

< 논문 >

복사/난류간 상호작용이 고려된 화염의 온도 및 농도분포의 SRS 역계산

고주용[†] · 김현걸^{*} · 송태호^{**}

(2006년 5월 10일 접수, 2006년 6월 30일 심사완료)

SRS Inversion of Flame Temperature/Concentration Profile with Radiation/Turbulence Interaction

Ju-Yong Ko, Hyun Keol Kim and Tae-Ho Song

Key Words : Spectral Remote Sensing(스펙트럼 원격 측정), Radiation/Turbulence Interaction(복사/난류 상호작용), Inversion(역계산), CO₂ 4.3 μm Band(CO₂ 4.3 μm 밴드)

Abstract

The SRS method is applied to a turbulent flame with radiation/turbulence interaction to invert the temperature and concentration profile. The flame is conditioned as optically thin per each fluctuation length and the flame spectral intensity is measured for inversion. From inversion result, we find that SRS can successfully invert the coupled temperature/concentration fluctuation amplitudes. For two cases of experiments, inverted values are within approximately 1% over the full range of fluctuation amplitude. However, SRS cannot find the detailed local fluctuation parameters such as pattern and phase, etc. as far as they do not affect the resulting radiation intensity. Important available parameters are the mean temperature and the temperature fluctuation amplitude. The radiation/turbulence interaction effect is verified to play an important role in the radiation.

기호설명

κ : 흡수계수(absorption coefficient)
 κ_0 : 평균흡수계수
 I : 복사강도(intensity)
 I_0 : 평균복사강도
 I_b : 흑체복사강도
 η : 파수(wavenumber)
 P : 분압(partial pressure)
 T : 온도
 h : 플랑크 상수

W : 가중치(weighting factor)
 τ : 투과율
 λ : 소산거리(dissipation length)
 λ_0 : 요동(fluctuation)간 거리
 C', T' : 요동농도 및 요동온도
 α : 요동온도와 농도간 상관계수
 α_k : 모델링 상수
 k : 볼츠만 상수

1. 서론

고온의 연소시스템의 온도와 농도분포를 정확하게 측정하는 것은 적절한 연소시스템의 설계 및 양질의 품질생산을 위하여 매우 중요하다. 연소시스템의 온도와 농도를 측정하는 전통적이고 보편적인 방법으로 센서를 직접 화염에 삽입하는 방식

[†] 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 열/공력그룹
 E-mail : sansa3@kari.re.kr
 TEL : (042)860-2684 FAX : (042)860-2697

^{*} 콜럼비아대학 메디컬센터

^{**} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

의 접촉식 측정방법이 주로 사용된다. 그러나 이러한 접촉식 온도측정방법은 센서의 삽입으로 인한 유동장의 교란, 복사와 대류간의 상호작용 등의 측정장애요소를 포함하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하고자 점차적으로 광학적인 방법을 이용한 비접촉식 측정방식에 대한 관심이 증가되었고, LIF(Laser Induced Fluorescence), CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy) 등의 방법이 소개되었다. LIF는 측정범위가 좁고 정확도가 낮으며 CARS는 뛰어난 공간분해능(spatial resolution)을 가지고 높은 측정정확도를 가진다. 그런데 CARS는 측정장비가 매우 복잡하고 고가이며, 측정영역이 제한적이라는 단점이 있어 실제현장에 적용하기 어렵다. 이에 비해 본 연구에서 적용하고자 하는 SRS(spectral remote sensing)는 상대적으로 간단한 광학장비를 필요로 하고 고온에서도 높은 정확도를 가지는 장점을 가지고 있다. 또한 시선방향으로의 측정 각을 변화시킴으로써 3차원측정도 가능하다. 이러한 특성들은 SRS의 공학적인 적용이 용이함을 보여준다. SRS는 Krakow⁽¹⁾에 의해 처음으로 산업용 노(industrial furnace)에 적용된 이후 측정기기의 발전, 적용 알고리즘의 개발로 인해 0.8m⁽²⁾와 2.0m⁽³⁾의 테스트 노(test furnace)에 적용되어 공학적인 활용가능성이 검증되었다. 그리고 최근에는 Kim과 Song⁽⁴⁾에 의해 3.4m 테스트 노의 정상상태의 온도분포를 50K 내로 예측하는데 성공하였다. 이러한 결과는 SRS의 공학적인 적용이 가능함을 실험적으로 증명한 것이라 하겠다. 그러나 대부분의 연소과정이 정상상태가 아닌 난류화염인 점을 감안한다면 난류화염에서의 SRS의 적용가능성을 검토해보아야 한다.

따라서 본 연구에서는 요동하는 난류화염에 SRS를 적용하여 온도와 농도분포를 예측하고 측정된 값과 비교함으로써 적용가능성을 확인하고자 한다. 더불어 난류화염에서 발생하는 복사/난류의 상호작용을 분석하여 상호작용이 복사강도에 미치는 영향을 검토하여 그 중요성을 확인하고자 한다.

2. SRS의 적용원리 및 모델링

2.1 SRS의 적용원리 및 CO₂ 데이터베이스

일반적으로 연료가 연소된 후에는 H₂O, CO₂ 및 CO 등의 연소생성물이 발생된다. 이러한 고온의 연소생성물들은 복사에너지를 방출하게 되는데 각각의 가스마다 복사에너지를 방출하는 파장대가 서로 약간씩 다르다. SRS는 가스복사의 이러한 특성을 이용하여 특정 파장영역에서의 복사강도를

측정하고 측정된 복사에너지를 이용하여 열복사에 참여한 가스의 온도 및 농도를 역계산 하는 방법이다. 따라서 SRS를 적용하기 위해서는 적절한 측정가스의 선정이 중요하게 되는데 현재까지 발달된 SRS는 CO₂를 측정매체로 선정한다. 그 이유는 CO₂가스가 대부분의 연소가스의 주요한 성분이며, 특히 CO₂ 4.3 μm 파장영역은 아주 강한 복사 및 흡수특성을 가지고 있고 다른 연소가스와 파장대가 겹치는 영역이 미미하기 때문이다. 4.3 μm 파장대의 여러 미세밴드에서 시선방향(line of sight)으로의 복사강도는 시선방향 내 존재하는 CO₂가스의 방출과 흡수에 의한 결과이고 이러한 상황은 수식, 즉 복사전달식으로 표현된다. 이 복사전달식에는 CO₂가스의 특정온도 및 농도에서의 흡수와 방출에 대한 내용이 담겨있는데, SRS를 적용하기 위해서는 복사강도를 정확히 측정하는 것과 더불어 이러한 CO₂가스의 흡수 및 방출에 대한 데이터베이스(database)가 잘 구축되어 있어야 한다. 현재까지 가장 정확한 흡수계수 데이터베이스 구축방법으로 LBL(line by line)방법이 있다. 이는 4.3 μm 근처의 파장을 복사선 폭의 넓이 정도로 아주 잘게 나누어 각각의 파장 별로 모든 데이터베이스를 구축하는 방법이다. 이 방법은 정확하나 매우 긴 계산시간이 필요하기에 공학적으로 적용하기에는 적합하지 않다. 따라서 계산시간은 극복하고 정확도는 유지할 수 있는 방법이 고안되었는데, 이러한 방법 중에서 WSGGM(weighted sum gray gas model)이 많이 적용되어 왔으며 이를 좀더 정밀하게 보완한 방법으로 CK-based WNB(cumulative k-based WSGGM-based Narrow band)모델(model)이 개발되었다. 이는 LBL에 비해 계산시간이 짧고 정확도는 크게 떨어지지 않는 장점을 가지고 있다.⁽⁵⁾ 또 실제 가스화염의 복사강도를 측정하는 IR(infrared)분광기가 보통 좁은 밴드, 즉 수 cm⁻¹의 파장의 분해능을 가지기 때문에 CK-based WNB 모델과 잘 상응한다. 따라서 본 연구에서는 이모델을 적용하고자 한다.

2.2 SRS의 수식표현 및 모델링

Fig. 1은 균일하지 않은 가스매질을 가지는 화염의 형상을 나타낸다.

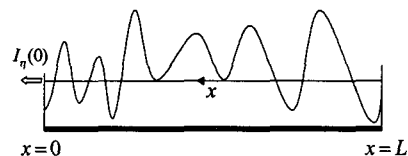


Fig. 1 Physical model and coordinate system

이 화염모델에 대한 정상상태의 복사전달식은 아래와 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$I_{\eta}(0) = I_{\eta}(L)e^{-\int_0^L \kappa_{\eta} dx} - \int_0^L I_{b\eta}[T(x)] \frac{\partial \tau_{\eta}(0-x)}{\partial x} dx \quad (1)$$

위 식의 첫 번째 항은 뒷벽에 의해서 전달되는 복사(중간의 가스층에 의해서 지수적으로 감소)이며 두 번째 항은 중간의 가스층에 의해서 방사되는 복사를 나타낸다. 앞서의 CK-based WNB 모델을 이용하여 식 (1)을 하나의 좁은 밴드에 대해 모델링 하면 아래와 같이 표현 가능하다.

$$I_{\eta}(0) = I_{\eta}(L) \sum_j W_j e^{-\int_0^L \kappa_{\eta_j}(x) dx} + \int_0^L I_{b\eta}(x) \sum_j W_j e^{-\int_0^x \kappa_{\eta_j}(x') dx'} \kappa_{\eta_j}(x) dx \quad (2)$$

측정된 좁은 밴드 별 복사강도를 적절히 가정한 온도분포로부터 구한 복사강도와 비교하여 이 둘을 일치시키면 최종적으로 화염의 온도를 역계산할 수 있다.^(3,4) 그런데 Fig. 1의 화염이 난류화염일 경우 복사/난류의 상호작용이 존재하기 때문에 정상상태의 화염과는 다른 접근이 필요하다. Kim과 Song⁽³⁾은 온도의 역계산과 더불어 순수하게 농도만을 역계산하는 경우에 대한 연구를 통해 만약 시선방향에 따라 온도의 변화가 없고, 국부적인 농도변화의 평균값이 같다면 이에 따른 측정위치에서의 복사강도는 변화가 없다는 결과를 얻었다. 이 결과가 말해주고 있는 것은 연소과정 중 화학반응에 의한 연소생성물의 온도와 농도가 서로 상호관계를 맺고 있을 때에만 온도와 농도의 역계산도 가능하다는 것을 말해 주는 것이다. 따라서 SRS를 적용하고자 한다면 온도와 농도가 서로 상호관계를 맺고 있는 화염에 적용했을 경우에만 가능하다. Fig. 1의 화염을 난류화염으로 보았을 경우, 뒷벽이 없고 개방화염일 때의 복사전달식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{\eta}(0, t) = \int_0^L \kappa_{\eta}(x, t) I_{b\eta}(x, t) \cdot \tau_{\eta}(0-x) dx \quad (3)$$

$$\tau_{\eta}(0-x) = e^{-\int_0^x \kappa_{\eta}(x') dx'}$$

식 (3)에서 $\tau_{\eta}(0-x)$ 와 $\kappa_{\eta}(x, t) I_{b\eta}(x, t)$ 는 서로 상호작용을 하지 않는다고 가정할 수 있는데 이는 소산길이 λ 의 광학두께가 충분히 얇아서 $\kappa_{\eta} \lambda \ll 1$ 일 경우에 성립한다. 흡수계수 항과 플랑크 함수항의 곱을 평균 항과 요동(fluctuation) 항

으로 나누어 표현하고, 이를 시간에 대해서 평균을 취하게 되면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\overline{\kappa_{\eta} I_{b\eta}} = \kappa_{\eta o} I_{b\eta o} + \overline{\kappa'_{\eta} I'_{b\eta}} \quad (4)$$

위 식은 요동의 광학두께가 얇을 경우, 동일한 표현으로 공간의 요동화염의 표현에 적용할 수 있게 된다. 더욱이 이렇게 될 경우, 위 내용은 화염 복사의 전체적인 평균효과를 표현하기 위해서는 화염마다 특별한 표현양식이 있는 것이 아니고 오직 하나의 일반적인 요동양식만으로도 표현 가능하다는 것을 내포하고 있다. 즉, 이 항은 공간요동이건 시간요동이건 요동의 함수적 형태가 무엇이건 관계가 없다. 단, 이러한 표현이 가능하기 위해서는 적용된 화염의 요동길이에 있어서의 광학두께가 얇은 조건을 만족해야 한다. 식 (3)에 대해서 공간에 대한 평균을 취할 경우, 흡수계수 항과 플랑크 함수항의 곱은 식 (4)에서 우측 마지막 항이 약간의 다른 형태를 취하면서 거의 동일한 표현을 사용할 수 있다. 공간에 대한 평균을 취했을 경우, 각각의 수식표현은 아래와 같다.

$$\overline{\kappa_{\eta} I_{b\eta}} = \frac{1}{\lambda_o} \int_x^{\alpha+\lambda_o} (\kappa_{\eta} - \kappa_{\eta o})(I_{b\eta} - I_{b\eta o}) dx$$

$$\kappa_{\eta o} = \frac{1}{\lambda_o} \int_x^{\alpha+\lambda_o} \kappa_{\eta}(x') dx' \quad (5)$$

$$I_{b\eta o} = \frac{1}{\lambda_o} \int_x^{\alpha+\lambda_o} I_{b\eta}(x') dx'$$

식 (3)을 풀어내기 위해서는 식 (2)처럼 모델링된 흡수계수 식을 적절히 반영해야 하고, 동시에 정상상태와는 다르게 난류화염의 특성을 고려해서 반영해주어야 한다. 본 연구에서는 공간적으로 요동하는 난류화염을 모사하기 위해서 여러 개의 화염을 반복적으로 선상에 설정하였다. 시간상의 요동을 취하지 않고 공간상의 요동을 취한 이유는 후자가 실험적으로 설정하기 쉬웠기 때문이다. 이 경우 국부적으로 가스온도와 CO₂ 농도의 요동, T' 과 C' , 이 상호 연관되어 있으며, $\alpha T' = C'$ 로 표현할 수 있다. 여기에서 α 는 양의 값을 가진다. 이는 화학반응이 활발하게 일어나는 국부 화염부분에서는 생성물 CO₂의 농도, 온도의 변화 값이 모두 높게 나타나며, 화학반응이 활발하지 않은 곳은 반대의 결과가 나타나기 때문이다. 더욱이 요동온도와 요동농도의 관계식은 전체화염길이에 대해서 국부적으로 일차적인 관계를 가질 것으로

판단된다. 다음으로, 흑체복사항은 주어진 파수(wavenumber)에서 복사강도가 오로지 온도에 의존하기 때문에 온도의 함수로 표현할 수 있다. 그리고 CO₂ 가스의 흡수계수는 온도와 농도의 함수가 되는데 온도를 농도와 일차적인 관계로 서술하였으므로 농도만으로 표현이 가능하게 된다. 이상의 결과를 식 (4)의 우측 항에 적용하면, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\kappa'_\eta I'_{b\eta}} = \frac{\partial I_{b\eta}}{\partial T} T' \frac{\partial \kappa_\eta}{\partial C} C' = \frac{\partial I_{b\eta}}{\partial T} \frac{\partial \kappa_\eta}{\partial C} \alpha T'^2 \quad (6)$$

식 (6)에서 α 는 양의 값을 가지므로 $\overline{\kappa'_\eta I'_{b\eta}}$ 는 양수가 됨을 알 수 있다. CO₂ 데이터베이스 모델링을 $\frac{P}{T^2} e^{-\alpha T} (1 - e^{-hc/\lambda T}) = f_i(T, P)$ 와 같이 표시하고⁽⁵⁾ 식 (3)을 평균화된 식으로 표현하면 최종적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{I_\eta(0)} = \int_0^t [(\sum_i \kappa_\eta f_i(\overline{T}, \overline{P}) W_i) \overline{I_{b\eta_0}} + \frac{\partial I_{b\eta}}{\partial T} \frac{\partial \kappa_\eta}{\partial C} \alpha T'^2] \tau_{0-x} dx \quad (7)$$

단, 여기에서 $\frac{\partial \kappa_\eta}{\partial C} = \sum \kappa_\eta \frac{\partial f_i}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial C} W_i$ 이다. 식 (7)에서 온도와 농도의 연계산에 있어서 중요한 인자는 화염의 평균온도(플랑크 복사강도, $\overline{I_{b\eta_0}}$), 요동온도의 절대값(요동온도 값의 제곱, $\overline{T'^2}$) 그리고 α , 요동온도 및 농도간 상관계수이다. 이 인자들을 구하기 위한 연계산에 적용된 알고리즘은 이 중요인자들을 최적화 하기 위한 준-뉴턴 법(Quasi-Newton method)을 사용하였으며 수렴기준은 아래와 같다.

$$Crit, E = \frac{1}{M} \sum_i^M \left(\frac{I_{calc,i} - I_{meas,i}}{I_{meas,i}} \right) \leq 1 \times 10^{-4} \quad (8)$$

3. 실험

실험을 위해 Fig. 2와 같은 장치를 제작하였다. 전체적으로 장치는 화염을 형성시키는 부분과 화염이 형성되는 부분 그리고 화염의 특성을 측정하기 위한 장치부분으로 구성된다. 먼저 화염을 형성시키기 위해서 연료로 LP 가스가 사용되었다. 적절하게 당량비를 맞추기 위해서 공기와 LP 가스

공급배관에 고정된 MFM(mass flow meter, MFM-100L/min-공기, 3L/min-프로판-Brooks)을 설치하고, 잘 섞인 예혼합기(premixed gas)를 만들기 위해서 중간에 혼합챔버(mixing chamber)를 설치하였다.

이렇게 섞인 혼합기는 1m 이상의 긴 배관을 따라 이동하며 완전히 섞이게 되고 허니콤(honeycomb)을 통해서 균일한 분포로 노즐(nozzle)로 분사되게 된다. 사용된 세라믹 허니콤은 균일 유속을 형성하고 역화(flash back)방지 및 예혼합기의 온도상승을 억제하는 역할도 한다. 허니콤을 이루고 있는 각각의 구멍은 표준상태 프로판의 소염거리(quenching distance)보다 작아서 순간적인 역화를 근본적으로 방지한다. 노즐은 슬릿(slit)의 형상을 가지도록 제작하여 화염이 공간적으로 요동을 가지게 하였다. 노즐의 개수는 2가지로 4개 및 5개를 가지도록 제작되었다. 이렇게 형성된 화염이 $\kappa_\eta \lambda \ll 1$ 의 조건을 만족시킬 수 있도록 슬릿간 간극을 조절하였다. 아래의 그림은 버너의 슬릿형상을 잘 묘사하고 있다.

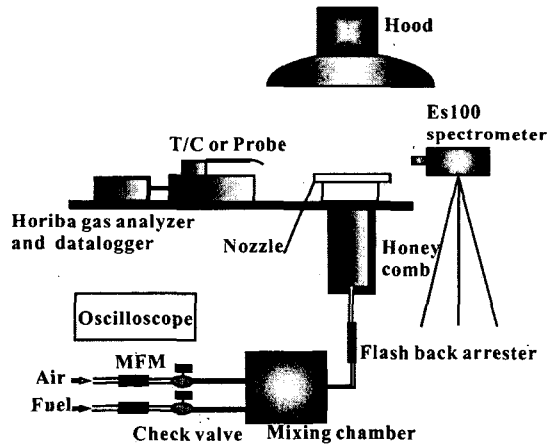


Fig. 2 Equipment layout

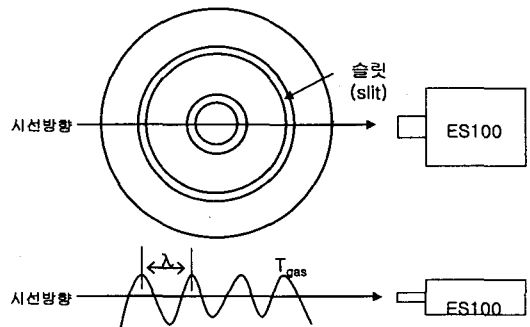


Fig. 3 Burner slit shape and resulted flame

3.1 복사강도 측정

난류화염의 복사강도를 측정하기 위하여 ES100 분광기(imaging spectrometer- Spectraline)를 사용하였다. ES100 분광기의 입구 슬릿 slit)의 높이는 6mm 이고 폭은 0.5mm 이다. 이 슬릿을 통해서 받아들인 이미지는 프리즘(calcium fluoride prisms)을 통과한 후에 파장 1.2 μm 부터 4.8 μm 에서 분광되어 160 개의 광 감지센서(lead selenide array)에 도달하게 된다. 광 감지 센서의 시선방향으로의 전체적인 시야범위는 0.5° 으로써, 본 실험에서는 1.5mm 이내의 시야범위를 형성할 수 있어 충분한 공간 분해능을 가진다. 또한 분광기내부는 질소를 이용해서 충전하여 적외선 구역에서 투명도를 유지하였다. 복사강도의 측정에 앞서 장치를 교정하는데 흑체노(blackbody furnace, BB-4A-230VAC, Omega)가 사용되었다. 파수 범위($2100\text{cm}^{-1}\sim 2460\text{cm}^{-1}$)사이에서 773K ~ 1225K 사이의 온도 범위 내에서 총 6 개의 온도를 100K 간격으로 교정을 실시하였다. 복사강도의 측정을 위해 교정을 실시하였고 각각의 파수에 대한 복사강도가 1% 이내의 상대오차를 만족함을 확인하였다. 받아들인 복사강도의 데이터를 수집하는 장치(data acquisition board)는 6070E-DAQ board(1.25MS/s, 12bit- National Instrument)를 사용하였다.

3.2 온도측정

고온화염의 온도를 측정하기 위해서 R 형 열전대를 사용하였다. 열전대를 사용해서 고온화염의 온도를 측정할 때에는 복사에 의한 열 손실을 보상해 주어야 한다. 이를 위해 비드(bead)사이즈가 다른 두 개의 열전대를 사용하여 외삽법으로 비드(bead)지름이 영(zero)일 경우의 온도로 보상하였다.⁽⁷⁾ 사용된 열전대의 비드크기는 50 μm 와 100 μm 이다.

3.3 농도측정

화염의 농도측정을 위해 MEXA554JK 가스 분석기(Horiba)를 사용하였다. 이 분석기는 흡습식 가스 분석기로 측정방식은 비분산 적외선 방식을 선택하고 있다. 가스분석기의 재현성은 $\pm 0.5\%$ (volume)이고 응답속도는 10 초 이내에 90% (volume) 이상의 응답성을 가지고 있다. 측정하고자 하는 화염의 전체지름이 120mm 이내이기 때문에 공간 분해능을 개선해주어야 하고 이를 위해서 프루브(probe)의 구멍지름을 300 μm 로 제작하였다. 화염의 온도가 1500K 이상이므로 프루브(probe)의 재질은 높은 온도에서도 사용할 수 있는 석영

(quartz)을 사용하였다.

4. 결과 및 분석

4 개 및 5 개의 슬릿을 가지는 노즐을 이용하여 광학적으로 얇은 화염을 형성하여 복사강도를 측정하였고, 식 (8)을 이용하여 온도와 농도를 역계산 하였다. 이 때 온도와 농도의 공간상의 요동은 정현파의 형상으로 일정한 진폭을 갖는다고 보았다. 역계산 된 온도와 농도분포를 실제 측정된 온도 및 농도분포와 비교하였다. Fig. 4 와 Fig. 5 는 이러한 결과를 보여주고 있다. 4 개의 피크를 가지는 화염의 역계산 결과, 온도와 농도의 평균값, 요동 값뿐만 아니라 위상차도 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

평균값과 요동값은 측정된 값과 비교하여 1% 내로 일치했으며 위상(phase)차는 1cm 내로 잘 일

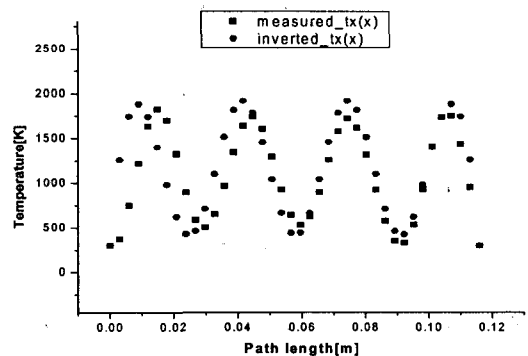


Fig. 4 Measured and inverted temperature profiles of 4-peak flame

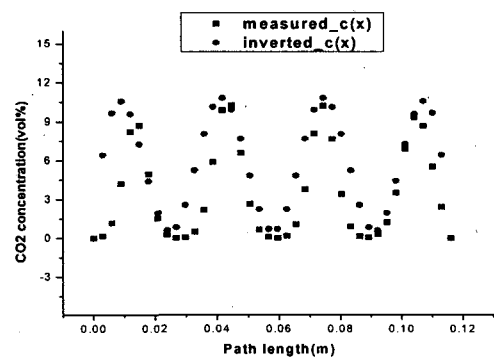


Fig. 5 Measured and inverted concentration profiles of 4-peak flame

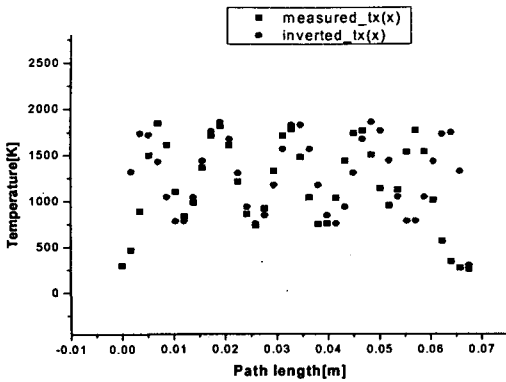


Fig. 6 Temperature inversion result of 5-peak flame

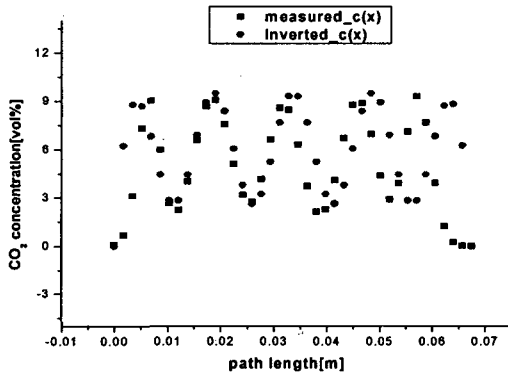


Fig. 7 Concentration inversion result of 5-peak flame

치하는 것을 확인하였다. 다음으로 5 개의 피크를 가지는 화염의 역계산 결과를 측정값과 비교하여 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타내었다.

5 개의 피크를 가지는 화염의 경우, 온도와 농도의 평균값과 요동 값은 4 개의 피크의 경우보다 정확한 역계산 결과를 가진다. 그런데 위상차의 경우는 4 개의 피크결과에 비해서 더 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 하나의 요동길이에서 화염이 광학적으로 얇은 경우 난류로 인한 화염의 위상차는 복사강도에 미치는 영향이 미미하여 중요한 인자가 아님을 보여준다. 즉, 요동하는 광학적으로 얇은 난류화염의 복사강도는 하나의 일반적인 요동양식을 통해 전체적인 효과를 표현해 낼 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 복사강도에 중요한 영향을 미치는 인자는 화염의 평균온도, 요동온도 그리고 요동온도와 농도의 상관계수이다. 따라서 하나의 요동길이에서 광학적으로 얇은 난류화염의 경우, 복사강도는 화염의 평균온도와 요

동온도, 요동온도와 농도의 상관계수를 적절히 선정하고 일반적인 정현파와 같은 하나의 요동양식을 통해 표현해 낼 수 있는 것이다. 이는 곧 SRS 를 통해 온도와 농도를 역계산 하기 위해서는 화염의 평균온도, 요동온도, 요동온도와 농도간 상관계수를 적절한 요동양식을 통해 최적화 해야 함을 말해준다. 물론 난류화염의 요동은 광학적으로 얇은 조건을 만족해야 한다.

본 연구의 또 다른 중요한 논제는 난류화염에서의 복사/난류간 상호작용의 영향 대한 내용이다. 이를 확인하기 위해 식 (8)에서 $\overline{\kappa'_\eta I'_{b\eta}}$ 과 $\kappa_{\eta_0} I_{b\eta_0}$ 의 비를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\overline{\kappa'_\eta I'_{b\eta}}}{\kappa_{\eta_0} I_{b\eta_0}} = \frac{\alpha T'^2 \frac{\partial I_{b\eta}}{\partial T} \sum_i^M \kappa_{\eta_i} \frac{\partial f_i}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial C} W_i}{I_{b\eta_0} \sum_i^M \kappa_{\eta_i} f_i W_i} \quad (9)$$

f_i 의 표현이 P 에 선형적임을 고려하면 $\frac{\partial f_i}{\partial P} = f_i / P$ 가 되며 결과적으로 κ_{η_0} 에 대한 항이 정리되어, 아래와 같이 재정리하여 표현할 수 있다.

$$\frac{\overline{\kappa'_\eta I'_{b\eta}}}{\kappa_{\eta_0} I_{b\eta_0}} = \frac{\alpha T'^2 \frac{\partial I_{b\eta}}{\partial T} \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial C}}{I_{b\eta_0}} \quad (10)$$

또한 화염면의 전후에 있어서 농도 C 가 0 부터 C_{max} 까지 정현파 함수 형태로 변화하며 $I_{b\eta}$ 는 $I_{b\eta_0} - \Delta I_{b\eta}$ 부터 $I_{b\eta_0} + \Delta I_{b\eta}$ 까지 역시 정현파 함수형태로 변화하는 경우 식 (10)의 우측 분자 항은 $\alpha T' = C'$; $\frac{\partial I_{b\eta}}{\partial T} T' = I'_{b\eta}$ 이고 특히 CO_2 농도 C 는 CO_2 분압 P 와 비례관계에 있을 때 $\frac{\partial P}{\partial C} \frac{1}{P} = 1/\bar{C}$ 이 되어, 최종적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\overline{\kappa'_\eta I'_{b\eta}}}{\kappa_{\eta_0} I_{b\eta_0}} \cong \frac{C' \Delta I'_{b\eta} / \bar{C}}{I_{b\eta_0}} = \frac{\Delta I_{b\eta}}{2 I_{b\eta_0}} \quad (11)$$

본 연구에서 이 값은 약 0.5 의 값을 가진다. 이 결과는 기존의 연구결과^(8,9)와 같이 복사/난류간 상호작용이 복사열전달에 매우 중요한 영향을 미치는 것을 증명해 주고 있다. 만약 복사/난류간 상호작용을 고려하지 않고 역계산을 수행할 경우, 역계산 된 결과값은 실제의 값에 비해 높은 값을 가지게 된다.

5. 결론

비접촉식 광학측정방법인 SRS 를 이용하여 온도와 농도가 서로 상호관련(coupled)되어 있는 난류 화염의 온도와 농도분포를 역계산 해보았다. 공간상으로 요동하는 난류화염을 형성하기 위해 장치를 제작하고 측정장비를 이용하여 복사강도, 온도 및 농도를 측정하였다. 결과적으로 τ_η 항과 $\kappa_\eta I_{b\eta}$ 항의 상호관계가 무시될 수 있고, 온도와 농도가 서로 상호관련(coupled)되어 있는 난류화염에서 SRS 는 온도와 농도의 요동 값을 적절히 예측하였다. 형성된 2 가지 화염에 대해서 역계산 값은 측정값의 1% 내로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 SRS 는 요동양식, 위상등을 적절히 예측 할 수 없었는데, 이는 요동의 양식과 위상이 복사강도에 영향을 미치지 못하기 때문이다.

다음으로, 난류화염에서의 복사/난류간 상호작용의 영향에 대한 내용을 분석하였다. 결과적으로 복사/난류간 상호작용은 무시할 수 없이 중요한 부분으로 적절한 역계산을 수행하기 위해서는 반드시 고려되어야 함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10682-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Krakow, B., 1966, "Spectroscopic Temperature Profile Measurements in Inhomogeneous Hot Gases," *Appl. Opt.* 5, pp. 201~209.
- (2) Woo, S. W. and Song, T.H., 2002, "Measurement of a Gas Temperature Profile Using Spectral Intensities at CO₂ 4.3 μ m," *Int. J. Therm. Sci.* Vol. 41, pp. 883~890.
- (3) Kim, H.K. and Song, T.H., 2002, "Measurement of Gas Temperature Distributions in a Test Furnace Using Spectral Remote Sensing," *JQSRT* 73, pp. 517~528.
- (4) Kim, H.K. and Song, T.H., 2004, "Characteristics of SRS Inversion for Measurement of Temperature and CO₂ Concentration Profile of a Combustion Gas Layer," *JQSRT, Radiative Transfer*, Vol. 86, Issue 2, 15 June, pp. 181~199.
- (5) Yang, S.S. and Song, T. H., 1999, "An Improved WSGGM-based Narrow Band Model for the CO₂ 4.3 μ m Band," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 38, pp. 228~238
- (6) Modest, M.F., 1993, *Radiative heat transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (7) Holman, J.P., 2002, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (8) Song, T. H. and Viskanta, R., 1987, "Interaction of Radiation with Turbulence : Application to a Combustion System," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 56~62.
- (9) Li, G and Modest, M. F., 2002, "Application of Compolsition PDF Methods in the Investigation of Turbulence-Radiation Interactions," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 73, pp. 461~472.