

## 액체 엔진 플룸 복사 열전달 예측을 위한 파장별 회체가스 중합법의 좁은밴드 적용

고주용\*, 김인선\*\*

### Spectral Weighted-Sum-of-Gray-Gases Modeling of Narrow Band for Prediction of Radiative Heat Transfer Induced from Liquid Engine Plume

Ju Yong Ko\*, Insun kim\*\*

#### Abstract

The precise calculation of gas absorption coefficient in the radiative transfer equation is very important to the prediction of radiative heat transfer induced from liquid engine plume in view of base insulation design. For this purpose, the WNB model for gas absorption coefficient is described with the selection of important parameters and then the calculated results are compared with those of SNB model for validation. Total emissivity, narrow band averaged intensity and total intensity are calculated and compared to the results of SNB model. As results, the total emissivity and the total intensity are well matched within 3.1% and roughly 5 % error, respectively. Moreover, the gas modeling database is constructed with estimation of the combustion gas composition of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O for liquid engine plume.

#### 초 록

복사전달식에서 흡수 계수의 정확한 계산은 액체 엔진 저부의 단열재 설계의 입력 값으로 사용되는 플룸의 복사 열전달을 예측하는데 매우 중요하다. 이를 위해서 가스 흡수 계수를 직접 모델링 할 수 있는 WNB 모델을 중요 인자의 선정을 위주로 설명하였고, 그 결과를 비교적 정확한 기준 값을 제공하는 SNB의 결과와 비교하였다. 비교 인자들은 총 방사율, 좁은밴드 복사강도 및 총 복사강도이며, 결과적으로 방사율의 경우 주어진 조건에서 3.1% 이내, 총 복사 강도역시 5%이내의 계산결과를 보여 이 모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 추가적으로, 액체 엔진의 연소가스들의 성분비를 예측하고 이 조건에 대한 가스 모델링 인자를 계산하여 데이터베이스를 구축하였다.

키워드 : 복사(Radiation), 가스 모델링(Gas Modeling), 회체가스 중합법(WSGGM)

#### 1. 서 론

고온의 연소 시스템의 주된 열전달은 복사를 통해서 발생하는데, 이러한 시스템의 예로 보일

접수일(2008년12월15일), 수정일(1차 : 2009년 6월 5일, 2차 : 2009년 6월 17일, 게재 확정일 : 2009년 7월 1일)

\* 열/공력팀/sansa3@kari.re.kr

\*\* 열/공력팀/iskim@kari.re.kr

러, 발전소, 고온의 터빈 시스템, 로켓 엔진 등을 들 수 있다. 이 중 로켓엔진의 경우, 플룸 복사 열전달로부터 엔진 저부를 보호하기 위해서 단열재를 설계해야 하는데, 단열재의 중량 및 기타 요건을 설계하는데 이 복사 열전달이 중요한 입력 자료가 된다. 그러나 다른 열전달과는 다르게 복사 열전달은 매우 복잡한 특성을 가지고 있기 때문에 정확한 모델링 및 해석에 어려움이 있어, 아직까지도 다양한 연구가 진행되고 있는 상황이다. 복사 열전달의 정밀한 해석을 위해서는 복사 전달식을 엄밀하게 풀어내는 것이 필요한데, 이를 위해서는 복사 전달식에 들어가는 인자, 예를 들어 가스 복사 물성치인 흡수계수(좀 더 확장된 개념으로 투과율 혹은 방사율), 입자의 경우 산란계수 및 방사율 등, 의 엄밀하고도 공학적으로 적용 가능한 모델링이 선행되어야 한다. 물론, 연소시스템 내의 입자의 존재는 연소가스에 비해서 많은 양의 복사에너지를 방출하긴 하지만, 대부분의 연소시스템에서 주요한 부분을 차지하는 것은 연소가스로 특히 탄화수소 계열의 연료의 연소생성물은  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 이므로 이들의 복사 모델링은 매우 중요하며, 그런 만큼 지금까지 매우 다양하고도 심도 있는 연구가 진행되어 왔다. 특히 액체 엔진의 경우도 케로신같은 탄화수소 계열의 연료가 사용되는 추세이므로 이들의 조합에 대한 가스 모델링이 중요하다.

그러나 이러한 가스의 복사 에너지는 양자화되어 있어 각 에너지의 천이 구간에 대해서 파장별로 다른 특성을 보이는 비회체 특성(Nongray)을 가진다. 이런 비회체 특성은 엄밀한 해석을 위해서 엄청난 양의 계산을 요구하게 되어, 비회체 특성을 무시한 회체 가스 모델링이 등장하기도 하였으나, 계산의 용이성을 얻는 대신 정확도가 상당부분 희생하게 되는 결과를 초래했다[1]. 가스 복사 물성치는 앞서 언급한 것처럼 엄밀한 분석을 위해서 각 에너지의 천이 구간을 파장별로 모두 구하는 것이 필요하며, 이러한 계산법은 거의 Line-by-Line으로 수행되기 때문에 이러한 모델링을 LBL 모델로 부르며, 상당부분 연구가 진행이 된 상태이다[2, 3]. 그러나 이러한 계산 결과는 실제의 공학적인 계산에는 적합하지 않

때문에 공학적인 계산을 위한 모델링의 검증용으로 사용되거나, 공학적인 모델링의 기초 자료로 사용되고 있다. LBL과 다르게 공학적으로 적용되기 위해서 개발되어온 모델링으로 크게 저 분해능 파장별 모델링과 전체 Spectrum의 방사율 표현으로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 밴드모델로써 전체 Spectrum을 플랑크 (Planck) 및 벽이나 입자의 복사 물성치의 변화가 크게 나타나지 않는 크기의 좁은(narrow) 혹은 넓은(wide) 밴드로써 나누어 각 밴드에서의 복사 성질을 평균하는 방법으로써 저 분해능 파장별 특징을 가진다. 두 번째 방법은 전체 Spectrum에 대해서 적분한 형태로 방사율을 차트나 표로 간단하게 나타내는 방법으로 적용의 용이성과 계산시간의 단축 등의 장점을 가진다. 그러나 이 방법은 대체로 비회체 벽이나 입자가 포함된 계산에는 부적합한 방법으로 알려져 있다[1]. 현재까지 개발된 모델링 기법 중 저 분해능 파장별 모델링 기법들은 상당부분 정확도를 유지하면서도 공학적으로도 적용이 용이하도록 연구되어 왔는데, 축차 흡수 계수 분포(Cumulative K-distribution) 모델, 이를 좀 더 확장한 CKFG(Correlated-k-Fictitious Gas)모델, SLWGG(Spectral Line Based Weighted-Sum-of-Gray-Gases), WNB(Weighted-Sum-of-Gray-Gases based Narrow Band) 모델 및 SNB(Statistical Narrow Band)모델 등이 그것이다[1]. 이러한 모델들은 모두 가스의 비회체 거동을 적절히 모사하여 LBL의 결과와 비교하여 정확도를 유지하면서도 공학적인 적용이 용이하다. 그러나 위에서 언급한 모델들 중 SNB 등과 같은 Narrow Band(or Wide Band) 모델은 그 정확도 측면에서는 매우 높은 수준의 모델결과를 보여주고 있으나 모델링의 결과가 복사 전달식의 직접적인 가스 복사 물성인 흡수계수가 아닌 투과율 및 방사율로 표현되기 때문에 차후 복사 전달식의 해법의 적용에 한계가 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 복사 열전달 해법에 적용 가능하도록 가스의 흡수계수를 직접 모델링하고 비회체 가스의 파장별 특성이 고려된 가스 복사 물성치를 모델링하는 WNB모델[3, 4]을 기술하고 SNB의 결과와 비교하여 그 정확도를 분석하였

다. 이 WNB 모델의 정확도, 확장성 및 정확도가 확인되면, 추후 엔진 플룸의 복사 열전달 해석을 위한 가스 모델링기법으로 사용할 수 있을 것이다.

SNB의 모델링 결과가 투과율 혹은 방사율로도 출되기 때문에 직접적인 흡수계수의 비교가 어려운 관계로 WNB 모델의 결과인 흡수계수를 다시 방사율 식에 넣어서 계산한 결과를 비교하였다. 또한 일반적인 시스템내부의 온도 분포를 가정하여 그 온도 분포에 대해서 1차원 복사 전달식을 수치적으로 계산하여 파장의 밴드에 해당하는 복사강도(Spectral narrow band mean intensity)를 구하여 SNB의 결과와 비교하였고, 최종적으로 전 파장에 대해서 각 파장별 결과를 총괄하여 총괄 복사 강도를 계산하여 비교해 보았다. 그리고 추가적으로 케로신과 액체산소를 연료와 산화제로 사용하는 액체엔진의 플룸 조성비를 추정하여 이에 해당하는 가스 모델링 데이터베이스를 구축해 보았다.

## 2. 파장별 회체가스 중합법을 이용한 좁은밴드 모델링

### 2.1 복사 전달식

흡수, 방사, 산란을 하는 매질에서 복사전달방정식의 표현은 식(1)과 같다[1]. 입사 광선이 진행방향  $s$ 를 따라서  $s$ 방향으로 매질을 통과할 때, 복사강도  $I$ 는 진행방향으로부터 멀어져 감에 따라 흡수와 산란에 의해서 약해진다. 동시에, 다른 방향으로부터 진행방향  $s$ 로 들어오는 방사와 산란에 의하여 복사강도가 강해진다. 따라서 진행방향  $s$ 를 따라서 복사강도  $I$ 의 변화는 다음과 같이 표현된다[1].

$$\frac{dI(r,s)}{ds} = -\beta(r)I(r,s) + \kappa(r)I_b(r) + \frac{\sigma_s(r)}{4\pi} \int_{4\pi} I(r,s')\Phi(s',s)d\Omega' \quad (1)$$

여기서  $\beta = \kappa + \sigma_s$ (extinction coefficient),  $\Phi$ 는

산란 위상 함수이다. 산란 위상 함수  $\Phi(s',s)$ 는  $s'$ 으로부터 오는 빛이  $s$ 방향으로 산란될 가능성을 나타낸 함수이다. 본 논문에서 다루고자 하는 부분이 가스 모델링 부분이므로 입자에 의한 산란은 무시한다. 그렇게 되었을 경우, 식(1)의 가장 오른쪽 항은 없어지게 되며, 이러한 경우에 형식해(formal solution)는 위의 1차미분방정식의 수학적 해를 통하여 손쉽게 주어진다. 참고로 모든 변수는 파장의 함수이며, 편의를 위해서 표시하지 않는다.

$$I(s) = I_{bw}e^{-\int_0^s \kappa(s')ds'} + \int_0^s \kappa(s')I_b(s')e^{-\int_0^s \kappa(s'')ds''} ds' \quad (2)$$

위 식을 살펴보았을 때, 소멸계수는 오로지  $\kappa$ 이며, 이는 가스의 흡수계수(absorption coefficient)이다. 따라서  $\kappa$ 를 적절히 모사하는 것이 복사 전달식을 통해 복사 전달량을 정확히 해석하는데 매우 중요하다. 그런데, 가스의 흡수계수는 참여 가스의 특성, 매질의 온도, 전압력 및 참여 가스의 농도분포 등의 함수로 매우 복잡한 특성을 가진다.

실제로 LBL 계산은 이러한 인자를 반영하면서 동시에 양자역학적인 측면에서 가스 분자들의 충돌, 불확실성 및 도플러 효과 등에 의한 선 확장(Line Broadening)효과를 모두 포함하여 계산을 수행한다[1].

### 2.2 가스 복사 물성치

#### 2.2.1 회체가스 중합법 및 WNB

회체가스 중합법(WSGGM)은 가스의 전체 Spectrum에 대한 방사율을 간단히 계산하기 위해서 Hottel[5]과 Sarofim[6]에 의해서 개발되었다. 이후 이 모델은 여러 연구자들에 의해서 다양한 온도, 압력 범위에 적용할 수 있도록 확장되어 현재는 매우 중요한 모델링 기법으로 인정

되고 있다.

이 기법의 기본 개념은 가스의 전체 방사율을 흡수계수가 주어진 몇 개의 회체가스와 가중치 (Weighting factor)의 중합으로써 표현한 것으로 수식으로 표현하면 아래와 같다[1, 5].

$$\epsilon_m = \sum_i^M W_i (1 - e^{-\kappa_i L}) \quad (3)$$

여기에서  $\kappa_i$ 와  $L$ 은 각각 이산화(Discrete)된 몇 개의 회체 가스의 흡수계수와 경로 길이를 나타낸다. 그리고  $W_i$ 는 각 회체가스에 대한 가중치로써 온도의 함수이며 그 합은 1이 된다. 여기서 주의해야 할 것은 전 파장에 대한 가중치는 온도의 함수가 되지만, 밴드별 가중치는 파장의 함수가 된다. 이 가중치는 유효 흡수 계수가  $\kappa_i$ 인 Spectrum 구간들의 흑체 복사 에너지 분율을 의미한다는 물리적인 의미가 있다. 그러나 실제의 계산에 있어서는 보통 식(3)과 실제 방사율 데이터와의 오차를 최소화하여 수치적으로 최적화해야 하는 최적화 변수이다. 따라서 WSGGM의 최종 결과는 회체가스에 대한 흡수계수와 가중치이며, 이를 통해서 어떠한 복사 전달식 해법에도 적용가능하다. WSGGM은 이후 Song과 Viskanta[7], Modest[1] 등에 의해서 산란을 무시한 모든 RTE 식에 적용 가능성이 증명되어 널리 사용되고 있다.

그러나 지금까지의 모든 WSGGM은 대부분 전체 Spectrum에 대해서만 적용된 것에 반해 WNB 모델은 최적화된 물리적인 모델을 통해서 이 방법을 좁은밴드에 적용하여 각 좁은밴드 내에서 비회체 특성을 적절히 모사하도록 개발되었다. 이렇게 개발된 모델을 통해서 좁은 밴드내의 복사 강도의 특성을 파악할 수 있어 비회체 거동을 하는 벽면이 존재할 경우에도 해석이 용이할 수 있게 하였으며, 총 복사 강도 역시 밴드별 평균값을 합하여 쉽게 얻을 수 있다.

## 2.2.2 WNB 모델링

회체 가스의 흡수계수 모델링은 기본적으로 이원자분자의 선세기(Line strength)를 표현하는 식으로부터 유도하였고, 가중치 및 기타의 인자는 최적화 기법을 통해서 선정하였다. 가스의 흡수 계수는 압력에 비례하므로, 근사적으로

$$\kappa_i \propto S_{\nu,J}^{\nu,J} P_{abs} \quad (4)$$

이 원자 분자의 선세기 분포는 온도에 비례하여[8] 다음과 같이 표현된다.

$$S_{\nu,J}^{\nu,J} = F(\eta) \frac{\rho}{P_{abs} T} e^{-E(\nu,J)/kT} (1 - e^{-hc\eta/kT}) \quad (5)$$

여기서 함수  $F(\eta)$ 는 상수인  $8\pi/3hc$ 와 진동과 회전에 의하여 발생하는 천이 현상을 표현하는 행렬들과의 곱을 나타낸다. 그리고 마지막 항  $(1 - e^{-hc\eta/kT})$ 은 실제 흡수계수를 공칭(nominal) 흡수 계수로 바꾸어 주는 것을 나타낸다. 엄밀한 의미에서 이 모델은 이원자 분자에만 적용 가능한 것이기 때문에, 수증기 및 이산화탄소의 경우에는 이 모델에서 온도와 압력의 관계 등에 대한 힌트만을 얻어 몇 가지 새로운 모델을 만들어야 한다. 아래에는 식(4), (5)를 통해서 도입한 모델 및 최적화 인자이며, 최종적으로 식(6)의 Model 6을 WNB의 모델로 사용한다[3, 4]. 그 이유는 Model 6이 가장 공학적으로 적용이 용이하면서도 정확도를 유지할 수 있는 모델이기 때문이다.

$$\text{Model1: } \kappa_i = \kappa_{i0} \frac{\rho_{abs}}{T}, \quad k_{i0}, W_i(\eta) \quad (i=1, \dots, M)$$

$$\text{Model2: } \kappa_i = \kappa_{i0}(\eta) \frac{\rho_{abs}}{T} e^{-\alpha(\eta)/T} (1 - e^{-\beta(\eta)/T}), \\ k_{i0}(\eta), W_i(\eta) \quad (i=1, \dots, M), \alpha(\eta)$$

$$\text{Model3: } \kappa_i = \kappa_{i0} \frac{\rho_{abs}}{T} e^{-\alpha/T} (1 - e^{-\beta/T}), \\ k_{i0}, W_i(\eta) \quad (i=1, \dots, M), \alpha, \beta$$

$$\text{Model 4: } \kappa_i = \kappa_{i0} \frac{\rho_{abs}}{T} e^{-\alpha(\eta)/T} (1 - e^{-\beta(\eta)/T}),$$

$$k_{i0}, W_i(\eta) \quad (i=1, \dots, M), \alpha(\eta)$$

$$\text{Model 5: } \kappa_i = \kappa_{i0} P_{abs}, \quad k_{i0}, W_i(\eta) \quad (i=1, \dots, M)$$

$$\text{Model 6: } \kappa_i = \kappa_{i0} \frac{P_{abs}}{T^2} e^{-\alpha/T},$$

$$k_{i0}, W_i(\eta) \quad (i=1, \dots, M), \alpha \quad (6)$$

참고로 Model 5는 현재 널리 사용되고 있는 WSGGM으로 대부분의 상용프로그램에서는 Model 5를 사용한다. 최적화 기법은 기준이 되는 밴드 모델과의 비교를 통해서 기준치와 모델 값의 오차를 최소화 하는 공액구배법(Conjugate gradient method)을 사용하였다. 공액구배를 적용하기 위한 오차의 표현식은 아래와 같다[4].

$$E_\eta = \int_T \int_L g(\overline{\epsilon_{\eta m}}, \overline{\epsilon_{\eta t}}) dL dT$$

$$E_\eta = \sum_T \sum_L \left( \frac{\overline{\epsilon_{\eta t}}}{\overline{\epsilon_{\eta m}}} + \frac{\overline{\epsilon_{\eta m}}}{\overline{\epsilon_{\eta t}}} - 2 \right) \quad (7)$$

방사율의 기준이 되는 값은 SNB 모델이며, 동일한 좁은밴드를 사용하여 모델링한 결과를 이용하였다. 최적화된 파장별 가중치는 다시 아래의 식을 이용해서 총 가중치로 표현할 수 있으며, 이 값은 기존의 일반적인 WSGGM의 결과와 같이 전체 Spectrum에 대한 방사율 표현에 사용된다[4].

$$W_i = \frac{\int_{\eta_{min}}^{\eta_{max}} W_i(\eta) \pi I_{\eta} d\eta}{\sigma T^4}, \quad i=1, \dots, M \quad (8)$$

식(8)에서 알 수 있듯이 총 가중치는 온도의 함수가 된다. 최적화 결과 및 타당성 확인 과정에서 최적화 인자 중 가장 중요한 것이 가중치이며,  $k_{i0}, \alpha$ 는 최적화 이전에 미리 약간의 통찰을 통해서 어느 정도 유추가 가능하다. 모델링의 편의상 두 인자는 모두 파장에 따라 변화가 없는 것으로 선정하였으므로, 여러 경우에 대해서 동일한 값을 취해야 한다. 이를 바탕으로 두 인자는 적절히 선정되었고, 그 선정된 값을 기준으로

다시 가중치에 대한 최적화 작업이 수행되었다. 결과적으로 두 인자는 최적화 방법에 있어서 적절한 수준으로 선정되고 이를 통해서 최적화된 가중치와 함께 정확도가 높은 결과를 보여주었다. Model 6으로 선정된 모델링 기법을 적용하여, H<sub>2</sub>O 및 CO<sub>2</sub> 그리고 두 가스의 혼합가스에 대해서 최적화 작업을 수행하였고, 그 결과로써 Database를 구축하였다. 파장별 가중치는 그 양이 너무 방대하므로 이곳에 나타낼 수 없으므로 식(8)의 총 가중치만을 몇 개의 경우에 대해서 나타낸다. 아래에는 H<sub>2</sub>O에 대한 총 가중치를 표현하였는데, 사용된 회체가스는 15개이며, 온도 범위는 500K에서 2500K까지 100K간격으로 자료가 구축되었다.

참고로 CO<sub>2</sub> 및 두 가스의 혼합가스에 사용된 회체가스는 30개이며, 온도범위는 동일하다. 좁은밴드의 중심파수 범위는 H<sub>2</sub>O의 경우는 150cm<sup>-1</sup>에서 9300cm<sup>-1</sup>까지이며, CO<sub>2</sub>의 경우는 150cm<sup>-1</sup>에서 6000cm<sup>-1</sup>까지이다. 물론, 혼합가스에 대해서는 H<sub>2</sub>O와 동일한 범위를 고려한다.

### 3. 모델링 검증

#### 3.1 Emissivity 비교를 통한 모델링 검증

식(6)의 Model 6을 통해서 구축된 Database를 이용하여 계산된 Total Emissivity를 비교해 보았다. 물론, 기준 값을 통해서 최적화 기법을 적용하였으므로 적절히 최적화가 되었다면 둘 사이의 차이는 이론적으로는 거의 없어야 한다. 그러나 최적화 기법을 수행하면서 혹 발생할 수 있는 문제점을 확인하고 구축된 모델링 기법 및 최적화된 Database의 상태를 확인하기 위해서는 최초의 비교 대상이었던 Emissivity를 비교해보는 것이 좋을 것이다.

참고로, 새롭게 구축된 모델링 기법과 기준 값을 제공한 SNB의 차이는 기본적으로 WNB는 흡수계수 자체를 모델링함으로써 어떠한 RTE Solver에도 적용가능하다는 장점이 있으며, 온도 및 농도분포의 불균질 특성에서 오는 번거로움을

쉽게 해결할 수 있다. 반면, SNB의 경우, 밴드 평균 방사율과 투과율은 LBL과 비교하여 매우 정확히 모사할 수 있지만, 제한된 RTE Solver에 적용되며 온도 및 농도분포가 불균질한 매질의 경우 매질의 복사 특성을 균질한 온도 및 농도분포로 Curtis-Godson[9]등의 기법을 이용해서 근사(approximation)해야만 하는 번거로움이 있다. 물론, 이 과정에서 정확도의 손실도 발생한다. 비교를 위해서 총 방사율을 식(3)을 통해서 계산해 보았다. H<sub>2</sub>O에 대해서 먼저 계산을 수행해 보았고, 다음으로 혼합가스에 대한 비교를 해보았다.

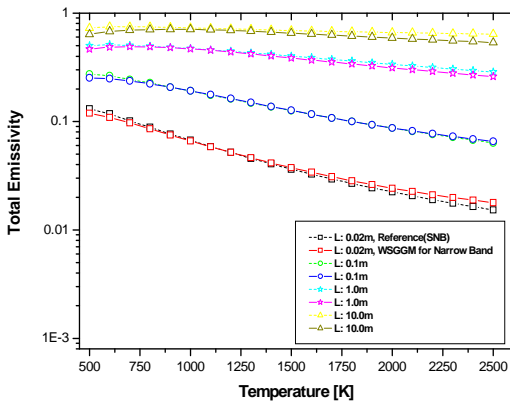


그림 1. 광학길이에 따른 온도별 총 방사율 비교- H<sub>2</sub>O

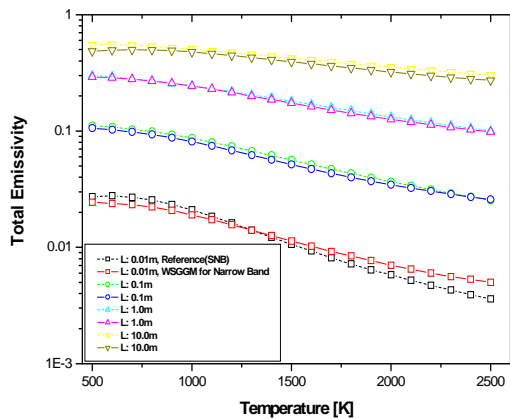


그림 2. 광학길이에 따른 온도별 총 방사율 비교 - 혼합가스, H<sub>2</sub>O: CO<sub>2</sub>=1: 1 (15%)

### 3.2 Intensity 비교를 통한 모델링 검증

Emissivity비교 결과를 확인하여 WNB의 가스 모델링에 대한 일차 검증을 수행해 보았다면, 본 장에서는 실제로 열전달 해석에서 최종적으로 고려되는 복사강도(Intensity)를 기준이 되는 SNB와 동일한 조건에 대해서 계산하여 비교해 보고자 한다. 식(2)에서 벽면에서의 복사전달을 고려하지 않고 순수한 가스매체의 복사 강도를 계산하기 위해서는 우측에서 첫 번째 항을 제거하면 된다. 이를 다시 파장별 효과를 모두 고려하여 표현하면 아래의 식과 같다.

$$I_m(0) = \int_0^\infty \int_0^s \kappa_\eta(s) I_{m\eta}(s) e^{-\int_0^s \kappa_\eta(s') ds'} ds d\eta \quad (9)$$

이것을 파장별 계산의 합의 형태로 나타내면 식(10)과 같이 표현된다.

$$I_m(0) = \sum_{\text{narrowbands}} \bar{I}_\eta(0) \Delta\eta \quad (10)$$

여기에서 다시  $\Delta\eta$  구간의 파장별 복사 강도인  $\bar{I}_\eta(0)$ 를 WNB를 이용한 식을 이용하여 아래와 같이 표현된다[3].

$$\begin{aligned} \bar{I}_{m\eta}(0) &= \\ & \sum_{i=1}^M \int_0^L [\kappa_i(\eta; s) I_{m\eta}[T(s)] W_i(\eta) \times \tau_\eta(s' - s)] ds, \\ \tau_\eta(s' - s) &= e^{-\int_0^s \kappa_i(\eta; s') ds'} \end{aligned} \quad (11)$$

물론, 식(10)을 이용하지 않고도 전 Spectrum에 걸친 복사강도를 WNB에서 구축한 데이터를 이용해서 구할 수 있다. 즉, 모든 파장에 대한 가중치(온도의 함수)를 식(8)을 통해서 구해놓았으므로 이를 아래의 식과 함께 사용할 수 있다[4].

$$\bar{I}_m(0) = \sum_{i=1}^M \int_0^L \kappa_i(s) I_b[T(s)] W_i[T(s)] e^{-\int_0^s \kappa_i(s') ds'} ds \quad (12)$$

식(12)는 처음부터 총 복사강도를 계산하기 때문에 시간을 절약할 수 있는 장점이 있고 식(10), (11)은 좁은밴드별 복사강도의 분포를 확인할 수 있고, 총 복사강도도 계산할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 식(10)과 (11)을 사용하여 밴드별 복사 강도와 총괄 복사 강도를 계산하였다. 계산 조건은 다음과 같다.

- 온도분포: Parabolic Type/ Boundary Type
- 광학길이: 0.1m
- 참여가스: H<sub>2</sub>O(100%, 1기압),  
CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O 혼합가스(1:1, 15%)

최종 계산된 결과를 아래에 그래프로 나타내었다.

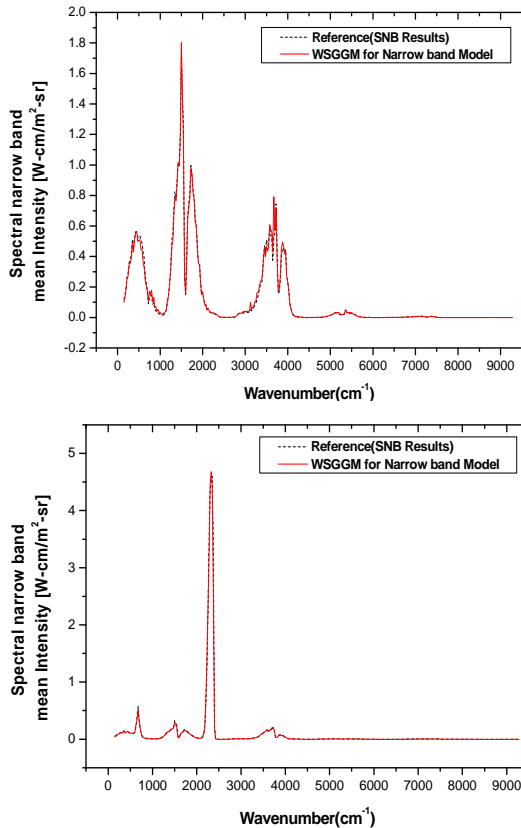


그림 3. Boundary Type 온도분포에서의 밴드 복사강도, 위: 혼합가스, 아래: H<sub>2</sub>O

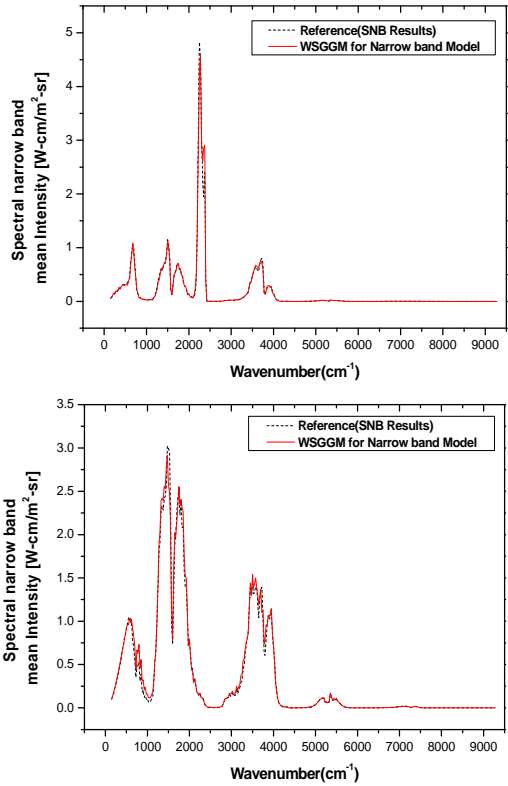


그림 4. Parabolic Type 온도분포에서의 밴드 복사강도, 좌: 혼합가스, 우: H<sub>2</sub>O

표 2. 총 복사강도 비교 결과 (복사 강도 [W/m<sup>2</sup>-sr], 오차(%), 길이 0.1m)

	Parabolic T. type	Boundary T. type
H <sub>2</sub> O (100%)	SNB: 3063.4 WNB: 3195.3(+4.3)	SNB: 1152.4 WNB: 1159.6(+0.6)
H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> (1:1, 15%)	SNB: 1588.1 WNB: 1598.0(+0.6)	SNB: 872.1 WNB: 849.7(-2.6)

단, 표3에서 사용한 오차는 좁은밴드들 간의 복사강도들의 오차 평균을 바로 취하지 않았다. 왜냐하면, 이렇게 되었을 경우, 복사강도가 매우

작아서 총 복사강도에 미치는 영향이 적지만 오차가 크게 표현될 수 있는 부분이 상대적으로 총 복사강도에 미치는 영향이 큰 좁은밴드의 결과와 동등하게 평가되는 문제점을 가지게 된다. 따라서 오차의 표현식에 아래와 같은 총 복사강도에 대한 기여를 포함하고 있도록 오차 표현식을 적용하였다[4].

$$E = \frac{\sum_{\eta} \left( \frac{\overline{I_{m\eta}}(0)}{\overline{I_{\eta}}(0)} + \frac{\overline{I_{\eta}}(0)}{\overline{I_{m\eta}}(0)} - 2 \right) \overline{I_{\eta}}(0)}{\sum_{\eta} \overline{I_{\eta}}(0)} \quad (13)$$

결과적으로 WNB는 SNB와 비교하여 좁은밴드 복사강도 및 총 복사강도를 매우 정확한 수준으로 계산할 수 있음을 확인할 수 있었다.

다음으로 액체 엔진 플룸의 복사 열전달을 수행하기 위해서 가스 모델링 데이터베이스를 구축하였다. 물론, 액체 엔진의 플룸내의 연소가스 성분에 대한 추가적인 분석, 실험 등을 통해서 정확한 성분비를 구해야 할 것이나, 완전연소에 의해 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 1:1(50% each)로 모든 플룸의 성분비를 구성한다는 가정 하에 흡수계수에 필요한 중요 인자들을 구해 보았다.

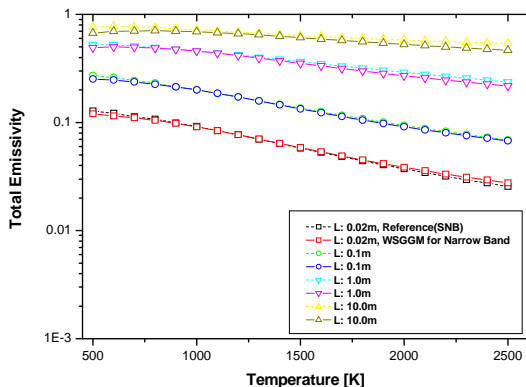


그림 5. 광학길이별 온도에 따른 총 방사율 비교 - 혼합가스, H<sub>2</sub>O: CO<sub>2</sub>=1: 1 (50%)

구축된 데이터베이스 내용:

사용된 회체가스: 30개(kio=6ea, alph=5ea)

온도 범위:500 ~ 2500K

경로길이: 0.1m - 10m

과장특성: Total, Narrow Band database.

구축된 데이터베이스는 DOIM(Discrete Ordinate Interpolation Method) DOM(Discrete Ordinate Method)과 같은 복사방정식 Solver들과 연계되어 복사열전달량을 계산하는데 사용될 것이므로, 다음으로 연구할 과제는 이러한 Solver에 가스 모델링 결과를 적절히 연계시키는 프로그램을 개발하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

복사 전달식의 중요한 인자인 가스 흡수계수를 직접 모델링할 수 있는 WNB 모델의 모델링 선정 및 중요 인자의 최적화에 대해서 기술하였고, 모델의 타당성을 검증하기 위해서 SNB 모델과 동일한 조건에서 방사율, 복사강도를 계산하여 비교하였다. 비교 결과 방사율의 경우, 총 방사율은 3.1% 이내로 잘 일치함을 확인하였으며, 광학길이가 길어지고, 참여가스의 분포가 증가하면 방사율이 증가하고 온도가 높아질수록 방사율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 수증기 및 혼합가스에 대해서 두 개의 온도 프로파일을 제공하고 밴드 복사강도를 계산하여 동일한 조건에서 얻어진 SNB의 결과와 비교하였고, 전 파장에 대한 총합을 통해서 총 복사강도를 구해 기준 값과 비교하였다. 총 복사강도는 5% 이내로 결과가 일치하였다. 더불어 액체 엔진 플룸의 연소가스 분포를 완전연소로 가정하고 추후 복사 열전달을 해석하기 위해서 가스 모델링 데이터베이스를 구축하였다.

## 참 고 문 헌

1. Modest M. F., 1992, Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, New York.
2. Hartman, J. M., Levi D. L. and Taine, J.,



- 1984, Line-by-Line and Narrow-band Statistical Model Calculations for H<sub>2</sub>O, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 32, pp. 119-127.
3. Kim O.J., Song, T.H., 1996, Implementation of the weighted sum of gray gases model to a narrow band: applicatioon and validity, Numerical heat Transfer, Part B: Fundamentals, 30:4, 453-468.
  4. Kim O.J., Song, T.H., 2000, Data base of WSGGM-based spectral model for radiation properties of combustion products, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 64, pp. 379-394.
  5. Hottel, H. C. 1954, Radiant-Heat Transmission, in W. H. McAdams(ed.), Heat Transmission, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
  6. Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., 1967, Radiative Transfer, McGraw-Hill, New York.
  7. Song, T. H. and Viskanta R., 1986, Development and Application of a Spectral-Group Model to Radiation Heat Transfer, ASME Paper No. 86-WA/HT-36.
  8. C.B. Ludwig, W. Malkmus, J.E. Reardon, and J.A. Thomson, Handbook of Infra-red Radiation from Combustion Gases, 1973, NASA-SP3080.
  9. Godson, W. L., 1953, The Evaluation of Infrared Radiation Fluxes Due to Atmospheric Water Vapor, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 790, pp.367-379.