

파장별 복사강도를 사용한 온도 역계산의 적용

양 수 석* · 송 태 호**

(1999년 8월 27일 접수)

Application of Temperature Inversion by Using Spectral Radiation Intensities

Soo-Seok Yang and Tae-Ho Song

Key Words : Radiation(복사), Spectral Intensity(파장 강도), CO₂ 4.3 μm Band(이산화탄소 적외선 밴드), Narrow Band(좁은밴드), Temperature Inversion(온도 역계산)

Abstract

Analytical experiments to determine the line-of-sight temperature distribution is conducted by using spectral radiation intensities. For this study, fourteen narrow bands of 25 cm⁻¹ interval in CO₂ 4.3 μm band (2,050 cm⁻¹ to 2,375 cm⁻¹) are selected. The applied system is a one-dimensional gas slab filled with 100% CO₂ gas at 1 atm. Two types of temperature profile are tested; parabolic and boundary layer types. Three kinds of radiation calculation are used in the iteration procedure for the temperature inversion; LBL(Line by Line), SNB(Statistical Narrow Band) and WNB(WSGGM- based Narrow Band) models. The LBL solution shows perfect agreement while some error of temperature prediction is caused by radiation modeling error when using SNB and WNB models. The inversion result shows that the WNB model may be used more accurately in spectral remote sensing techniques than the traditional SNB model.

기호설명

I : 복사강도
 L : 매질의 경로길이
 R : 복사강도의 상대 잔여량
 S : 매질내 임의의 경로길이
 T : 온도
 x : 매질의 투과율

i, m : i 번째 좁은밴드의 측정치
 η : 파장별 값
 $b\eta$: 흑체의 파장별 값

1. 서 론

공학문제에서 매질내의 온도를 측정하기 위하여 열전대와 같은 센서를 주입할 경우에는 이로 인해 유동장이 교란될 뿐만 아니라 대류/복사 상호작용으로 인하여 측정이 정확하지 못하고 또한 밀폐된 시스템의 내부로 센서를 주입하는데 어려움이 많다. 따라서 CARS⁽¹⁾ (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy), LIF⁽²⁾ (Laser Induced Fluorescence), CT⁽³⁻⁵⁾ (Computed Tomography)

하첨자

i : i 번째 좁은밴드
 j : j 번째 온도분포
 i, c : i 번째 좁은밴드의 계산치

* 회원, 한국항공우주연구소 항공추진연구그룹

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : thsong@sorak.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3032 FAX : (042)869-3210

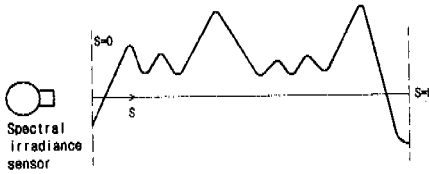


Fig. 1 SRS for engineering application

등의 광학적 온도 측정법들이 개발되어 사용되고 있다. 이 중에서 CARS와 LIF 방법은 외부의 강한 레이저 광원과 복잡한 광학장치를 필요로 한다. 또한 CT는 측정면의 2차원 온도분포를 직접 측정할 수 있는 장점이 있는 반면에, 매질을 따라 원주방향의 복사강도에 대한 정보를 필요로 하기 때문에 외부로 노출된 화염을 제외하고는 적용하기가 어렵다. 따라서 이러한 단점들을 해결하기 위하여 파장별 복사강도를 측정하는 SRS (Spectral Remote Sensing) 기법⁽⁶⁻¹¹⁾에 대한 공학적 응용이 오래 전부터 시도되어 왔다. SRS 방법은 1960년대부터 대기권 연구에 널리 사용되어 왔다. 이 방법은 여러 파수에서 측정한 파장별 복사강도를 기준으로 역계산(inversion)을 통하여 온도를 구하는 방법이며 시선상의 온도 분포에 대한 정보를 알 수 있다는 점에서 매우 유리한 방법이다.

Chahine⁽⁶⁾와 Smith⁽⁷⁾ 등의 연구에서 볼 수 있듯이 역계산법이 대기권의 온도 측정에 효과적으로 적용되는 이유는 첫째로 대기권내의 온도 구배가 그다지 크지 않다는 것이다. 즉, 대기권의 온도가 200 K 내지 300 K 범위에서 비교적 완만한 분포를 가지기 때문에 투과율 τ_γ 의 온도에 대한 의존성이 매우 작다. 따라서 Fig. 1과 같은 매질에서 $s=0$ 의 파장별 복사강도 $I_\gamma(0)$ 는 아래식과 같이 표현되며 이 때 $I_\gamma(0)$ 는 온도에 거의 선형적인 특성을 보이게 된다.

$$I_\gamma(0) = - \int_0^L I_{b\gamma}(T(s)) \frac{d\tau_\gamma(s)}{ds} ds \quad (1)$$

여기에서 $I_{b\gamma}$ 는 흑체의 복사강도를 나타내며 매질내 0와 s 사이의 파장별 투과율을 나타내는

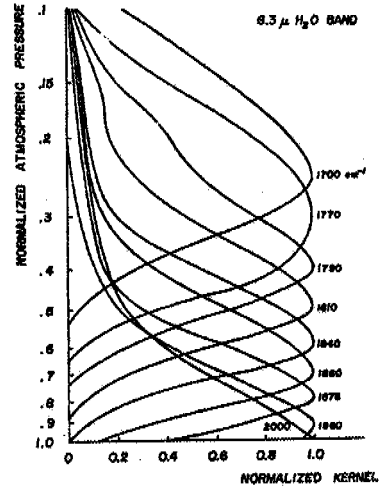


Fig. 2 Distribution of the kernel in the atmosphere

$\tau_\gamma(s)$ 는 흡수계수 x_γ 에 의해 아래식 (2)로 표현된다.

$$\tau_\gamma(s) = e^{-\int_0^s x_\gamma(s') ds'} \quad (2)$$

둘째로 복사 방정식을 반복적으로 수렴시킬 때 수렴 결과에 가장 큰 영향을 미치는 커널(kernel) 즉, 위 식에 나타난 $d\tau_\gamma/ds$ 의 최대값이 대기권과 같은 매질에서는 측정 파장에 따라 Fig. 2에서와 같은 분포를 보이기 때문이다. 즉, 식 (1)에 의하면 어떤 측정 파수에서 측정된 복사강도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 해당 측정 파수의 커널값이 최대가 되는 위치에서의 온도이므로 Fig. 2와 같은 분포를 보이는 커널의 측정 파수를 사용하면 매질의 모든 위치에서 온도를 비교적 정확히 구할 수 있는 것이다.

이러한 SRS 기법은 공학문제에서도 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되어 1960년 후반에 Krakow⁽⁸⁾에 의해서 시작되어 그후 Cutting,⁽⁹⁾ Buchele,⁽¹⁰⁾ Viskanta⁽¹¹⁾ 등에 의해서 연구되어 왔다. 그러나 대기 분야의 연구에서와는 달리 이러한 역계산법이 노 및 연소기 등의 공학적인 문제에 적용될 때에는 어려운 문제점들이 생긴다. 먼저 산업용 노(furnace)나 가스터빈의 연소기 등에 역계산법을 적용할 경우에는 매질의

온도가 300 K에서 2,500 K 정도로 매우 넓은 분포를 가질 뿐만 아니라 온도의 구배도 매우 크다. 따라서 방사율의 온도 의존성이 매우 커지게 되며 식 (1)의 복사강도는 온도에 대하여 뚜렷한 비선형 특성을 보이게 된다. 또한 Fig. 2에서 보였던 바와 같은 커널값의 적절한 분포를 공학문제에서는 기대하기가 어렵다.

공학적인 문제, 특히 매질의 온도가 고온일 경우에 SRS 기법을 효과적으로 적용하기 위하여 본 연구에 앞서 세 가지의 연구를 진행하였다. 첫째로 식 (1)의 복사 방정식에서 비선형

특성을 유발시키는 투과율에 대한 정확한 예측을 위해 복사 모델링의 연구를 진행함으로써 기존 SNB⁽¹²⁾(Statistical Narrow Band) 모델보다 정확도가 향상된 CK-based WNB^(13,14) (WSGGM- based Narrow Band) 모델을 제안하였다. 둘째로 연소가스와 같은 고온의 매질에서는 뜨거운 밴드(hot band)를 고려하여야 정확한 복사 성질을 파악할 수 있다. 이를 위해 Scutaru 등⁽¹⁵⁾이 제안한 방법을 사용하여 뜨거운 밴드(hot band)의 데이터 베이스⁽¹³⁾를 생성하였다. 셋째로 측정 파수의 선택 및 매질의 조건(경로길이, 온도분포 형태 등)에 따른 SRS의 오차 특성을 사전에 분석하였다.^(13,16)

이러한 선행 연구를 바탕으로 1 기압의 100% CO₂로 채워져 있는 1 m 길이의 매질에 대한 온도를 역계산하기 위하여 SRS를 직접 적용하여 보았다. 이때 CO₂ 4.3 μm 영역에서 25 cm⁻¹ 파수폭을 가지는 14개의 좁은밴드를 측정 파수로 설정하였는데 그 이유는 CO₂는 4.3 μm 영역에서 강한 흡수밴드를 형성하고 있으며 CO₂의 다른 밴드나 H₂O 밴드와의 중첩이 생기지 않기 때문이다. 여기에서 온도분포의 형태는 Fig. 3의 포물선형과 경계층형을 기준으로 하였다.

또한 온도 역계산에서 LBL 계산, SNB 및 CK-based WNB 모델의 복사 계산법을 사용함으로써 온도 역계산에 미치는 복사 모델링의 영향도 연구하였다. 선택된 파수에서 복사강도의 측정치는 LBL 계산으로 구한 복사 강도로 대신하였다.

2. 역계산 알고리즘

공학 문제에서 접하는 일반적인 매질은 Fig.

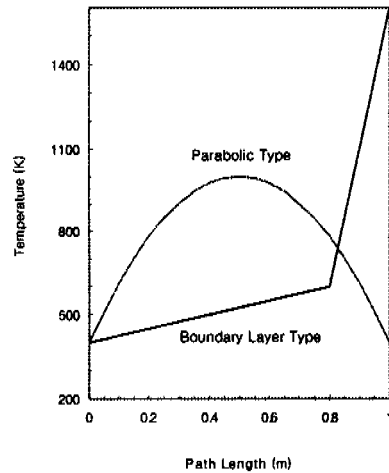


Fig. 3 Tested temperature profiles of the medium (1 atm, 100% CO₂)

1과 같이 시선방향(+s)으로 온도와 밀도가 동시에 변하지만 본 연구에서는 온도와 농도가 서로 상관관계를 보이는 복잡한 문제를 피하기 위하여 1 기압의 100% CO₂로 채워져 있는 매질을 대상으로 역계산을 수행한다. 이때 위치 s=0에서 측정된 i 번째 좁은밴드에서의 평균 복사강도를 I_{i,m}이라 하고, 잠정 추정된 온도분포로부터 식 (1)을 사용하여 계산된 평균 복사강도를 I_{i,c}라 하면 두 값의 상대 잔여량(residue) R_i는 아래와 같이 표현된다.

$$R_i = \frac{I_{i,c} - I_{i,m}}{I_{i,m}} \quad (3)$$

역계산으로 구하는 온도분포가 실제의 온도분포에 가까워지면 R_i의 값은 영으로 근사된다. 그러나 실제에 있어서는 측정값 자체도 측정오차를 가지고 있으며 계산값도 복사 모델링에 따른 계산 오차를 가지고 있기 때문에 역계산이 수렴한 뒤에도 R_i는 어느 정도 작은 값을 가진다.

역계산에서 측정밴드로서 사용된 좁은밴드의 개수를 m이라 하고 온도분포가 n개의 인자에 의해 결정된다고 하면 아래의 식이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial R_i}{\partial(\delta T_i/T_i)} \frac{\delta T_i}{T_i} = \delta R_i, \quad i=1, \dots, m \quad (4)$$

온도분포가 3개의 인자값에 의해 결정되는 경우 ($n=3$), 정확히 역계산에 필요한 측정밴드의 개수는 3개이다 ($m=3$). 그러나 이러한 경우에 있어서 수학적으로는 해가 존재하나 식 (4)에 의한 3개의 수식이 서로 뚜렷이 독립적이지 않음으로 인해 실제로는 해가 부정확하거나 해를 구할 수 없는 경우가 자주 발생한다. 따라서 3개 이상의 측정밴드를 사용함으로써 문제를 불능형으로 만든 뒤 m 개의 수식을 가장 근사적으로 만족시키는 온도분포를 최소제곱(Least Square)법으로 구하는 것이 가장 안정적으로 온도를 역계산하는 방법이다. 식 (4)를 행렬식으로 표현하면 아래 식과 같이 된다.

$$[A] \left[-\frac{\delta T}{T} \right] = [\delta R] \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 행렬 $[A]$ 는 식 (4)의 미분항으로 정의된다. 불능형 문제에서 행렬 $[A]$ 는 정방(square)행렬이 아니므로 행렬 계산법을 사용하여 온도의 오차를 표현하면 아래 식과 같이 된다.

$$\left[-\frac{\delta T}{T} \right] = [A^T A]^{-1} [A]^T [\delta R] \quad (6)$$

SRS 방법에서 온도 역계산을 수행하는 과정은 주어진 초기 온도로부터 위 식에서 계산된 $[\delta T]$ 를 사용하여 다음식과 같이 온도분포를 반복적으로 변화시켜 나가는 것이다. 이때 식 (3)에서 정의한 각 좁은밴드의 파장별 잔여량 R_i 는 점점 줄어들게 되며 최종적으로 R_i 를 미소 한계치 이내로 수렴시키는 온도분포를 구하는 것이다.

$$[T]^{new} = [T]^{old} + [\delta T] \quad (7)$$

이러한 과정을 통하여 반복 계산되어지는 온도분포는 점점 매질의 실제 온도분포에 수렴되어 가며, 이때 수렴점 근처에서는 식 (6)의 우변항인 $[A]^T [\delta R]$ 의 값이 거의 영이 되므로 계산이 진

동하는 경향을 보인다. 따라서 이러한 진동을 완화시켜주는 방법이 필요하며 본 연구에서는 Buchele⁽¹⁰⁾가 제안한 것과 같이 아래식을 사용하였다.

$$[A^T A + (p/q) Q] \left[-\frac{\delta T}{T} \right] = [A]^T [\delta R] \quad (8)$$

여기에서 Q 는 대각선 행렬이며 각 요소는 $[A^T A]$ 의 대각선 요소와 동일하다. 따라서 식 (8)의 좌변항은 행렬 $[A^T A]$ 의 대각선 요소가 $(1+p/q)$ 만큼 배가된 형태이다. 또한 q 는 행렬 $[A^T A]$ 의 대각선 요소인 $a_{i,i}$ 에 따라 다음 식과 같이 정의되며,

$$q = \left(\sum_i a_{i,i}^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

p 는 행렬 $[B^T R]$ 의 요소인 p_i 에 따라 다음 식과 같이 정의된다.

$$p = \left(\sum_i p_i^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

여기에서 행렬 $[B]$ 는 파장별 잔여량 R_i 의 이차 미분값으로 아래 식과 같이 정의된다.

$$b_{i,j} = T_j^2 \left(\frac{\partial^2 R_i}{\partial T_j^2} \right) \quad (11)$$

실제적으로 $a_{i,j}$ 와 $b_{i,j}$ 를 구하는 것은 다음 식을 사용하여 구한다.

$$a_{ij} = \frac{I_{i,c}^+ - I_{i,c}^-}{0.02 I_{i,m}} \quad (12)$$

$$b_{i,j} = \frac{I_{i,c}^+ - 2I_{i,c}^0 + I_{i,c}^-}{0.01^2 I_{i,m}} \quad (13)$$

여기에서 $I_{i,c}^j$ 는 온도분포를 결정하는 변수 온도 T_j 의 온도를 1% 증가시켰을 때 변화되는 온도분포로부터 계산한 복사강도의 크기, $I_{i,c}^j$ 는 변수 온도 T_j 의 온도를 1% 감소시켰을 때 변화되는 온도분포로부터 계산한 복사강도의 크기,

$I_{i,c}$ 는 현재의 온도분포에서 계산한 복사강도의 크기를 각각 나타낸다. 또한 $I_{i,m}$ 은 파장별로 측정된 복사강도를 나타내며 여기에서는 앞서 설명한 바와 같이 LBL로 계산한 값으로 대신하였다. 즉, 이로써 측정이 완벽한 경우, 순수한 모델링 오차만을 조사하였다.

3. 계산 결과

3.1 복사강도의 계산

온도 역계산을 수행하기 위하여서는 $s=0$ 위치에서 측정된 복사강도 $I_b(0)$ 이 필요하다. 본 연구에서는 복사강도 측정값을 대신하기 위하여 Fig. 3의 포물선형과 경계층형 온도분포를 가지는 매질을 대상으로 식 (1)을 사용한 LBL 계산을 우선 수행하였다. 측정에 사용하는 CO₂ 4.3 μm 밴드내에 존재하는 14개의 좁은밴드는 25 cm⁻¹의 파수폭을 가지며 각 좁은밴드의 중심파수는 2050, 2075, 2100, 2125, 2150, 2175, 2200, 2225, 2250, 2275, 2300, 2325, 2350, 2375 cm⁻¹와 같다. LBL 계산은 0.03 cm⁻¹ 간격으로 수행하였으며 구하여진 복사강도를 중심파수 η 를 중심으로 -12.5 cm⁻¹에서 +12.5 cm⁻¹ 사이를 평균한 값을 중심파수에서의 복사강도로 취하였다.

포물선형 온도분포에서는 각 좁은밴드별로 Table 1과 같은 복사강도를 보이고 있다. 여기에서 측정값(measurement)은 앞서 설명한 바와 같이 LBL의 계산값으로 대신하였다. 또한 WNB 및 SNB 모델링의 경우에는 측정값(LBL)과 각 모델링 계산값의 차를 측정값에 대한 백분율로 표시하여 나타내었다. 중심파수가 2,175 cm⁻¹와 2,200 cm⁻¹인 좁은밴드에서 복사강도가 가장 크게 나타나며 밴드의 중심인 2,300 cm⁻¹로 갈수록, 그리고 밴드의 가장자리인 2,050 cm⁻¹로 갈수록 복사강도는 약해진다. 복사강도가 Table 1과 같은 분포를 보이는 이유를 살펴보자. 파수 2200 cm⁻¹ 부근에서는 온도가 높으면 방사율이 커지고 온도가 낮으면 반대로 투과율이 커지는 복사 특성에 따라 매질의 중앙에 위치한 고온 매질로부터 발생한 복사강도가 투과율이 높은 앞쪽 매질을 통과하여 센서에 전달되기 때문이다.

그러나 밴드의 중심인 2,300 cm⁻¹ 근처에서는 방사율이 매질의 온도에 관계없이 큰 값을 유지

Table 1 Computed radiation intensities for the parabolic temperature profile(the 'measurement' is the LBL results, assuming no measurement error)

Band center (cm ⁻¹)	Measurement (W-cm/m ² -sr)	WNB (%)	SNB (%)
2050	0.29542	0.46	4.40
2075	0.38870	0.50	0.33
2100	0.35000	-2.38	-6.13
2125	0.51000	-1.43	-16.67
2150	1.33063	-0.59	-17.60
2175	3.29052	1.50	-5.28
2200	3.44582	0.27	2.82
2225	1.63881	0.15	6.82
2250	0.47427	-0.44	6.78
2275	0.12893	-0.19	4.80
2300	0.06152	0.39	-0.88
2325	0.05585	0.02	-0.30
2350	0.05297	0.01	-0.02
2375	0.05386	-0.74	4.28
Total RMS		3.43	28.54
Mean error		0.25	2.04

하기 때문에 중심 매질에서 발생한 복사강도가 주위 매질, 특히 저온의 앞쪽 매질에 의해서 대부분 차단되어 버린다. 이와는 달리 밴드의 가장자리인 2,050 cm⁻¹ 근처에서는, 방사율이 1,000 K 이하에서 비교적 낮은 값을 유지하기 때문에 중앙의 고온 매질에서 발생하는 복사강도가 약하고 따라서 센서에 도달되는 복사강도도 낮게 나타난다.

SNB 및 WNB의 좁은밴드 모델을 이용한 복사 계산은 LBL 계산과 다소의 차이를 보이고 있음을 알 수가 있다. WNB 모델의 경우는 복사강도의 계산치가 2,100 cm⁻¹에서 2.38%를 제외하고는 모두 1% 전후의 작은 오차를 보이고 있다. 그러나 SNB의 경우는 2,125 cm⁻¹와 2,150 cm⁻¹에서 15% 이상의 오차를 보이며 그 외의 좁은밴드에서도 약 5% 전후의 오차를 보인다. 즉, 모델에 따라 오차가 정량적으로 달라질 뿐만 아니라 좁은밴드마다 오차의 크기도 매우 다르게 나타남을 확인할 수가 있다. 14개의 좁은밴드에 대한 평균적인 오차는 WNB의 경우에는 0.25%, SNB의 경

우에는 2.04%를 보이고 있다.

경계층형 온도분포에서는 각 좁은밴드별로 Table 2와 같은 복사강도 결과를 보이고 있다. 계산 결과로부터 복사강도의 크기는 각 좁은밴드별로 포물선형과 비슷한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 분포는 앞서 설명한 바와 같이 매질의 방사율이 온도분포와 경로길이에 따라 각 좁은밴드별로 다른 특성을 보이기 때문이다. WNB와 SNB 좁은밴드 모델을 사용한 계산의 오차는 전반적으로 작게 나타나지만, 2,075 cm^{-1} 근처의 밴드 가장자리와 2,225 cm^{-1} 근처의 좁은밴드에서는 큰 오차를 보이고 있다. WNB의 경우를 살펴보면 2,075 cm^{-1} 에서 3.9% 정도, 2,250 cm^{-1} 에서는 약 4.5%의 오차를 보인다. SNB의 경우는 2,050 cm^{-1} 에서 약 32%, 2,225 cm^{-1} 에서는 20% 정도로 매우 큰 오차를 보인다. 14개의 좁은밴드에 대한 평균오차는 WNB의 경우에는 0.51%, SNB의 경우에는 3.11%를 보이고 있다.

3.2 온도분포를 결정하는 변수

온도 역계산에서 매질내의 포물선형과 경계층형의 온도 분포는 다음과 같은 3개의 인자에 의해 결정된다고 가정한다. 포물선형의 온도분포에서는 센서에 가까운 쪽의 온도 T_0 , 매질의 중앙 ($x=0.5$)에 위치한 최고 온도 T_i 및 센서에서 먼 쪽의 온도 T_L 이 정하여지면 매질내의 온도분포는 아래 식과 같이 결정된다.

i) $0 \leq x \leq 1/2$ 일 때

$$T = -4(T_i - T_0)x^2 + 4(T_i - T_0)x + T_0 \quad (14)$$

ii) $1/2 \leq x \leq 1$ 일 때

$$T = -4(T_i - T_L)x^2 + 4(T_i - T_L)x + T_L \quad (15)$$

경계층형 온도분포에서는 포물선형과 마찬가지로 센서에 가까운 쪽의 온도 T_0 , 매질내 ($x=0.8$)에 위치한 온도 T_i 및 센서에서 먼 쪽의 온도 T_L 이 온도분포를 결정하는 3개의 인자이며 각 온도 사이의 분포는 직선으로 가정한다.

역계산시 초기 온도를 시작으로 반복 과정마다 식 (6)에 따라 ΔT_0 , ΔT_i , ΔT_L 이 계산되면 새로운 온도 $[T]^{new}$ 가 식 (7)로 구하여진다. 새로이 구하여진 T_0 , T_i , 및 T_L 로부터 매질의 온도

Table 2 Computed radiation intensities for the boundary layer type temperature profile (the 'measurement' is the LBL results)

Band center (cm^{-1})	Measurement ($\text{W-cm/m}^2\text{-sr}$)	WNB (%)	SNB (%)
2050	0.23950	2.15	-32.19
2075	0.52552	3.86	-18.63
2100	1.34738	-1.21	-0.69
2125	3.46997	0.08	0.66
2150	7.25892	-0.99	0.87
2175	9.59667	0.81	2.00
2200	5.95161	-0.36	8.66
2225	1.08982	-2.72	20.20
2250	0.08972	-4.55	3.93
2275	0.04679	0.13	2.46
2300	0.03917	0.09	-0.04
2325	0.03680	0.02	-0.01
2350	0.03475	0.01	0.01
2375	0.03303	-0.06	0.49
Total RMS		7.13	43.51
Mean error		0.51	3.11

분포는 포물선형의 경우는 식 (14) 및 (15)에 따라, 경계층형의 경우는 직선분포로 결정된다. 이와 같이 초기에 가정된 온도분포에서 앞서 2절에서 설명한 방법으로 온도를 계속적으로 변화시켜 나감으로써 최종적으로 각 좁은밴드에서 측정된 복사강도를 만족하는 온도분포로 수렴시킨다.

3.3 온도 역계산 결과

3.3.1 포물선형 온도분포

포물선형 온도분포에 대하여 지금까지 설명한 방법에 따라 온도 역계산을 적용하여 보았다. 복사강도의 측정치는 Table 1에 표시한 LBL 계산으로 대신하였으며 온도 역계산은 LBL 계산, WNB 및 SNB 모델을 사용하여 수행하였다. 온도 역계산으로 구한 온도분포는 Fig. 4와 같다.

LBL 계산을 사용하여 온도 역계산을 수행할 경우 좁은밴드 모델을 사용할 경우보다 계산시간이 약 100배 정도 소요되었다. 계산된 포물선형 온도분포는 온도 역계산에서 사용한 3개의 인자 T_0 , T_i 및 T_L 에 의하여 결정되며 이 값은

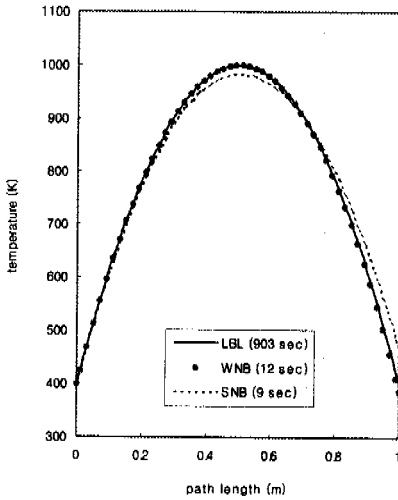


Fig. 4 Results of temperature inversion and computing time for the parabolic temperature profile

Table 3 The parametric temperatures obtained for the parabolic temperature profile

True temp.	T_0	T_i	T_L
400K	400K	1000K	400K
LBL (%)	400.0 (0.0)	999.9 (0.01)	400.0 (0.00)
WNB (%)	399.9 (0.02)	999.9 (0.01)	387.5 (3.14)
SNB (%)	401.7 (-0.42)	984.2 (-1.58)	462.7 (-15.6)

Table 3에 표시하였다. LBL 계산을 사용한 온도 역계산 결과로서 알 수 있는 것은 복사 모델링의 오차가 없고, 측정이 정확하고, 가정된 온도 분포 형태가 실제 분포와 일치하면 매질의 온도 분포를 오차없이 구할 수 있다는 것이다. 따라서 WNB 와 SNB 모델을 사용하였을 경우에 발생하는 Table 3의 오차는 밴드 모델링에 따른 오차인 것이 분명하다.

밴드 모델을 사용하여 역계산을 수행하였을 때 센서에 가까운 곳의 온도 T_0 는 밴드 모델에 상관없이 거의 400 K와 일치한다. 매질 중앙의 온도

T_i 의 경우 WNB 모델로 계산하면 1,000 K로 오차없이 구해지며, SNB 모델로 계산하면 984 K로 약 1.6%의 오차를 보인다.

그러나 센서에서 먼 쪽의 온도 T_L 의 경우는 상당히 큰 오차를 나타내는데 WNB 모델로 계산하면 388 K로 약 3.1%의 오차, SNB로 계산하면 463 K로 -15.6% 정도의 오차를 보인다. 이 같은 계산 결과는 앞서 수행한 오차 분석에서도 나타난 바와 같이 포물선형 온도분포의 경우에는 중앙의 높은 온도 영역이 측정의 장애로 작용하여 센서에서 먼 쪽의 온도에 대한 오차가 크게 나타나는 것이다. 실제의 온도 분포로부터 계산한 좁은밴드의 평균적 복사강도의 오차는 앞서 설명한 바와 같이 WNB의 경우는 0.25%, SNB의 경우는 2.04% 정도에 불과하지만, 이를 입력자료로 사용하여 역계산한 온도분포에서는 센서로부터 보아 고온 구역 너머의 저온 구역의 온도 예측에 오차가 집중되어 나타남을 알 수 있다.

3.3.2 경계층형 온도분포

포물선형 온도분포에서의 마찬가지로 경계층형 온도분포에 대하여 온도 역계산을 적용하여 보았다. 복사강도의 측정치는 Table 2에 표시한 LBL 계산으로 대신하였으며 이것을 입력값으로 사용하여 온도 역계산을 수행한결과 Fig. 5의 온도분포를 구하였다.

계산된 온도분포는 온도 역계산에서 사용한 3개의 인자 T_0 , T_i 및 T_L 에 의하여 결정되며 이 값은 Table 4에 표시하였다. 계산 결과로서 LBL 계산을 사용할 경우 포물선형과 마찬가지로 온도 분포를 오차없이 구할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

계산 결과로서 경계층형 온도분포에서는 SRS를 사용할 경우 좁은밴드 모델에 상관없이 매우 정확하게 매질의 온도를 측정할 수 있다는 것이다. 다만 SNB 모델을 사용하였을 때 매질 내부의 온도 T_i 가 약 9% 정도로 매우 큰 오차를 보이고 있는 것이 문제이다. 그 외의 온도에서는 모두 1% 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

SNB 모델을 사용할 경우에 매질내의 온도 T_i 의 오차가 특히 크게 생기는 이유는 Table 2에서 보았던 $2,225 \text{ cm}^{-1}$ 근처의 좁은밴드에서 나타난

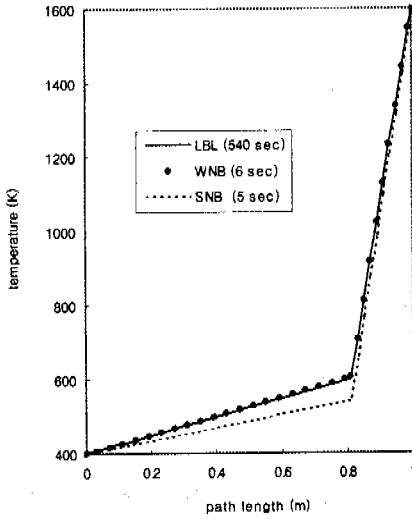


Fig. 5 Results of temperature inversion and computing time for the boundary layer type profile

Table 4 The parametric temperatures obtained for the boundary layer type profile

True temp.	T_0	T_i	T_L
	400K	600K	1600K
LBL	400.0	599.9	1600.0
(%)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
WNB	399.7	605.5	1600.3
(%)	(0.08)	(-0.92)	(-0.02)
SNB	401.5	544.9	1585.2
(%)	(-0.38)	(9.18)	(0.93)

비정상적으로 큰 복사강도 오차에 기인한 것으로 보인다. 왜냐하면 경계층형 온도분포에서 커널의 분포를 나타낸 Fig. 6을 보면 2,200 cm^{-1} 근처의 좁은밴드가 T_i 의 온도 결정에 있어서 가중치가 높기 때문이다.

즉, 이같은 좁은밴드들에서 공교롭게도 복사강도의 오차가 가장 큼으로 인해 SNB를 이용한 역계산에서 T_i 의 오차가 크게 나타나게 된 것이다. 반대로 복사강도의 오차가 매우 작은 2,150 cm^{-1} 근처의 좁은밴드는 T_L 의 온도 결정에 가중치가

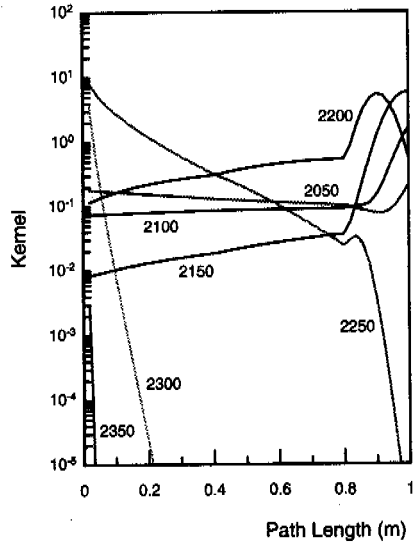


Fig. 6 Distribution of the kernel in the boundary layer type profile

높으며, 2,250 cm^{-1} 보다 큰 파수의 좁은밴드들은 T_0 의 온도 결정에 가중치가 높기 때문에 상대적으로 T_L 과 T_0 는 작은 오차를 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 이처럼 역계산에서는 좁은밴드 별로 복사강도의 오차가 어떻게 분포하는가에 따라 온도 역계산의 결과에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

포물선형과 경계층형 온도 분포를 대상으로 CO_2 4.3 μm 밴드에 속한 2,050 cm^{-1} 에서 2,375 cm^{-1} 사이의 14개 좁은밴드를 측정 파수로 선택하여 SRS의 온도 역계산을 수행하였다. 온도 역계산에 사용한 복사 계산은 LBL 계산, WNB 및 SNB의 좁은밴드 모델을 사용하여 수행되었다. 이때 각 좁은밴드별 복사강도의 측정치는 주어진 온도 분포에서 구한 LBL 계산 결과로 대신하였다. 포물선형 온도분포에서 LBL 계산을 사용할 경우 오차없이 온도를 역계산 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 좁은밴드 모델을 사용할 경우 발생하는 오차는 상당히 크게 나타나며, 특히 센서에서 먼쪽의 온도 T_L 의 오차가 SNB 모델을 사

용할 경우 16% 정도로 크게 발생하였다. 이것으로 온도 역계산시 좁은밴드 모델의 정확도가 절실히 요구됨을 알았으며 결론적으로 센서에서 보아 고온 가스 너머의 저온 가스의 온도 측정은 오차가 크다는 것을 알았다. 또한 모든 인수 온도에서 WNB 모델이 SNB 모델보다 온도 오차가 작음을 확인할 수 있었다. 경계층형 온도분포를 대상으로 수행한 연구 결과로서 알 수 있는 것은 SNB 모델을 사용할 경우에 매질내의 온도 T_i 의 오차가 예상보다 큰 것을 제외하고는 비교적 SRS를 이용한 온도 역계산이 만족한 결과를 보인다는 것이다. 온도 T_i 의 오차가 크게 나타나는 것을 줄이기 위해서는 온도 역계산에 사용되는 좁은모델의 복사강도 계산이 평균적으로 작은 오차를 가져야 하며 또한 온도의 가중치가 큰 좁은밴드에서 특별히 큰 오차를 보이지 않아야 한다. 따라서 포물선형과 경계층형 온도 분포를 대상으로 수행한 온도 역계산 결과로서 WNB 모델이 기존의 SNB 모델보다 SRS 연구에 적합하며 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 SRS의 기법을 입증하기 위하여 1차원 온도 분포를 가지는 매질에 우선적으로 적용하였으나 공학 문제에서 흔히 접하는 다차원 온도 분포에 대하여서도 곧바로 적용될 수 있는 것으로 판단된다. 이 때 시선 방향이외의 위치에서 입사되는 복사강도를 차단해줄 수 있도록 실험장치를 구성하는데 주위를 기우려야 하며 공간적으로 온도의 구배가 심할 경우 측정체적을 최소화함으로써 이에 대한 오차를 줄여야 한다. 또한 대부분의 연소가스에 포함되어 있는 여러 가지 배기 성분들과 매연 입자(soot)에 의한 오차도 최소화하는 것이 필요하다. 이와 같은 오차 요인을 적절히 고려하여 향후 실제의 연소 가스에 직접 적용할 경우 측정하고자 하는 매질의 온도 분포를 정확하게 구할 수 있는 유용한 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Hall, R.J. and Eckbreth, A.C., 1984, "CARS Application to Combustion Diagnostics," in *Laser Applications, Academic Press*
- (2) Penner, S.S., Wang, C.P. and Bahadori, M.Y., 1984, "Laser Diagnostics Applied to Combustion," *12th Symp. on Combustion*, pp. 1149~1176.
- (3) Cho, Z.H., 1974, "General Views on 3-D Image Reconstruction and Computerized Transverse Axial Tomography," *IEEE trans. on Nuclear Science*, Vol. Ns-21, pp. 44~71.
- (4) Ito, T. and Fujimura, S., 1995, "Simultaneous Measurement of Temperature and Absorption of Distributed Medium by Using Infrared Emission CT," *IEEE trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 44, No. 3, pp. 792~802.
- (5) 하광순, 1998, "2차원 데이터의 3차원 재구성 기법과 3차원 데이터의 2차원 영상화 기법을 이용한 연소진단 연구," 한국과학기술원 박사학위논문.
- (6) Chahine, M.T., 1968, "Determination of the Temperature Profile in an Atmosphere from its Outgoing Radiance," *J. Optical Society of America*, Vol. 58, pp. 1634~1638.
- (7) Smith, W.L., 1970, "Iterative Solution of the Radiative Transfer Equation for the Temperature and Absorbing Gas Profile of an Atmosphere," *Appl. Opt.*, Vol. 9, pp. 1993~1999.
- (8) Krakow, B., 1966, "Spectroscopic Temperature Profile Measurements in Inhomogeneous Hot Gases," *Appl. Opt.*, Vol. 5, pp. 201~209.
- (9) Cutting, R.D. and Stewart, I. McC., 1975, "Furnace Temperature Profiles: Measurements by Spectroscopic Methods," *Appl. Opt.*, Vol. 14, pp. 2707~2711.
- (10) Buchele, D.R., 1977, "Computer Program for Calculation of A Gas Temperature Profile by Infrared Emission-Absorption Spectroscopy," NASA TM-73848.
- (11) Hommert, P.J., Viskanta, R. and Mellor, A.M., 1977, "Flame Temperature Measurements by Spectral Remote Sensing," *Combustion and Flame*, Vol. 30, pp. 295~308.
- (12) Riviere, Ph., Scutaru, D., Soufiani, A. and Taine, J., 1994, "A New ck Data Base Suitable from 300 to 2500 K for Spectrally Correlated Radiative Transfer in CO₂-H₂O Transparent Gas Mixtures," *Proc. 10th Int. Heat Transfer Conference*, Vol. 2, Brighton, UK, pp. 129~134.
- (13) 양수석, 1999, "온도 역계산을 위한 CO₂ 4.3

μm 밴드의 복사 모델링 연구," 한국과학기술원 박사학위논문.

(14) Yang, S.S. and Song, T.H., 1999, "An Improved WSGGM-based Narrow Band Model for the CO₂ 4.3 μm band," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 38, pp. 228~238.

(15) Scutaru, D., Rosenmann, L. and Taine, J., 1994, "Approximate Intensities of CO₂ Hot Bands

at 2.7, 4.3, and 12 μm for High Temperature and Medium Resolution Applications," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 52, pp. 765~781.

(16) Yang, S.S. and Song, T.H., 1999, "Error Analysis of Spectral Remote Sensing by CO₂ 4.3 μm band in Various Temperature Profiles," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* (to appear).