

# 대기 중 CO<sub>2</sub> 전방사율 예측 모델 비교

변기홍\*

\*동국대학교기계로봇에너지공학과(khbyun@dongguk.edu)

## The Comparison of the Total Emissivity Model for CO<sub>2</sub> in Atmosphere

Byun, Ki-Hong\*

\*Dept. of Mechanical Robotics and Energy Engineering, Dongguk University(khbyun@dongguk.edu),

### Abstract

The effects of CO<sub>2</sub> ppm in atmosphere on the values of the total emissivity are studied. The predictions by several methods are compared. The predicted value differences between modified Kondratyev model and Hottel model are the smallest within the range of values tested. The CO<sub>2</sub> ppm is varied from 300 ppm to 600 ppm. By Wide Band model, the total emissivity increases with increasing density-path length product rather linearly up to 0.1 g/cm<sup>2</sup>. For given CO<sub>2</sub> ppm, the total emissivity increases as the air thickness increases. The same is true for both temperature and pressure increase. The temperature range tested is 220 to 300 K. Around 260K, the total emissivity is less sensitive with increasing temperature than with decreasing temperature. The pressure is varied from 0.94 to 1.06 atm. The percentage change of total emissivity with pressure change from 1atm is at most the percentage change of the pressure.

Keywords : 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 대기(Atmosphere), 분율(ppm), 와이드밴드모델(Wide Band model), 밀도-경로곱(density-path length product)

### 기 호 설 명

|   |                          |          |                                |
|---|--------------------------|----------|--------------------------------|
| E | : 방사능력 ( $W/m^2$ )       | T        | : 온도 (K)                       |
| L | : 길이 path length (cm, m) | $u_c$    | : 압력-경로 곱 (atm-cm)             |
| P | : 압력 (atm)               | $X_c$    | : 밀도-경로 곱 (g/cm <sup>2</sup> ) |
| R | : 특정기체상수 (kJ/kg · K)     | $\gamma$ | : 상수 (50 cm <sup>2</sup> /g)   |

투고일자 : 2011년 8월 23일, 심사일자 : 2011년 8월 24일, 게재확정일자 : 2011년 10월 21일  
교신저자 : 변기홍(khbyunr@dongguk.edu)

**하첨자**

- b : 흑체 (blackbody)
- c : CO<sub>2</sub>
- stp : 표준대기조건

**Greek**

- $\kappa$  : 흡수계수 ( $cm^{-1}, m^{-1}$ )
- $\lambda$  : 파장 ( $\mu m, cm$ )
- $\sigma$  : 스테판볼츠만상수 ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 - K^4$ )

**1. 서 론**

세계 각국의 산업화로 인해 대기 중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 농도는 지속적으로 증가하고 있다. 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도는 1960년대의 300ppm에서, 2011년에는 약 380 ppm 정도로 증가했다. 2011년 경 예측된 증가 추세는 매년 1.5ppm 정도이다<sup>1)</sup>.

대기 중의 대표적 온실가스 중의 하나인 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하면 지구 온난화를 가속화하여, 많은 재해를 가져오리라 예측하고 있다. 대기 중 온실가스를 감축하기 위해서 이의 발생을 저감하거나 포집하려는 노력들이 직접 간접적으로 진행되어 오고 있다. 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 기상에 미치는 영향과 대기온도 분포에 미치는 영향을 고려하려면 CO<sub>2</sub> 방사율 값을 알아야 한다. 또한 등가하늘 온도 예측을 위해서도 필요하다<sup>2)</sup>.

이 연구의 목표는 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 CO<sub>2</sub>의 방사율에 미치는 영향을 모델을 사용해서 예측하는 것이다. 이를 위해 여러 공학 및 대기 과학에서 사용되는 모델들을 이용해서 CO<sub>2</sub>의 방사율을 계산한 후, 결과들을 비교했다. 그리고 이들 중 적절한 모델을 선정해서 대기압력 및 대기온도가 CO<sub>2</sub>의 방사율에 미치는 영향을 예측했다. 대기는 공기와 CO<sub>2</sub>만으로 구성되었으며, CO<sub>2</sub>와 대기 모두 이상기체라고 가정한다.

**2. CO<sub>2</sub> 방사율 모델**

CO<sub>2</sub> 방사율 모델은 회체가스 모델과, 흡수밴드에서의 흡수계수 및 전방사율 (total emissivity)에 대한 측정 실험결과, 실험 결과를 흡수밴드에서 모델링한 결과들이 있다. Bliss<sup>3)</sup>와 Kondrat'yev 모델<sup>4,5)</sup>은 회체가스(gray gas) 모델이다. Hottel<sup>3)</sup>은 전방사율을 측정 한 실험결과를 발표했다. Ludwig<sup>6)</sup>와 Edward<sup>7)</sup> 밴드 모델은 흡수밴드에서 측정 한 실험결과를, 몇 개의 CO<sub>2</sub> 흡수 밴드에 대해 정리한 것이다. 그 외 구체적인 흡수선(absorption line) 등을 고려한 실험결과 및 모델들이 있다. Kondrat'yev 모델과 Bliss의 모델은 대기 과학자들이, 그 외의 다른 모델들은 공학자들이 고온 연소 가스의 CO<sub>2</sub> 방사율 들을 예측하기 위해 사용했다.

전 방사율(total emissivity)의 정의는 식(1)과 같다.  $T$ 는 절대온도,  $\kappa_\lambda$ 는 파장당 흡수계수,  $L$ 은 두께 또는 경로,  $E_{b\lambda}$ 는 흑체의 파장당 방사능력 (spectral emissive power),  $\lambda$ 는 파장,  $\sigma$ 는 스테판 볼츠만 상수이다.

$$\epsilon_c = \int_0^\infty (1 - e^{-\kappa_\lambda L}) E_{b\lambda} d\lambda / \sigma T^4 \quad (1)$$

CO<sub>2</sub> ppm은 CO<sub>2</sub>의 대기 중 몰분율이며 체적분율이란 용어도 사용되고 있다. 대기압력  $P$ , CO<sub>2</sub>의 분압  $P_c$ 과 사이에 다음식이 성립한다.

$$P_c = P \times (CO_2 ppm \times 10^{-6}) \quad (2)$$

CO<sub>2</sub>의 대기 중 질량 믹싱레이쇼 (mass mixing ratio)는 (대기 중의 CO<sub>2</sub>의 질량)/(대기 중 공기의 질량)으로 정의된다.

**2.1 Bliss 모델**

이산화탄소의 전방사율에 대해 Bliss<sup>3)</sup>가

사용한 모델 식은 다음과 같다. CO<sub>2</sub>의 흡수 밴드 중 13μm ~ 17μm 밴드만 고려했다. 식 (3)과 (4)에서 하첨자 c는 CO<sub>2</sub>를 의미한다.

$$\epsilon_c = 0.185(1 - e^{-\gamma X_c}) \quad (3)$$

$$X_c = \rho_c L = \frac{P_c L}{R_c T} \quad (4)$$

상수  $\gamma=50$  [cm<sup>2</sup>/g]이고,  $X_c$  [g/cm<sup>2</sup>]는 밀도-경로 의 곱이며,  $\rho_c$ 는 이산화탄소의 밀도 이고,  $L$ 은 대기층의 두께이다. Bliss의 모델은 회체가스모델이다.

### 2.2 Atwater 모델

Atwater 등<sup>4)</sup>이 등가 하늘 온도 예측에 사용한 이산화탄소의 방사율 모델은 식(5)이다. 식(5)는 Shekhter가 개발한 원래 식을 Kondrat'yev<sup>5)</sup>가 수정한 식이다<sup>4)</sup>.

식(5)에 Bliss<sup>3)</sup>의 계수를 도입하면 식(6)이 된다. 식(6)을 수정된 Kondrat'yev 모델이라 이 논문에서 부르기로 한다.

$$\epsilon_c = 1 - e^{-0.3919 u_c^{0.4}}, \quad u_c = P_c L (\text{atm-cm}) \quad (5)$$

$$\epsilon_c = 0.185(1 - e^{-0.3919 u_c^{0.4}}) \quad (6)$$

식(6)은 적외선 영역에 있는 CO<sub>2</sub> 흡수 밴드의 특성을 고려해서 유도한 전방사율식이다. 압력-경로 곱  $u_c$  [atm-cm]는 CO<sub>2</sub>의 분압(atm)  $P_c$ 와 대기 층의 두께  $L$ 과의 곱이다. 이 식 유도에 사용된 온도범위는 220K에서 300K 사이이다<sup>4)</sup>. 이 모델 또한 회체가스 모델이다.

### 2.3 Hottel 모델

Hottel 등<sup>3)</sup>은 이산화탄소의 전 방사율을

실험으로 측정했으며, 이를 그림 또는 도표 등으로 발표했다. 최저 실험온도는 20℃이다. 이들 중 Bliss<sup>3)</sup>에 의해 인용된 결과만 이 논문에서 사용했다.

### 2.4 Ludwig 모델

Ludwig 등<sup>6)</sup>은 Narrow Band에서의 실험과 모델링을 통해서 CO<sub>2</sub>의 주요 흡수밴드에서 파장당 흡수계수 값을 도표로 발표했다. 측정 온도 및 압력 조건은 300K, 1atm이다. SLG(single line group) 모델이 사용되었다. 15μm 밴드 (500cm<sup>-1</sup> ~ 880cm<sup>-1</sup>), 4.3μm 밴드 (1900cm<sup>-1</sup> ~ 2395cm<sup>-1</sup>), 2.7μm 밴드 (3000cm<sup>-1</sup> ~ 3770cm<sup>-1</sup>)에서의 파장당 흡수계수가 도표에 온도별로 발표되어 있다<sup>6)</sup>. 도표에 수록된 최저 온도는 300K이다.

이 논문에서는 위의 도표에 수록된 파장당 흡수계수와 식(1)을 사용해서 CO<sub>2</sub>의 전방사율을 값을 예측했다. CO<sub>2</sub> 층의 두께가 온도와 압력에 따라 증감하는 것을 이상기체사이의 관계식인 식(7)을 사용해서 고려했다.

$$\Delta L = \Delta L_{stp} \left( \frac{273}{T} \right) \left( \frac{P}{1 \text{atm}} \right) \quad (7)$$

이 논문에서의 온도 조건은 도표에 수록된 최저온도 300K 보다 저온이므로, 외삽을 한 경우가 되어 내삽의 경우에 비해 상대적으로 부정확할 가능성도 있다. 2.7μm 이상이 되는 파장 대에 포함된 전체 흑체에너지는 300K에서도 99.998% 이므로 이 보다 저온에서는 100%라 가정할 수 있다.

### 2.5 Wide Band 모델

Edward 등<sup>7)</sup>이 제시한 Wide Band 모델을 사용해서 CO<sub>2</sub>의 전방사율을 계산할 수 있다. CO<sub>2</sub>의 15μm, 10.4μm, 9.4μm, 4.3μm, 2.7μm, 2.0μm 흡수 밴드가 고려되었다. 이 모델의 3가지 주요변수는 밴드폭, 흡수선폭/

흡수선간격 파라미터, 흡수밴드의 세기이며 이 값들이 표 및 식으로 발표되어 있다<sup>7)</sup>. 이 데이터와 식(1)을 사용해서 전방사율 값을 계산했다. 이 논문에서 사용된 방법 중 상대적으로 가장 많은 시간과 노력이 요구되는 계산 과정이다.

2.0 $\mu\text{m}$  이상이 되는 파장 대에 포함된 전체 흑체에너지는 300K에서도 99.999% 이므로, 이 보다 저온에서는 100%라 가정할 수 있다.

### 3. 모델 결과 비교

CO<sub>2</sub> 농도는 300 ppm에서 600 ppm, 대기온도는 약 220K에서 300K 이고, 대기 압력은 0.94 atm에서 1.06 atm 의 범위에서 변수 값을 변동시키면서 이 변수들이 CO<sub>2</sub>의 전방사율에 미치는 영향에 대한 결과들이 그림 1~4에 제시되어 있다.

그림 1에는 2장에서 서술된 5가지 모델들을 사용해서 예측한 CO<sub>2</sub>의 전방사율 값 들을 비교했다. x축은 밀도-경로의 곱  $X_c$  이고, y축은 CO<sub>2</sub>의 전방사율 값이다. 사용된 조건은 CO<sub>2</sub> 300ppm, 전압력 1atm 온도는 293K 이다. 수정 Kondratyev 모델은 Hottel의 모델과 최대 6% 오차 내에서 잘 일치하고 있고, Edward 의 Wide Band 모델 기준 대비 12%에서 24% 범위의 오차를 그림1에 발표된  $X_c$ 의

범위에서 보이고 있다. Bliss 모델 값과 Hottel 모델 값은 참고문헌[3]에 발표된 식 및 결과를 이 논문에서 그대로 인용 한 것이다.  $X_c$  값이 증가함에 따라 Bliss 의 모델을 제외한 나머지 모델에 의해 예측된 결과 들은 대체로 선형적으로 증가하고 있다.

전압력 1atm, 온도 293K, CO<sub>2</sub> 300ppm 에서  $X_c=0.002, 0.01, 0.1 [g/cm^2]$ 에 대응하는 대기층의 두께는 각각  $L = 36.4, 182.2, 1822$  m이다. 이에 대응하는 CO<sub>2</sub>의 분압-경로 곱  $u_c = P_c L$  는 단위  $[atm-cm]$ 로 각각 1.09, 5.47, 54.7 이다.

그림 2에는 CO<sub>2</sub> ppm 이 전방사율에 미치는 영향이 300ppm, 380ppm, 600ppm에서 발표되어 있다. 전압력은 1atm, 기체의 온도는 293K 이다. x축은 대기층의 두께  $L$ 이고 y축은 CO<sub>2</sub> 전방사율 값이다. 대기층의 두께가 일정한 조건에서 ppm 이 증가할수록 전방사율은 증가하고 있다. CO<sub>2</sub> ppm 이 일정한 조건에서 대기층의 두께가 증가할수록 전방사율은 증가하고 있다.

Wide band 모델 결과에서, 대기층의 높이가 1m 인 경우, CO<sub>2</sub> ppm 증분에 따른 전방사율 증분은 적으나, 대기층의 두께가 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> ppm 증분에 따른 전방사율 증분은 증가하고 있다.

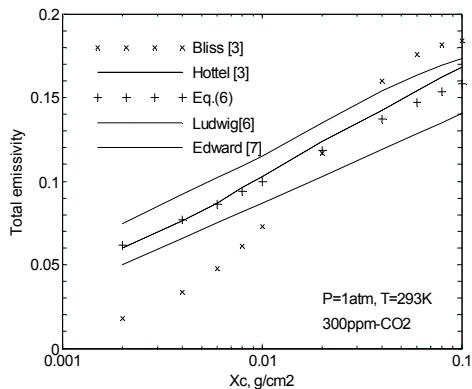


그림 1.  $X_c = \rho_c L$  의 영향

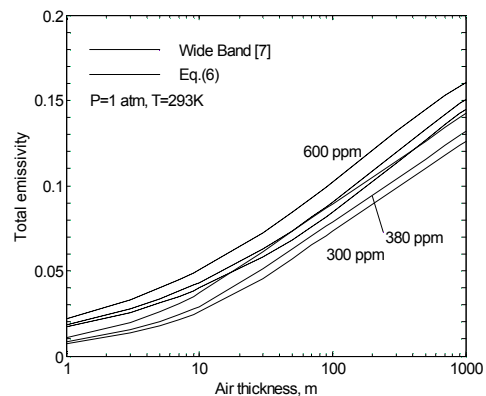


그림 2. CO<sub>2</sub> ppm 의 영향

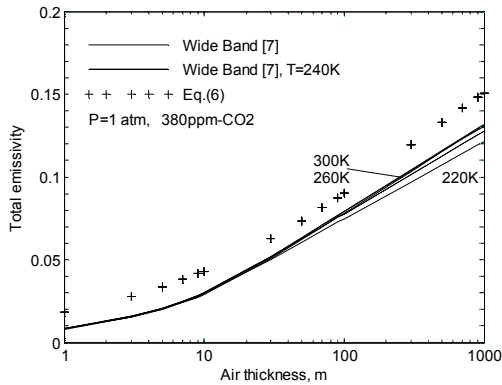


그림 3. 대기온도 의 영향

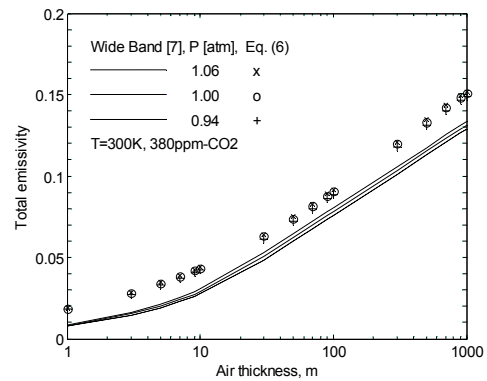


그림 4. 대기압의 영향

그림3은 대기온도가 CO<sub>2</sub> 방사율에 미치는 영향에 대한 결과이다. 대기의 전압력은 1atm 이고, CO<sub>2</sub>의 농도는 380ppm 이다. x축은 대기층의 두께  $L$ 이고, y축은 CO<sub>2</sub>의 전방사율 값이다. 그림1에 제시된 결과를 보면 수정 Kondrat'yev 모델은 300ppm, 220K에서 300K 온도 범위에서 전방사율을 잘 대표하고 있다.

실선은 220K의 경우이고, 점선이 240K 그리고 그 위 실선이 260K에 대한 결과이다. 그림에서 260K와 300K에 대한 결과는 거의 일치되어 보인다. 대기층의 두께가 약 30m 이하에서는 대기온도 변화에 따른 전방사율의 변화는 거의 없다. 대기층의 두께가 약 30m 보다 크고, 온도범위 220K에서 260K에서는, 두께가 증가할수록 온도 증분에 따른 전방사율 증분이 증가하고 있다. 그러나 대기층의 두께가 약 30m 보다 큰 경우에도 온도 범위 260K에서 300K에서는 전방사율은 온도에 따라 거의 변하지 않는다.

두 모델 결과 사이의 편차는 조건 380ppm에 비해 300 ppm에서는 증가되어 있고, 600ppm에서는 감소되어 있으나, 그림3에서와 같은 경향을 보이므로 결과 발표를 생략한다. 그림 3의 조건에서도 수정 Kondrat'yev 모델 식은 잘 일치하고 있고, 따라서, 이식은 CO<sub>2</sub>의 농도 범위 300~600 ppm, 온도범위 220~300 K에서도 CO<sub>2</sub>

전방사율을 간단한 회체의 식으로 잘 표현하고 있다. CO<sub>2</sub> 380ppm, 대기의 전압력 1 atm, 온도 300K에서, 대기층의 두께 1m, 10, 100, 1000m에 대응하는 CO<sub>2</sub> 밀도 경로 곱  $X_c$ 는 각각 0.00679, 0.0679, 0.679, 6.79  $[g/cm^2]$ 이다.

그림 4는 대기 압력이 CO<sub>2</sub> 전방사율에 미치는 영향을 예측한 결과이다. 대기 온도는 300K이고, CO<sub>2</sub>의 농도는 380ppm 이다. x축은 대기층의 두께  $L$ 이고, y축은 CO<sub>2</sub> 전방사율 값이다. 압력이 증가하는 순서로, 점선, 실선, 쇠선은 Wide Band 모델에 의한 결과이고, +, o, x 기호는 수정 Kondrat'yev 모델에 의한 결과이다. 주어진 압력 범위에서 압력 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 전방사율의 변화량은 작다. 대기층의 두께가 10m 보다 큰 경우, 층의 두께가 일정한 조건에서는 압력이 증가할수록 전방사율은 증가하고 있다. 그러나 1atm 기준 상대편차는  $L=1m$ 에서  $\pm 5.4\%$ 로 최대이며,  $L$ 이 증가할수록 감소하여,  $L=1000m$ 에서는  $\pm 1.8\%$ 이다.

대기온도 220K 인 조건에서도 비슷한 경향을 보인다. 따라서, 수정 Kondrat'yev의 식은 압력 범위 0.94~1.06 atm에서도 CO<sub>2</sub> 전방사율을 간단한 회체의 식으로 잘 표현하고 있다.

대기온도 220K에서 전방사율 예측 값을 압력 0.94, 1, 1.06 atm 순서로의 나열하면 대기층의 두께 1m 인 경우 0.0080, 0.0085, 0.0089

이고, 100m에서 0.073, 0.075, 0.077 이며, 1000m에서는 0.119, 0.121, 0.124 이다.

#### 4. 결 론

대기 중 이산화탄소의 전방사율을 예측하기 위해 5가지 모델들이 비교 검토되었다. CO<sub>2</sub> 300~600 ppm, 대기온도 220~300K 이고, 대기 압력 0.94~1.06 atm 의 범위에서 이 변수들이 전방사율에 미치는 영향에 대한 결과가 본문에 발표되었으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 이 논문에서 제안된 회계 모델인 수정 Kondratyev 식에 의한 CO<sub>2</sub> 전방사율 값은 Hottel 모델 예측값과 비교적 잘 일치했다.
- (2) CO<sub>2</sub> ppm 과 대기층의 두께의 곱이 증가할수록 전방사율은 증가했다. 그러나 대기층의 두께가 얇은 경우 CO<sub>2</sub> ppm 의 영향은 작았다.
- (3) 대기층의 두께가 일정한 조건에서 온도가 증가할수록 전방사율은 증가했다. 220~260K 구간에서 온도변화에 따른 전방사율 변화는 260~300K 구간에서 보다 크다. 그러나 층의 두께가 1m 이하에서 대기온도의 영향은 작았다.
- (4) 대기층의 두께가 증가할수록 압력 변화에 의한 전방사율의 절대 편차는 증가했으나, 대기압기준 %상대편차의 크기는 감소했으며, %압력상대편차보다 작았다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 동국대학교 연구년 지원에 의해서 이루어 졌으며, 저자는 동국대학교 와 The U. of Iowa 의 지원 대해서 감사드린다.

#### 참 고 문 헌

1. Archer, D., Global Warming, Blackwell Publishing Co., 2007.

2. 번기홍, 오산시의 맑은날 하절기 증가 하늘 온도 예측, 한국태양에너지학회 논문집, 제 30권, 제 5호, pp. 100 106, 2010.
3. Bliss, R. W., "Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers," Solar Energy, Vol. 5, No. 3, pp 103-120, 1961.
4. Atwater, M. A. and Ball, J. T., "Computation of IR Sky Temperature and Comparison with Surface Temperature," Solar Energy, Vol. 21, pp. 211-216, 1978.
5. Kondrat'yev, K., Radiation in the Atmosphere, Academic Press, New York, 1969.
6. Ludwig, C. B., Malkmus, W., Reardon, J. E., and Thomson, J. A. L., Handbook of Infrared Radiation From Combustion Gases, NASA SP-3080, Washington, 1973.
7. Edward, D. K., "Molecular Gas Band Radiation," Advances in Heat Transfer, Vol. 12, pp. 115-193, 1976.