix} = \sum_{i=1}^{N_{mix}} W_{i, mix}(\eta) e^{-k_{i, mix}L} \quad (4)$$

식 (1), (3) 및 (4)를 비교하면 혼합가스의 가중치와 흡수계수는 각각 다음과 같다.

$$W_{i, mix}(\eta) = W_{i, CO_2}(\eta) \times W_{i, H_2O}(\eta) \quad (6)$$

$$k_{i, mix} = k_{i, CO_2} + k_{i, H_2O} \quad (7)$$

혼합가스를 고려하여 식 (2) 및 (5)에 나타나는 모델값(k_i , W_i 등)에 대한 WSGGM Data Base를 구축하기 위하여 수증기와 투명한 기체인 질소와의 혼합가스에서 수증기의 분압을 0.05 기압 단위로 0 기압에서 1 기압까지 기준값(SNB)⁽¹⁷⁾과 모델링 값의 오차가 최소가 되도록 가중치를 산출하였으며,⁽¹⁸⁾ 이산화탄소와 질소의 혼합가스에 대하여도 수증기와 같은 분압에 대하여 가중치를 산출하였다. 모델링에서 고려된 온도 범위는 500~2500 K 및 경로길이 범위 0.01~10 m로서 비교적 넓은 온도 및 경로길이 범위를 고려하였다. 수증기의 경우 150~9300 cm⁻¹의 파동수 범위 내에서 고려하고, 이산화탄소의 경우에는 6000 cm⁻¹이상의 파동수에는 투명하므로 150~6000 cm⁻¹의 파동수를 고려하였으며, 각각의 가

스에 대하여 25 cm⁻¹ 간격의 좁은밴드 간격으로 해석을 수행하였다. 여기서 흡수계수를 나타내는데 필요한 상수 k_{i0} 는 3×10¹⁰, 3×10⁹, 3×10⁸, 3×10⁷, 3×10⁶, 3×10⁵ K²/atm로 설정하였으며 α_i 는 500, 2000, 5000, 8000, 15000 K로 하였다.⁽¹³⁾ 이렇게 모델링 상수를 설정할 경우 30개의 회색가스를 가중합하는 결과로 나타나게 된다. 이산화탄소-수증기의 경우 25cm⁻¹의 밴드간격으로 고려할 때 SNB 데이터에서 450~1200, 1950~2450, 3300~3800, 4700~5250 cm⁻¹ 구간에서 96개의 중첩밴드를 찾아볼 수 있다. 이러한 중첩밴드에 대하여 좁은밴드 회색가스가중합법을 이용할 경우에는 많은 수의 회색가스가 필요하게 된다. 비슷한 크기의 흡수계수를 가진 회색가스를 재조합하여 나타내지 않을 경우 새로운 회색가스의 수 N 은 $M_{CO_2}=M_{H_2O}=M$ 일 때 $N=M+(M^2 - M)/2$ 개이다. 본 연구의 경우 이산화탄소 및 수증기 각각의 가스를 30개의 회색가스로 나타내었으므로, 혼합가스의 회색가스의 수는 465개이다. 이렇게 많은 수의 회색가스를 이용할 경우에는 그 회색가스 수만큼 복사열전달 방정식을 해석하여야하므로 복사열전달의 해를 구하는데 많은 계산 시간이 소요되는 단점이 발생된다. 다음절에서는 혼합가스에 대하여 회색가스가중합법을 적용할 때 발생하게 되는 과도한 회색가스 수를 대폭 줄이기 위하여 도입된 회색가스의 제조함에 대하여 언급하고자 한다.

2.2 회색가스의 제조합

전절에서 언급되었듯이 임의의 비율로 혼합된 혼합가스를 모사하기 위하여 고려되는 회색가스의 수는 수백개에 달하며, 이들 각각의 회색가스에 대하여 복사열전달방정식을 계산할 경우 많은 계산 시간이 요구된다. 따라서 흡수계수의 크기가 비슷한 회색가스들을 재조합하여 혼합가스의 수를 줄여서 흡수특성을 모사하는 방법이 도입될 필요가 있다. 식 (2)를 살펴보면 회색가스의 흡수계수는 대기압 하에서 온도가 1000K일 때 약 10⁻⁷~10⁻⁵ 사이의 값을 가지게 되는 것을 알 수 있다. 각 회색가스의 통과율은 $\exp[-k_{i, mix}L]$ 와 같이 표현되며 이것은 0과 1사이의 값을 갖는다. 이러한 통과율 값의 크기 범위를 임의의 N_{new} 개로 나누고 각각의 회색가스가 갖는 통과율의 크기에 따라 N_{new} 개의 그룹으로 재분류할 수 있다.

여기서 N_{new} 는 재조합을 통해 얻어질 회색가스의 수를 나타낸다. 이 때 i, new 번째 크기의 통과율 범위에 속하는 회색가스의 평균 흡수계수 $k_{i, new}$ 는 다음의 3가지 방법을 이용하여 구할 수 있다.

① 흡수계수의 산술 평균을 고려 (Model I)

$$k_{i, new} = \frac{1}{N_{i, new}} \sum_{i=1}^{N_{i, new}} k_i \quad (7)$$

여기서 $N_{i, new}$ 는 i, new 그룹에 속하는 회색가스의 수를 나타낸다.

② 통과율의 산술 평균을 고려 (Model II)

$$k_{i, new} = -\frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{N_{i, new}} \sum_{i=1}^{N_{i, new}} \exp[-k_i L] \right) \quad (8)$$

③ 최적화 기법을 이용 (Model III)

좁은밴드별 회색가스 가중합법의 새로운 흡수계수를 구하기 위하여 각 회색가스의 통과율에 대한 오차 함수를 나타내는 다음과 같은 목적함수를 고려하였다.

$$E_{i, new} = \sum_{i=1}^{N_{i, new}} \left(\frac{\exp(-k_i L)}{\exp(-k_{i, new} L)} + \frac{\exp(-k_{i, new} L)}{\exp(-k_i L)} - 2 \right) \quad (9)$$

통과율에 대한 오차를 나타내는 목적함수 $E_{i, new}$ 를 최소화하기 위하여 최적화 기법⁽²¹⁾이 이용되었으며 이를 통하여 최적변수 $k_{i, new}$ 를 구하였다.

Model I, II, III와 같이 재조합된 후의 새로운 i, new 번째 회색가스에 대한 가중치는 단순히 원래의 회색가스들에 대한 가중치 (W_i)를 합

하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{i, new} = \sum_{i=1}^{N_{i, new}} W_i \quad (10)$$

3. 결과 및 검토

3.1 1차원 매질에 대한 복사열전달 방정식

임의의 비율로 혼합된 혼합가스에 대하여 각각 일정한 온도분포 및 불균일한 온도분포를 가진 1차원 매질을 통과한 후의 좁은밴드 평균복사강도를 앞서 언급한 과장별 WSGGM을 적용하여 구하였다. 좁은밴드별 WSGGM을 이용하여 1차원 매질을 통과한 후의 복사강도를 구하기 위하여 다음과 같은 차별화된 방정식을 고려하였다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{i, j+1} &= \bar{I}_{i, j} \exp[-k_{i, j+1/2}(s_{j+1}-s_j)] \\ &+ W_{i, j+1/2} \bar{I}_{b, j+1/2} (1 - \exp[-k_{i, j+1/2}(s_{j+1}-s_j)]) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 s_j 는 j 번째 격자까지의 거리이고, $\bar{I}_{i, j}$ 는 j 번째 격자점에서 i 번째 회색가스의 좁은밴드평균복사강도를 나타낸다. 그리고 하첨자 b 는 흑체를 나타낸다. 식 (12)에 나타나는 가중치 $W_{i, j+1/2}$ 는 s_j 와 s_{j+1} 사이에서 고려되는 i 번째 회색가스에 대한 가중치로서 식 (10)에서와 같이 구할 수 있다. 1차원 매질은 50개의 등온 및 등물성의 등간격 구간으로 나뉘어 고려되었으며 j 번째 격자에서의 좁은밴드 평균복사강도는 다음과 같이 j 번째 격자에서의 각 회색가스의 평균복사강도의 합으로 표현된다.

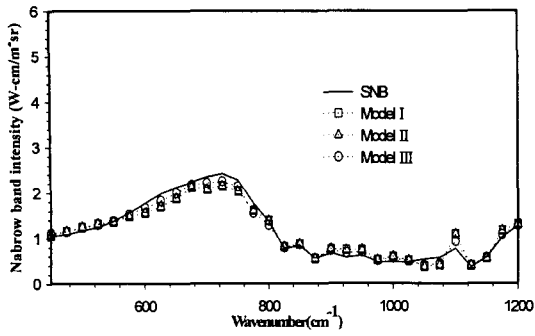
$$\bar{I}_j = \sum_{i=1}^{N_{i, new}} \bar{I}_{i, j} \quad (12)$$

3.2 수치해석 결과

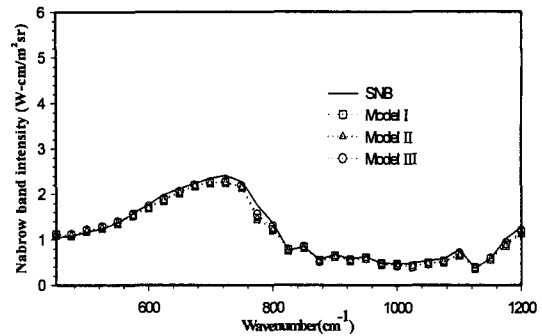
본 연구에서의 이산화탄소와 수증기 모두가 복사에 참여하는 과동 구간인 중첩밴드구간(450~1200, 1950~2450, 3300~3800, 4700~5250 cm^{-1})에서의 회색가스 재조합법에 의한 결과와 SNB를 이용한 결과를 비교 검토하고자 한다. 본 연구에서 고려한 1차원 매체의 경로길이는 모든 경우 1 m로 가정하였다.

3.2.1 등온매체의 경우

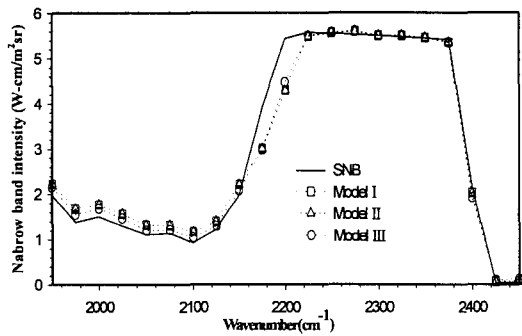
등온 매체인 경우 온도는 1000 K로 일정하며 혼합가스의 분압은 30%CO₂+30%H₂O+40%N₂로



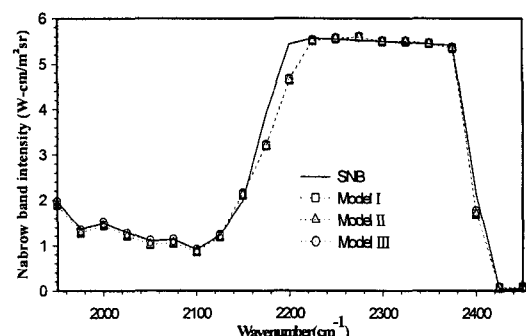
(a) 450~1200 cm⁻¹



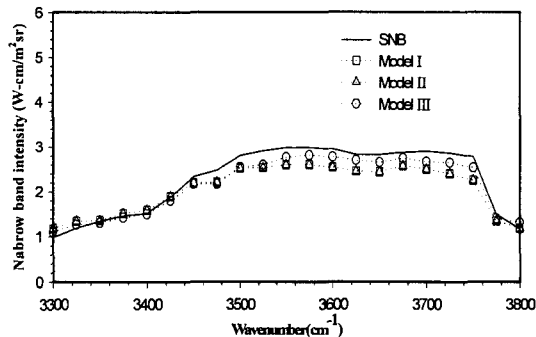
(a) 450~1200 cm⁻¹



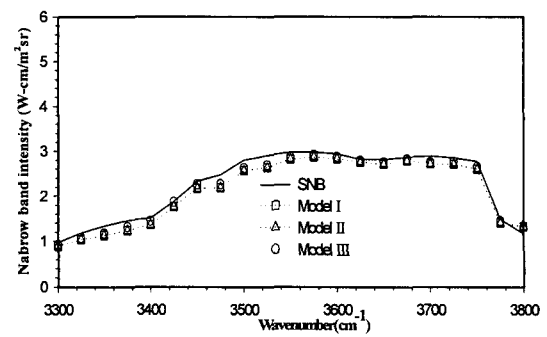
(b) 1950~2450 cm⁻¹



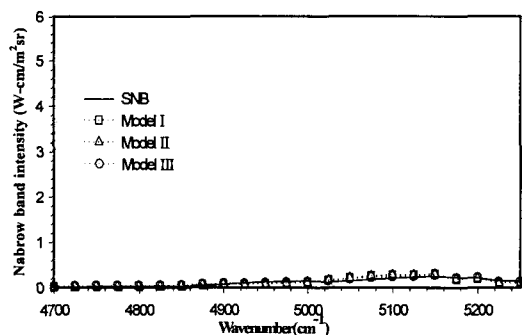
(b) 1950~2450 cm⁻¹



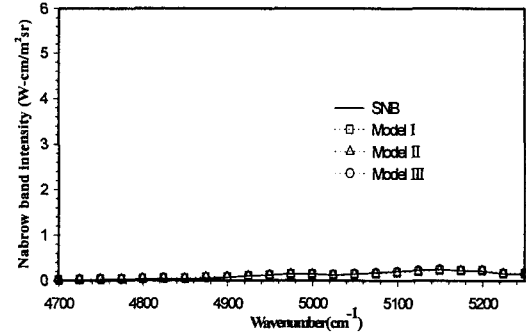
(c) 3300~3800 cm⁻¹



(c) 3300~3800 cm⁻¹



(d) 4700~5250 cm⁻¹



(d) 4700~5250 cm⁻¹

Fig. 1 Spectral intensities transmitted through the iso-thermal path obtained by using 5 gray gases

Fig. 2 Spectral intensities transmitted through the iso-thermal path obtained by using 10 gray gases

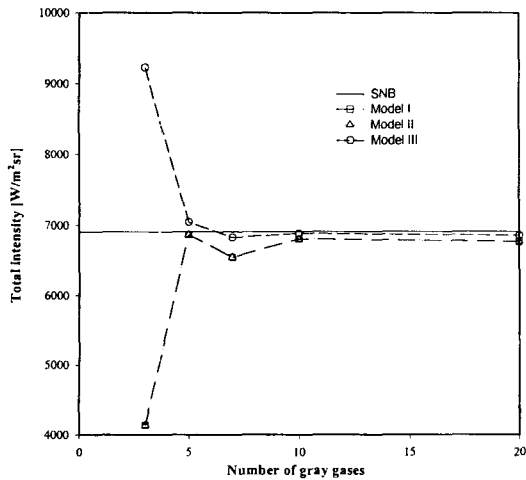


Fig. 3 Total intensities transmitted through the isothermal path for various number of gray gases

구성된 것으로 가정하였다. Figure 1~2는 등온의 매체를 통과한 후의 파장별 복사강도를 나타내고 있다. 이들 그림에서는 각각의 중첩구간별로 3가지 모델을 이용하여 재조합한 결과를 비교하고 있다. Figure 1은 회색가스를 5개의 회색가스로 재조합하였을 경우의 파장별 복사강도를 SNB를 이용하여 구한 결과와 비교하고 있다. 모든 중첩밴드 구간에 있어서 Model III을 이용하여 재조합하였을 때가 기준인 SNB를 이용하여 구한 값과 가장 근접한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 1950~2450 cm^{-1} 의 중첩밴드에서는 재조합 모델에 관계없이 비슷한 값이 계산되어지는 것을 볼 수 있으며 2200 cm^{-1} 부근에서 3가지 모델에 있어 약 15%의 오차가 발생한다. 4700~5250 cm^{-1} 의 중첩 구간에서는 약 50%의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 때 Model I과 Model II를 이용하였을 경우 비슷한 결과를 도출하며 Model III의 경우 약 25%의 오차로 가장 정확한 계산결과를 산출한다. Fig. 2에서는 기준값과의 오차를 줄이기 위하여 보다 많은 10개의 회색가스로 재조합하였을 경우의 각각의 중첩밴드에서의 좁은밴드 평균복사강도를 SNB로 구한 값과 비교하여 나타내고 있다. 회색가스를 5개 이용하였을 경우보다 10개를 이용하였을 경우 기준값에 더욱 근접하는 값을 산출하는 것을 볼 수 있다. 450~1200 cm^{-1} 구간의 경우 회색가스를 10개 사용하였을 때의 평균 오차 8%로 회색가스

를 5개 사용하였을 때의 오차 11%보다 더 정확한 값을 산출해 내는 것을 알 수 있다. 3300~3800 cm^{-1} 의 밴드 구간에서는 Model II, III의 경우 회색가스를 5개 사용하였을 때보다 기준값에 근접하는 결과를 보이는 것을 알 수 있다. Figure 3에서는 회색가스 재조합에 사용된 회색가스 수에 따른 총괄 복사강도를 나타내고 있으며, Model III의 방법을 이용하여 회색가스 10개로 재조합하였을 경우 1% 이하의 오차로 정확한 총괄복사강도를 얻었다. 온도가 일정한 매체의 경우에 10개의 회색가스만으로도 중첩밴드에서의 흡수특성을 잘 예측할 수 있는 것을 알 수 있었으며 Model III이 가장 정확한 값을 도출하는 것을 알 수 있었다.

3.2.2 불균일한 온도분포를 갖는 매체의 경우

불균일 온도분포를 가진 매체인 경우 혼합가스의 성분은 10%CO₂, 20%H₂O와 70%의 N₂로 전체 경로길이에 걸쳐서 일정하게 분포되어 있다고 고려하였으며, 온도 분포는 연소실 내부의 온도를 모사하는 다음과 같은 식을 고려하였다.⁽²⁰⁾

$$x < x_{\max}$$

$$T(x) = 1500 - 3000 \left(\frac{x_{\max} - x}{x_{\max}} \right)^2 + 2000 \left(\frac{x_{\max} - x}{x_{\max}} \right)^3$$

$$x > x_{\max}$$

$$T(x) = 1500 - 900 \left(\frac{x - x_{\max}}{1 - x_{\max}} \right)^2 + 600 \left(\frac{x - x_{\max}}{1 - x_{\max}} \right)^3$$

(13)

여기서 최대온도 값을 갖는 점의 좌표 x_{\max} 는 0.7이다.

불균일한 온도분포의 경우에는 SNB를 이용한 결과값과 비교하여 Model I와 Model II를 사용한 계산결과와 비교하여 Model III의 계산 결과보다 큰 오차를 보였다. 그러므로 재조합의 방법에 따른 비교는 생략하고 Model III을 이용하여 회색가스 수를 5, 10, 15, 20, 30개로 재조합하였을 경우의 결과값을 Fig. 4에 나타내었다. 600~800 cm^{-1} 의 파동수 구간에서는 회색가스의 수와 관계없이 기준값보다 작은 값으로 예측을 하였으며, 800~1200 cm^{-1} 경우에는 회색가스의 수를 5개로 한 경우를 제외하고는 회색가스의 수와 관계없이 결과들이 약 10% 이내의 오차로 정확하게 좁은밴드 복사강도를 예측함을 알 수 있었다. 2125~

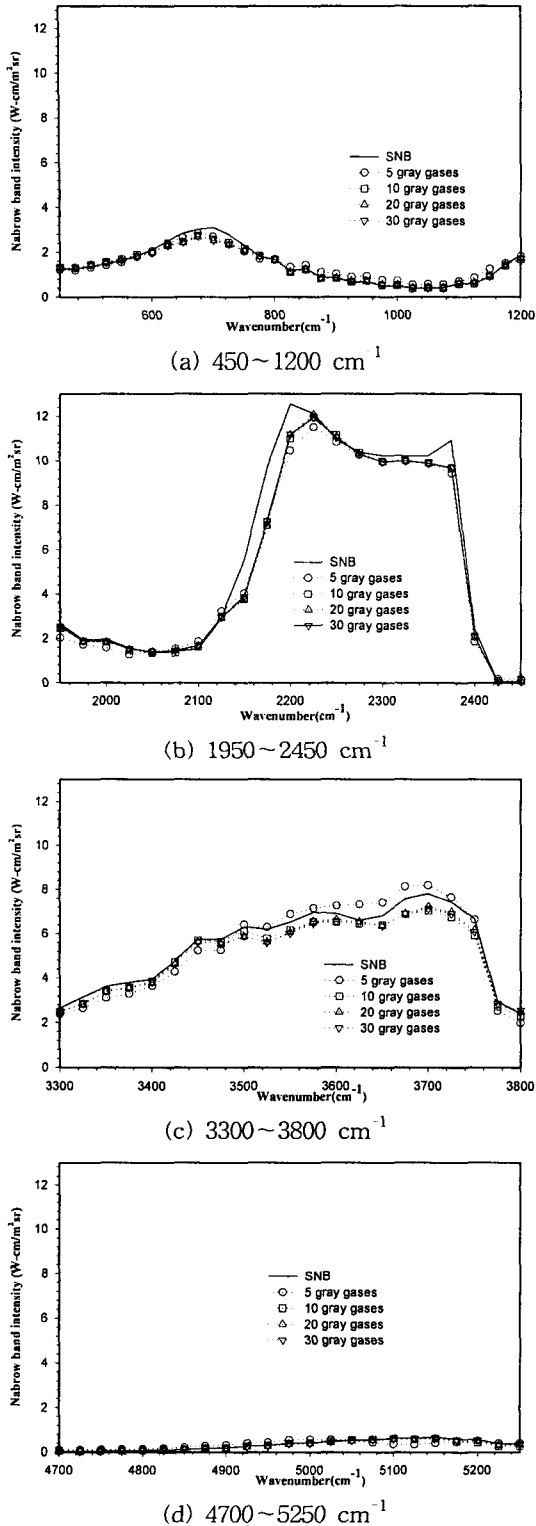


Fig. 4 Spectral intensities transmitted through the nonisothermal path for different number of gray gases

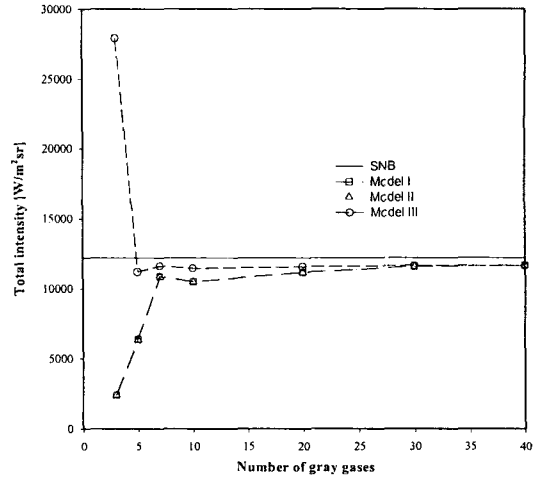


Fig. 5 Total intensities transmitted through the nonisothermal path for various number of gray gases

2200 cm⁻¹의 중첩밴드에서는 회색가스 수와 관계 없이 SNB를 이용한 결과값보다 작은 값을 예측하는 것을 볼 수 있다. 3300~3800 cm⁻¹ 밴드구간에서도 회색가스의 수가 5개일 경우에만 기준값보다 크게 예측하였으며, 회색가스가 10개 이상인 경우에는 기준값보다 약 8% 작게 예측하는 것을 볼 수 있다. 4700~5250 cm⁻¹ 구간에서는 회색가스를 5개로 제조합하여 좁은밴드 평균 복사강도를 구하였을 경우 기준값과는 상당히 다른 경향으로 값이 나타내어지는 것을 확인할 수 있었다. 모든 중첩밴드 구간에 있어 회색가스의 수가 20개 이상인 경우의 결과는 거의 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. Figure 5은 제조합한 회색가스의 수에 따른 총괄복사강도 값을 나타내고 있다. 총괄복사강도의 계산에 있어서 Model III을 이용하여 회색가스 10개로 제조합할 경우일 때는 6.2%의 오차를 보였으며, 20개의 회색가스를 이용할 경우에는 5.3%의 오차로 공학적인 용도로 사용되기에는 충분히 정확한 값을 보였다. 불균일한 온도분포의 매체의 경우 10개의 회색가스를 이용하여 제조합하여도 무방하나 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 균일한 매체보다 더 많은 20개의 회색가스로 제조합하여야 하는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 이산화탄소 및 수증기 혼합기체에 대하여 좁은밴드 회색가스가중합법을 적용하였다. 이를 위하여 혼합가스의 좁은밴드 평균통과율은 순수가스의 평균통과율의 곱으로 나타낼 수 있다는 성질을 이용하여 중첩밴드에 대한 복사특성을 예측하였다. 이 과정에서 실제가스를 모사하는데 필요한 회색가스의 수가 급격히 증가하게 되며, 비슷한 크기의 통과율을 갖는 회색가스 집단을 고려하여 평균 흡수계수를 이용함으로써 계산 시간을 대폭 줄일 수 있었다. 등은 매체를 고려한 복사열전달의 해석은 10개의 회색가스만으로도 실제가스의 흡수 특성을 매우 잘 나타내고 있음을 확인하였으며, 또한 불균일한 온도분포의 해석은 20개의 회색가스를 이용하였을 때 기준 결과와 비교하여 만족할 만한 정확도를 얻었다. 등은 및 불균일한 매체 모두에 있어서 최적화에 의한 재조합방법을 이용하였을 경우에 가장 정확한 복사열전달 예측결과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 임의의 성분비에서 사용가능한 재조합을 통한 회색가스가중합법을 이용하면 복사의 흡수 및 방출 특성을 보다 쉽고 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2002년도 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hartmann, J.M., Levi Di Leon, R., and Taine, J., "Line-by-line and narrow-band statistical model calculations for HO," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 32, No. 2, 1984, pp.119~127.
- (2) Rothman, L.S., Gamache, R.R., Tipping, R.H., Rinsland, C.P., Smith, M.A.H., Benner, D. C., Devi, V.M., Flaud, J.-M., Camy-Peyret, C., Perrin, A., Goldman, A., Massie, S.T., Brown, L.R. and Toth, R.A., "The HITRAN molecular database: editions of 1991 and 1992," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 48, 1992, pp.469~507.
- (3) Edwards D.K., "Molecular gas band radiation," *Advances in heat transfer*, New York: Academic Press, Vol. 12, 1976, 115~193.
- (4) Modak, A.T., "Exponential wide band parameters for the pure rotational band of water vapor," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 21, 1979, pp.131~142.
- (5) Malkmus, W., "Random Lorentz Band Model with Exponential-tailed S-1 Line Intensity Distribution" *Journal of Optical Society of America*, Vol. 57, 1967, pp.323~329.
- (6) Ludwig, C.B., Malkmus, W., Readon, J. E., and Thompson, A. L., *Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases*, NASA SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D. C, 1973.
- (7) Goody, R.M., *Atmospheric Radiation*, Clarendon press, Oxford, 1964, pp.122~170.
- (8) Godson, W.L., "The evaluation of infrared radiation fluxes due to atmospheric water vapor," *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1953, Vol. 79, pp.367~379.
- (9) Zhang, L., Soufiani, A. and Taine, J., 1988, "Spectral Correlated and Noncorrelated Radiative Transfer in a Finite Axisymmetric System Containing an Absorbing and Emitting Real Gas-Particle Mixture," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 2261~2272.
- (10) Kim, T.K., Menart, J.A. and Lee, H., 1991, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Technique," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp.946~952.
- (11) Hotel, H.C., Sarofim A.F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (12) Kim, O.J. and Song, T.H., "Implementation of the Weighted Sum of Gray Gases Model to a Narrow Band: Application and Validity," *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamental*, Vol. 30, 1996, pp.453~468.
- (13) Kim, O.J., Song T.H, 2000, "Data Base of WSGGM-based Spectral Method for Radiation of

- Combustion Products," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 64, pp.379~394.
- (14) Goody, R., West, R., Chen, L. and Crisp, D., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 42, 1989, pp.539~550.
- (15) Smith, T.F., Shen, Z.F., Friedman, Z.N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp.602~608.
- (16) Modest, M.F., 1993, "The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp.650~656.
- (17) Soufiani A. and Taine J., 1997, "High Temperature Gas Radiative Property Parameters of Statistical Narrow-Band Model for H₂O, CO₂ and CO and Correlated-k Model for H₂O and CO₂," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No.4, pp. 987~991.
- (18) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, NewYork.
- (19) Modest, M.F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (20) Selcuk, M, 1985, "Exact solutions for Radiative Heat Transfer in Box-shaped Furnaces," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 33, No. 6, pp. 533~549.
- (21) Press, W.H, Teukolsky, S.A, Vetterling, W.T., Flannery, B.P., 1992, *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing 2nd Edition*, America Institute of Physics. p. 397.