<論 文>

燃燒氣體의 放射率 計算模型에 관한 硏究

許 昞 琪* · 李 靑 鍾** · 楊 枝 元**

(1987年 7月 20日 接受)

A Study on the Calculation Model for Emissivities of Combustion Gases

Byung Ki Hur, Cheong Jong Lee and Jiwon Yang

Key Words: Thermal Radiation of Non-Luminous Gas(不輝性 氣體의 熱輻射), Emissivity of Gray Gas(灰色氣體의 輻射率), Radiation Pathlength(輻射經路 길이), Absorption Property of Gray Gas(灰色氣體의 吸收特性值), Radiation Intensity (輻射强度)

Abstract

The main mode of heat transfer of combustion gases at high temperature is thermal radiation of nonluminous gases, CO_2 and H_2O. Therefore the information of the emissivities of CO_2 and H_2O would be very important in the thermal performance analysis of furnace. In this study, an exponential model for the emissivities of CO_2 and H_2O was derived as function of P_gL and polynomial of reciprocal of temperature. That is,

$$\epsilon_g=\sum_{i=1}^{k}\left[\sum_{j=0}^{n}\frac{\gamma_{i,j}}{T^j}\right][1-e^{-k_iP_gL}]$$

Error analysis between the calculated values from present model and the values of Hottel Chart was performed over temperature range of 1000～5000 R and a partial-pressure-length product range of 0.003 to 20 ft-atm.

For CO_2 gray gas, the error percent between the calculated values and the values from Hottel Chart was distributed within 2.5% in case of using a polynomial in $1/T$ of degree 4. For H_2O gray gas, the model has an error range of 0 to 2.5% in case of using a polynomial in $1/T$ of degree 3.

1. 序 論

化石燃料를 에너지 源으로 사용하는 內燃機關 및 外燃機關은 燃料의 燃燒 時에 생성되는 高溫 燃燒氣體의 熱 에너지를 이용한다. 이 경우 高溫 燃燒氣體에 의한 熱傳達은 주로 輻射 熱傳達에 의하여 이루어진다. 특히 化石燃料는 重量으로 90% 이상이 炭素와 水素로 구성되어 있기 때문에 化石燃料의 燃燒氣體에 의한 輻射는 주로 二酸化炭素와 水蒸氣의 不輝性 輻射에 의하여 일어난다. 따라서 燃燒機關의 機何學的 構造設

* 正會員, 仁荷大學校 工科大學 生物工學科
** 正會員, 韓國重工業(株) 보일러設計室
*** 正會員, 韓國科學技術大學 化學工程工學科

計는 물론 熱性能設計를 효율적으로 수행하기 위해서는 二酸化炭素 및 水蒸氣의 放射率을 정확히 알아야 한다.

Hottel 등은 CO_2 및 H_2O 의 放射率에 대한 測定資料를 理論的으로 보완하여 CO_2 및 H_2O 의 放射率을 온도, 輻射經路길이 및 分壓의 函數로 圖式化하였으며, 이 圖表는 輻射熱傳達의 設計 및 解析에 가장 널리 사용되고 있다[1,2]. 燃燒裝置의 構造가 복잡하고 燃燒地域에서의 온도가 높은 경우에는 이 裝置의 熱性能解析, 材質選定을 위하여 燃燒地域 各 部分에서의 溫度分布 및 熱傳達 現象을 규명하여야 한다. 이런 경우 燃燒氣體의 放射率을 구하기 위하여 Hottel 圖表를 이용한다는 것은 시간적 또는 경제적 측면에서 대단히 非效率的이다. 따라서 연구자들은 다음 식 (1)과 같이 燃燒氣體의 放射率을 灰色氣體의 吸收特性值의 指數函數로 유도하여 輻射熱傳達解析에 이용하고 있다[3,7].

$$\epsilon_g=\sum_{i=1}^{M} a_i(1-e^{-k_iP_gL}) \tag{1}$$

윗 식에서 M은 灰色氣體의 總 數를 나타내며, a_i는 吸收係數가 k_i인 灰色氣體가 존재하는 스펙트럼 領域에서의 에너지 分量인 加重值를, P_g는 分壓, L은 輻射經路길이를 나타내고 있다.

本 硏究에서는 CO_2 및 H_2O 의 放射率을 吸收特性值와 絶對溫度 逆數의 函數로 유도함으로써 기존의 放射率計算模型을 보다 一般化시켰을 뿐만아니라 實測值와 計算值 사이의 오차를 기존 模型의 결과보다 훨씬 감소시켰다.

2. 燃燒氣體의 放射率 計算模型

燃料의 燃燒 時에 주로 생성되는 CO_2와 H_2O는 輻射에너지를 吸收하기도 하고 放出하기도 한다. 따라서 輻射에너지가 CO_2 및 H_2O 의 氣體層을 통과하게 되면 輻射强度는 산란을 무시하면 다음 식과 같이 감소하게 된다[1,2].

$$-\frac{dI_\lambda}{dx}=k_\lambda' I_\lambda \tag{2}$$

윗 식에서,

I_λ=파장이 λ인 전자기파의 輻射强度

x=灰色氣體層의 두께

k'_λ=灰色氣體의 吸收係數

吸收係數는 氣體의 分壓에 비례하므로[1,2] 윗 식을 分壓의 函數로 표현하면 다음 식과 같이 된다.

$$-\frac{dI_\lambda}{dx}=k_\lambda P_g I_\lambda \tag{3}$$

파장이 λ인 전자기파가 임의의 灰色氣體層 L을 통과했을 때의 輻射强度를 식 (3)으로부터 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$I_{L\lambda}=I_{0,\lambda}\, e^{-k_\lambda P_g L} \tag{3-a}$$

윗 식에서,

$I_{0,\lambda}$=灰色氣體層을 통과하기 전에 파장 λ인 전자기파가 나타내는 輻射强度

$I_{L,\lambda}$=두께 L인 灰色氣體層을 통과한 후에 파장 λ인 전자기파가 나타내는 輻射强度

L=灰色氣體層의 두께

국소적 열역학적 평형상태에서 灰色氣體는 吸收한 輻射量에 상당하는 量을 다시 放射한다. 따라서 氣體層이 L인 灰色氣體의 輻射量은 다음 식으로 표현된다.

$$W_\lambda=I_{0,\lambda}-I_{L,\lambda} \tag{4}$$

어느 灰色氣體를 막론하고 파장이 유일한 輻射에너지를 放出하는 경우는 대단히 드물다. 윗 식을 파장 $\lambda=0$ 에서부터 파장 $\lambda=\infty$ 까지 적분하므로써 임의의 灰色氣體의 總輻射量을 산출할 수 있다.

$$W_g=\int_0^\infty W_\lambda d\lambda=\int_0^\infty (I_{0,\lambda}-I_{L,\lambda})d\lambda$$

$$=\int_0^\infty I_{0,\lambda}(1-e^{-k_\lambda P_g L})d\lambda \tag{5}$$

灰色氣體의 放射率은 다음 식과 같이 黑體의 放射量에 대한 灰色氣體의 放射量의 比로 정의된다.

$$\epsilon_g=\frac{W_g}{W_b}=\frac{\int_0^\infty I_{0,\lambda}(1-e^{-k_\lambda P_g L})d\lambda}{\sigma T^4} \tag{6}$$

Planck 법칙에 의하면 식 (6)의 $I_{0,\lambda}$는 다음 식으로 주어진다.

$$I_{0,\lambda}=\frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{e^{hc/k\lambda T}-1} \tag{7}$$

윗 식에서,

h=Planck 상수

c=빛의 속도

λ=파장

k=Boltzmann 상수

T=절대온도

식 (7)을 식 (6)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_g=\frac{1}{\sigma T^4}\int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{hc/k\lambda T}-1)}(1-e^{-k_\lambda P_g L})d\lambda \tag{8}$$

變數 V를 다음 식과 같이 정리하면,

$$V=\frac{hc}{k\lambda T} \tag{9}$$

식 (8)은 다음 식 (10)으로 표시된다.

$$\epsilon_g=\frac{15}{\pi^4}\int_0^\infty \frac{V^3}{e^V-1}(1-e^{-k_\lambda P_g L})dV \tag{10}$$

기체가 輻射 에너지를 放出할 경우 모든 파장의 에너지를 放出하는 것이 아니라 不連續的인 파장의 에너지를 放出한다. 따라서 식 (10)은 다음 식과 같이 輻射에너지를 放出하는 파장들에 의한 적분으로 변하게 된다.

$$\epsilon_g=\frac{15}{\pi^4}\int_0^\infty\frac{V^3}{e^V-1}(1-e^{-k\lambda P_gL})dV$$
$$=\frac{15}{\pi^4}\alpha_1(1-e^{-k_1P_gL})\int_{\beta_1}^{\bar{\beta}_1}\frac{V^3}{e^V-1}dV+\frac{15}{\pi^4}\alpha_2\cdot(1-e^{-k_2P_gL})\int_{\beta_2}^{\bar{\beta}_2}\frac{V^3}{e^V-1}dV$$
$$+\frac{15}{\pi^4}\alpha_3(1-e^{-k_3P_gL})\int_{\beta_3}^{\bar{\beta}_3}\frac{V^3}{e^V-1}dV+\cdots \qquad (11)$$

Pivovonsky[8]와 Wiebelt[9]는 黑體 및 灰色體의 파장에 따른 輻射에너지量의 分布로 부터 總輻射量에 대한 임의의 파장의 輻射에너지量의 분율을 다음 식으로 유도하였다.

$$F_{0-\lambda T}=\frac{15}{\pi^4}\sum_{m=1}\frac{e^{-mV}}{m^4}\{[mV+3)mV+6]mV+6\},\quad V\geq2 \qquad (12\text{-a})$$

$$F_{0-\lambda T}=1-\frac{15}{\pi^4}V^3\left[\frac{1}{3}-\frac{V}{8}+\frac{V^2}{60}-\frac{V^4}{5040}+\frac{V^6}{272,160}-\frac{V^8}{13,305,600}\right],\quad V<2 \qquad (12\text{-b})$$

윗 식에서,

$F_{0-\lambda T}$=온도 T에서 總輻射 에너지量에 대한 0에서 λ 파장까지 사이에 輻射 에너지 分量

식 (12-a)의 指數函數를 V에 대한 Taylor의 冪級數로 전개하고 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$F_{0-\lambda T}=\frac{15}{\pi^4}\sum_{m=1}\left(\frac{1}{m^4}+\frac{V}{m^2}+\frac{1}{2}V^2+\cdots\right)\cdot[(m^2V^2+3mV+6)mV+6] \qquad (13)$$

식 (12-b)와 식 (13)으로부터 總輻射 에너지 量에 대한 임의의 파장의 輻射 에너지 量의 分率을 다음 식으로 一般化할 수 있다.

$$F_{0-\lambda T}=\frac{15}{\pi^4}[C_0+C_1V+C_2V^2+\cdots+C_nV^n]$$
$$=\frac{15}{\pi^4}\left[\bar{C}_0+\frac{\bar{C}_1}{T}+\frac{\bar{C}_2}{T^2}+\cdots+\frac{\bar{C}_n}{T^n}\right] \qquad (14)$$

식 (11)과 식 (14)를 조합하면 β_i와 $\bar{\beta}_i$ 파장 사이의 전자기 파가 방출하는 輻射 에너지 分率은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{15}{\pi^4}\alpha_i(1-e^{-k_iP_gL})\int_{\beta_i}^{\bar{\beta}_i}\frac{V^3}{e^V-1}dV=b[F_{0-\beta_iT}-F_{0-\beta_iT}]$$
$$=\frac{15}{\pi^4}\left[\bar{a}_0+\frac{\bar{a}_1}{T}+\frac{\bar{a}_2}{T^2}+\cdots+\frac{\bar{a}_n}{T^n}\right] \qquad (15)$$

윗 식에서 指數函數는 P_gL만의 函數인 반면 V의 적분함수는 온도만의 함수이다. 따라서 윗 식으로부터 적분함수를 다시 정리하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{15}{\pi^4}\alpha_i\int_{\beta_i}^{\bar{\beta}_i}\frac{V^3}{e^V-1}dV=a_i=\left[\gamma_0+\frac{\gamma_1}{T}+\frac{\gamma_2}{T^2}+\cdots+\frac{\gamma_n}{T^n}\right] \qquad (16)$$

식 (16)을 식 (11)에 대입하면 灰色氣體의 輻射率은 다음 식으로 유도된다.

$$\epsilon_g=\sum_{i=1}^{k}a_i(1-e^{-k_iP_gL})$$
$$=\sum_{i=1}^{k}\left[\sum_{j=0}^{n}\frac{\gamma_{ij}}{T^j}\right][1-e^{-k_iP_gL}] \qquad (17)$$

3. 係數 γ_{ij}의 計算過程

일정한 온도 T에서 P_gL에 따른 係數 a_i를 구하기 위하여 식 (17)을 다음과 같이 변형시켰다.

$$\epsilon_g=\sum_{i=1}^{k}a_iX_i \qquad (18)$$

윗 식에서,

$X_i=1-e^{-k_iP_gL}$

일정한 온도 T에서 P_gL의 변화에 따른 a_i의 값을 구하기 위하여 식 (18)을 最小自乘法으로 변형시키면 다음과 같은 일차 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$a_1(T)\sum_{k=1}^{N}(X_{1j})^2+a_2(T)\sum_{j=1}^{N}X_{1j}X_{2j}+\cdots+a_n(T)\sum_{j=1}^{N}X_{1j}X_{nj}=\sum_{j=1}^{N}\epsilon_jX_{1j}$$
$$a_1(T)\sum_{j=1}^{N}X_{1j}X_{2j}+a_2(T)\sum_{j=1}^{N}(X_{2j})^2+\cdots+a_n(T)\sum_{j=1}^{N}X_{2j}X_{nj}=\sum_{j=1}^{N}\epsilon_jX_{2j} \qquad (19)$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$a_1(T)\sum_{j=1}^{N}X_{1j}X_{nj}+a_2(T)\sum_{j=1}^{N}X_{2j}X_{nj}+\cdots+a_n(T)\sum_{j=1}^{N}(X_{nj})^2=\sum_{j=1}^{N}\epsilon_jX_{nj}$$

위의 연립방정식에서,

$X_{ij}=1-e^{-k_j(P_gL)_j}$

$\epsilon_j=(P_gL)_j$에서의 灰色氣體 放射率

위의 연립 방정식에서 $a_1, a_2, \cdots a_n$을 구하기 위하여 吸收係數 k_i의 값은 문헌 (3)에서 구한 값을 이용하였으며, 放射率 ϵ_j의 값은 참고문헌 (2)의 Hottel 圖表의 값을 이용하였다.

灰色氣體의 온도를 1000°R에서 시작하여 250°R 씩 증가시키면서 5000°R에 도달할 때까지 각 온도에서 연립 방정식 (19)를 풀면 임의의 온도 T_k에서의 a_i값 $a_i(T_k)$를 구할 수 있게 된다. 구하여진 값으로 부터 식 (17)의 溫度函數의 상수 γ_{ij}를 구하기 위하여 식 (17)의 온도함수와 $a_i(T_k)$의 값으로부터 最小自乘法을 이용하면 다음 식을 얻을 수 있게 된다.

$$\gamma_{i0}\sum_{k=1}^{l}(Y_{1k})^2+\gamma_{i1}\sum_{k=1}^{l}Y_{1k}Y_{2k}+\cdots$$
$$+\gamma_{i(n-1)}\sum_{k=1}^{l}Y_{1k}Y_{(n-1)k}=\sum_{k=1}^{l}a_i(T_k)Y_{0l}$$
$$\gamma_{i0}\sum_{k=1}^{l}Y_{1k}Y_{2k}+\gamma_{i1}\sum_{k=1}^{l}(Y_{2k})^2+\cdots$$
$$+\gamma_{i(n-1)}\sum_{k=1}^{l}Y_{2k}{}^{=}{}_{(n-1)k}=\sum_{k=1}^{l}a_i(T_k)Y_{1l} \quad (20)$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\gamma_{i0}\sum_{k=1}^{l}Y_{1k}Y_{(n-1)k}+\gamma_{i1}\sum_{k=1}^{l}Y_{2k}Y_{(n-1)k}+\cdots$$
$$+\gamma_{i(n-1)}\sum_{k=1}^{l}[Y_{(n-1)k}]^2=\sum_{k=1}^{l}a_i(T_k)Y_{(n-1)k}$$

윗 식에서,

$$Y_{jk}=\frac{1}{(T^j)_k},\ j=1\sim n,\ k=1\sim l \quad (21)$$

위의 연립 방정식을 풀어서 식 (17)의 加重値 a_i의 係數 γ_{ij}를 구하였다.

4. 係數 γ_{ij}의 計算 結果

위의 계산과정을 통하여 구한 γ_{ij}의 값과 문헌 상의 吸數係數 k_i의 값을 표시하면 다음 Table 1~5와 같다.

Table 1은 CO_2 기체의 加重値를 다음 식과 같이 온도의 2次項의 逆數까지를 이용했을 때의 결과이다.

$$a_i=\gamma_{i0}+\frac{\gamma_{i1}}{\tau}+\frac{\gamma_{i2}}{\tau^2} \quad (22)$$

윗 식에서,

$$\tau=T^{\circ k}/1000$$

Table 2는 CO_2 기체의 加重値 a_i를 식 (23)과 같이 온도의 三次項의 逆數까지를 사용했을 때의 결과이다.

$$a_i=\gamma_{i0}+\frac{\gamma_{i1}}{\tau}+\frac{\gamma_{i2}}{\tau^2}+\frac{\gamma_{i3}}{\tau^3} \quad (23)$$

Table 3은 CO_2 灰色氣體의 加重値를 온도의 四次項의 逆數까지를 사용했을 때에 대한 결과이다.

$$a_i=\gamma_{i0}+\frac{\gamma_{i1}}{\tau}+\frac{\gamma_{i2}}{\tau^2}+\frac{\gamma_{i3}}{\tau^3}+\frac{\gamma_{i4}}{\tau^4} \quad (24)$$

Table 4는 H_2O 灰色氣體를 식 (22)와 같이 온도의 二次項의 逆數까지를 이용했을 때에 대한 결과이다.

Table 5는 H_2O 灰色氣體의 加重値를 식 (23)과 같이 온도의 三次項의 逆數까지를 이용했을 때의 결과

Table 1 Values of the constants $\gamma_{i,j}$ and k_i in equation (17) for CO_2 gray gas, $a_i=\gamma_{i,0}+\gamma_{i,1}/\tau+\gamma_{i,2}/\tau^2$, $\tau=T\ K/1000$, P_gL=cm atm.

i \ j	$\gamma_{i,0}$	$\gamma_{i,1}$	$\gamma_{i,2}$	k_i
1	0.4114771	−0.1191224	0.02654507	0.0003647
2	−0.00570993	0.1751408	−0.0850763	0.0036330
3	−0.0114724	0.1439534	−0.06216872	0.0310
4	−0.00539995	0.07096846	−0.027158105	0.1496
5	−0.03176933	0.1269945	−0.05171511	1.036
6	−0.00797345	0.02744371	−0.00596318	7.806

Table 2 Values of the constants $\gamma_{i,j}$ and k_i in equation (17) for CO_2 gray gas, $a_i=\gamma_{i,0}+\gamma_{i,1}/\tau+\gamma_{i,2}/\tau^2+\gamma_{i,3}/\tau^3$, $\tau=T\ K/1000$, P_gL=cm atm.

i \ j	$\gamma_{i,0}$	$\gamma_{i,1}$	$\gamma_{i,2}$	$\gamma_{i,3}$	k_i
1	0.4114711	−0.11911224	0.0265407	−	0.0003647
2	−0.1824832	0.8685347	−0.8188864	0.2253813	0.003633
3	−0.07770912	0.4130442	−0.3665191	0.09878845	0.0310
4	−0.0294800	0.1702040	−0.1423403	0.0381592	0.1496
5	−0.03768278	0.1527180	−0.08346745	0.01091601	1.036
6	−0.00346328	0.006393768	0.02257021	−0.01061336	7.806

Table 3 Values of the constants $\gamma_{i,j}$ and k_i in equation (17) for CO_2 gray gas, $a_i=\gamma_{i,0}+\gamma_{i,1}/\tau+\gamma_{i,2}/\tau^2+\gamma_{i,3}/\tau^3+\gamma_{i,4}/\tau^4$, $\tau=T\ K/1000$, P_sL=cm atm.

i \ j	$\gamma_{i,0}$	$\gamma_{i,1}$	$\gamma_{i,2}$	$\gamma_{i,3}$	$\gamma_{i,4}$	k_i
1	0.4114771	−0.1191224	0.0265451	—	—	0.0003647
2	−0.1874957	0.8950949	−0.8657413	0.2581601	−0.0078304	0.003633
3	−0.1736316	0.9294681	−1.295731	0.7644727	−0.162644	0.0310
4	−0.0037878	0.0315129	0.1090557	−0.1429214	0.0444528	0.1496
5	−0.0139446	0.0181269	0.1719281	−0.1793469	0.0477589	1.0361
6	0.0066593	−0.0538770	0.1438112	−0.1064498	0.0253044	7.806

Table 4 Values of the constants $\gamma_{i,j}$ and k_i in equation (17) for H_2O gray gas, $a_i=\gamma_{i,0}+\gamma_{i,1}/\tau+\gamma_{i,2}/\tau^2$ $\tau=T\ K/1000$, P_sL=am atm.

i \ j	$\gamma_{i,0}$	$\gamma_{i,1}$	$\gamma_{i,2}$	k_i
1	0.0141073	0.5928425	−0.22584130	0.0082352
2	−0.05889870	0.2642632	−0.08552752	0.071972
3	−0.00201229	0.02520694	0.00894706	0.50574
4	−0.01077463	0.01068194	−0.000238125	4.1788

Table 5 Values of the constants $\gamma_{i,j}$ and k_i in equation (17) for H_2O gray gas, $a_i=\gamma_{i,0}+\gamma_{i,1}/\tau+\gamma_{i,2}/\tau^2+\gamma_{i,3}/\tau^3$, $\tau=T\ K/1000$, P_sL=cm atm.

i \ j	$\gamma_{i,0}$	$\gamma_{i,1}$	$\gamma_{i,2}$	$\gamma_{1,3}$	k_i
1	−0.0591638	0.8932018	−0.5719211	0.1145219	0.0082352
2	−0.1198696	0.5168355	−0.3838696	0.1006553	0.071972
3	0.02965407	−0.1167801	0.1932530	−0.06682821	0.50574
4	−0.01225271	0.01525528	−0.00468856	0.00151498	4.1788

이다.

5. 유도된 식의 計算値와 實測値의 比較 分析

CO_2 및 H_2O 灰色氣體의 放射率 計算式의 값이 實測値를 어느 정도 대변하고 있는지를 분석하기 위하여 식(25)의 誤差分析式을 이용하였다.

$$\text{Error}(\%)=\left|\frac{\epsilon_m-\epsilon_c}{\epsilon_m}\right|\times 100 \tag{25}$$

윗 식에서,

ϵ_m=실측된 放射率

ϵ_c=계산된 放射率

本 硏究에서는 온도 범위 1000°R에서 5000°R, P_sL 범위 0.003 atm-ft에서 20 atm-ft 사이에서 계산치와 실측치를 비교 분석하였다.

Table 6은 오차분석에 이용될 기호를 나타내고 있다.

Table 6 Symbols representing error percent range

Symbols	Error range
○	0 ≤Error(%)≤ 2.5
●	2.5<Error(%)≤ 5.0
□	5.0<Error(%)≤ 7.5
■	7.5<Error(%)≤ 10.0
△	10.0<Error(%)≤ 15
▲	15 <Error(%)≤ 20
◇	20 <Error(%)≤ 30
◆	30 <Error(%)≤ 50
/	50 <Error(%)≤100
×	100 <Error(%)

5.1 CO_2 氣體의 放射率 分析

Fig. 1은 참고문헌 (3)에서 발표한 CO_2 기체의 放射

率 계산식에 의한 계산 결과와 실측치 사이의 2차분석 결과를 나타내고 있다. 이 결과에 의하면 온도 범위 1500°R에서 3250°R, P_gL 범위 0.03에서 1.0 ft-atm 사이의 放射率은 참고문헌 (3)의 계산치가 실측치를 잘 대변하고 있다. 그러나 위의 범위 밖의 계산치는 실측치와 상당한 거리가 있음을 알 수 있다. 더우기 온도가 3500°R인 경우에는 계산치와 실측치 사이의 오차가 크게 발생하여 참고 문헌 (3)의 결과식을 CO_2 放射率 계산에 이용할 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 2는 本 硏究에서 유도한 식 (22)와 Table 1의 결과를 이용하여 계산한 CO_2 灰色氣體의 放射率과 실측치 사이의 誤差分析의 결과이다. 이 결과에 의하면 Hottel 圖表에서 제시한 P_gL 및 온도의 원 범위에 걸쳐서 오차가 비교적 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 더우기 Fig. 2의 결과에 의하면 P_gL의 값이 낮은 경우와 온도가 높은 경우에 계산식 (22)의 값이 실측치를 보다 잘 대변하는 경향을 보였다. 식 (22)를 이용하여 CO_2의 放射率을 계산할 경우 실측치와 계산치 사이의 오차는 대부분이 10% 이하의 범위내에 분포되어 있으며 가장 큰 오차도 15% 이하인 결과를 얻을 수 있었다.

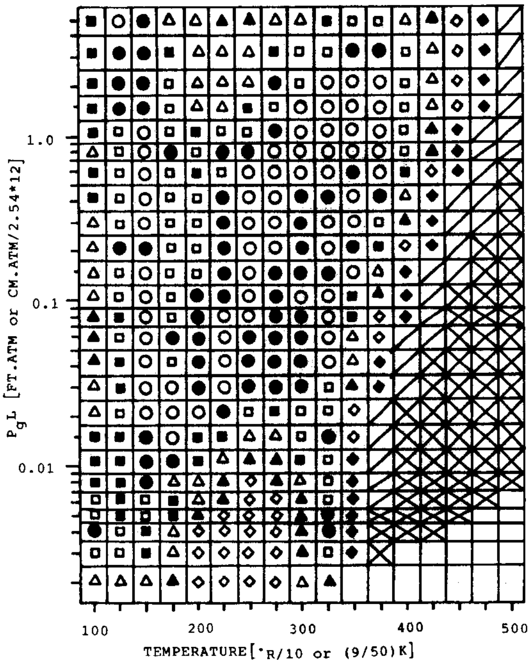

Fig. 1 Results of error analysis between the values of hottel chart and the calculated values of reference (3) for CO_2 emissivities

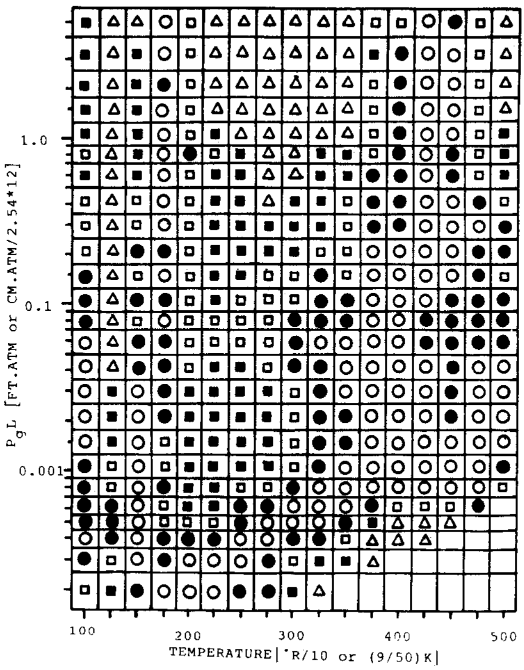

Fig. 2 Results of error analysis between the values of hottel chart and the calculated values of equation (22) for CO_2 emissivities

Fig. 3은 본 연구에서 유도한 식 (23)과 Table 2의 결과를 이용한 CO_2 放射率의 계산치와 실측치 사이의 오차를 식 (25)를 이용하여 분석한 결과이다. 이 결과에 의하면 극히 일부분의 경우를 제외하고는 실측치와 계산치 사이의 오차가 5% 이내의 범위에 분포되어 있었다. 燃燒氣體의 온도가 아주 낮거나 P_gL의 값이 대단히 작은 경우를 제외하고는 식 (23)의 계산치가 실측치를 잘 대변하고 있었다. 따라서 컴퓨터를 이용한 燃燒器의 熱 性能 해석에 식 (23) 및 Table 2의 결과를 무리없이 이용할 수 없을 것이다.

Fig. 4는 식 (24)와 Table 3의 값을 이용하여 계산한 값과 실측치 사이의 오차분석 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 식 (24)에 의한 계산치는 대부분의 온도 및 P_gL의 범위에서 자료를 읽는 데서 발생할 수 있을 정도의 오차범위 내에서 실측치를 잘 대변하고 있었다. 몇 몇 경우를 제외하고는 식 (24)의 계산치와 실측치 사이의 오차는 2.5% 이하의 범위 내에서 분포되어 있었다. 따라서 반복 계산이 요구되는 燃燒裝置의 熱 性能 해석에 컴퓨터를 이용할 경우 식 (24)와 Table 3의 결과는 대단히 유용하게 이용될

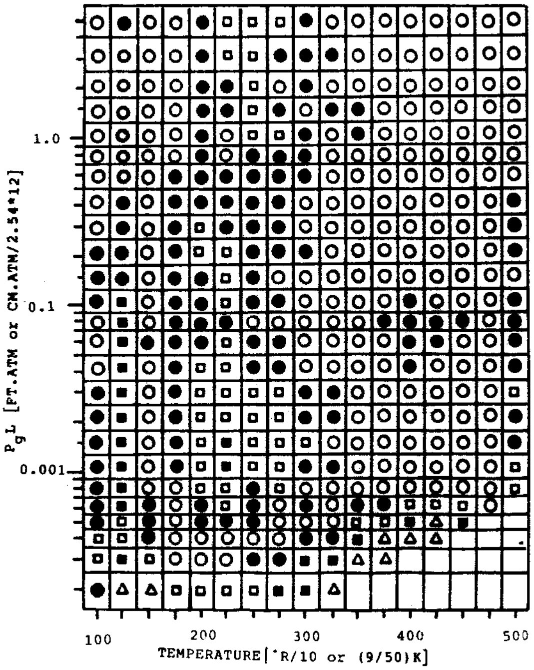

Fig. 3 Results of error analysis between the values of hottel chart and the calculated values of equation (23) for CO_2 emissivities.

수 있을 것이다.

5.2 H_2O 기체의 放射率 계산치와 실측치의 비교분석

Fig. 5는 참고 문헌 (10)의 결과식을 이용하여 계산한 H_2O의 放射率과 실측치를 비교분석한 결과를 나타내고 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 참고 문헌 (10)의 결과는 온도가 낮은 경우, 환언하면 온도가 1750°R 이하인 경우에 한해서만 유용하다는 것을 알 수 있다. 燃燒氣體의 온도가 2500°R 이상인 경우에는 참고 문헌 (10)의 결과식을 H_2O 放射率 계산에 이용할 수 없음을 알 수 있다.

本 硏究의 결과인 Table 4와 식 (22)를 이용하여 H_2O 放射率에 대한 계산치와 실측치 사이의 오차분석한 결과가 Fig. 6에 표시되어 있다. 이 결과에 의하면 P_gL의 값이 대단히 낮은 경우를 제외하고는 대부분의 온도 및 P_gL의 범위에서 계산치와 실측치 사이의 오차가 5% 이내에 분포되어 있었다. 加重値에 대한 수식이 문헌 상에서는 온도의 二次 多項式이며 本 硏究에서는 온도의 逆數의 二次 多項式이나 그 결과는

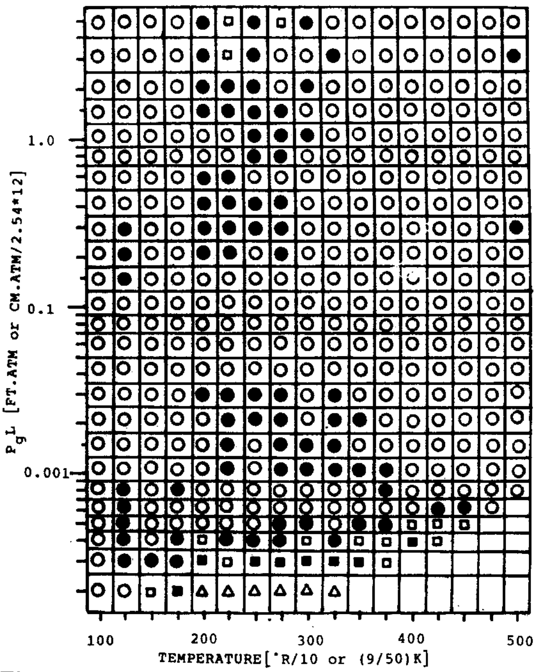

Fig. 4 Results of error analysis between the values of hottel chart and the calculated values of equation (24) for CO_2 emissivities

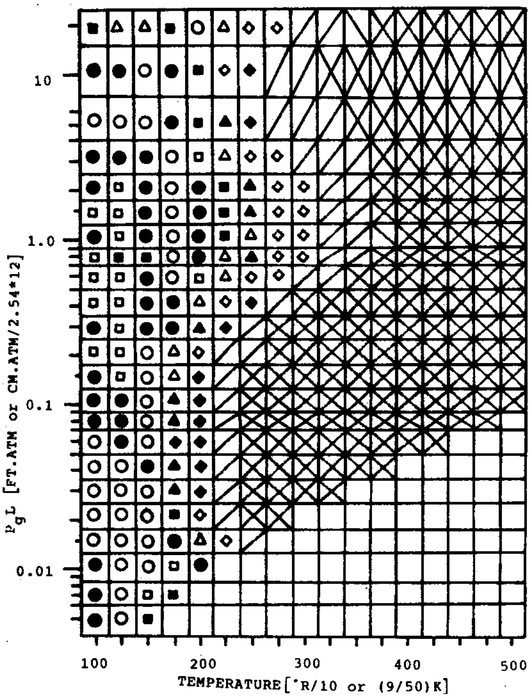

Fig. 5 Results of error analysis between the values of hottel chart and the calculated values of reference (10) for H_2O emissivities

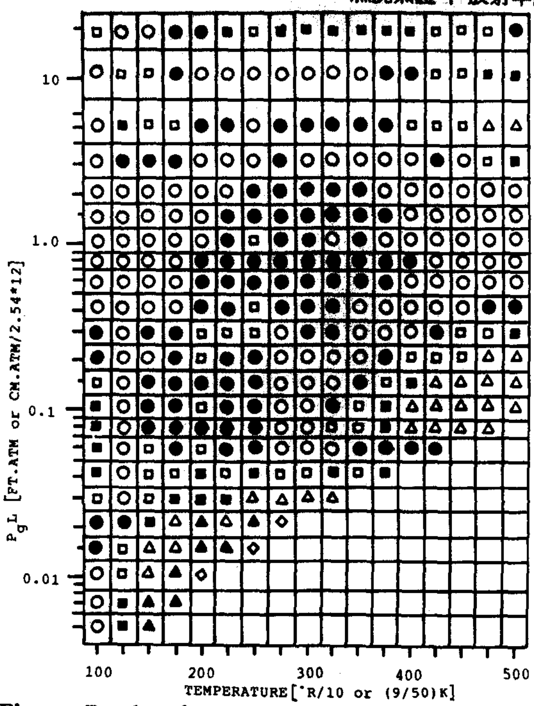

Fig. 6 Results of errer analysis between the values of hottel chart and the calculated values of equation (22) for H_2O emissivities

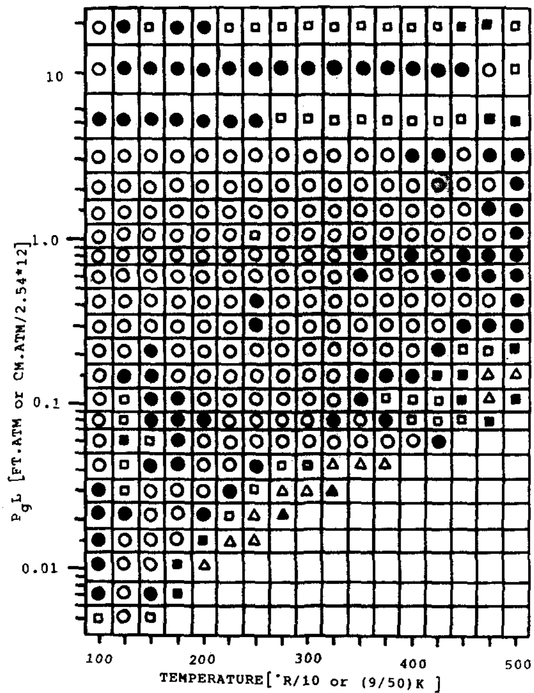

Fig. 7 Rseults of error analysis between the values of hottel chart and calculated values of equation (23) for H_2O emissivities

대단한 차이를 나타내고 있다는 것을 Fig. 5와 Fig. 6으로 부터 알 수 있다.

Fig. 7은 H_2O 灰色氣體의 放射率 계산에 온도의 逆數의 三次 多項式 까지를 이용한 결과에 대한 오차분석을 나타내고 있다. 이 결과에 의하면 온도 1000°R 내지 5000°R, P_gL 0.005 ft-atm 내지 20 ft-atm 범위에서 P_gL의 값이 아주 낮은 경우를 제외하고는 계산치와 실측치 사이의 오차가 대단히 작다는 것을 알 수 있다. 대부분의 경우에 대한 오차는 2.5% 이하로서 H_2O 放射率 계산에 식 (23)과 Table의 값을 전혀 무리없이 이용할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

6. 結 論

本 硏究의 결과에 의하면 燃燒氣體 中에서 不輝性 輻射에너지를 放出하는 CO_2 및 H_2O의 灰色氣體는 不連續的인 波長의 電磁氣波로 형성되며, 각 기체의 放射率은 P_gL의 指數函數와 온도의 逆數의 多項式의 積으로 표현됨을 알 수 있었다.

기존에 발표된 放射率 계산식의 값, 本 硏究의 결과인 放射率 계산식의 값과 Hottel 圖表의 값을 비교분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

기존에 발표된 식의 값은 온도가 상승할수록 실측치와의 오차가 증대되어 어느 온도 이상에서는 CO_2 및 H_2O 放射率 계산에 발표된 수식을 이용할 수 없었으나, 本 硏究의 결과인 放射率 계산식의 값은 온도의 逆數의 多項式의 次數가 증가할수록 실측치를 잘 대변하고 있음을 알 수 있었다. CO_2 放射率인 경우 온도 逆數의 四次 多項式까지를 이용하여 放射率을 계산할 때 실측치와의 오차는 대부분 2.5% 이내에 분포되었으며, H_2O의 放射率의 경우에는 온도의 逆數의 三次 多項式까지 이용함으로써 실측치와 오차를 대부분의 경우 2.5% 이하로 줄일 수 있었다.

더우기 本 硏究의 결과는 燃燒裝置가 복잡하고 고온의 燃燒熱을 이용하는 경우 각 地域에서의 온도 분포를 정확히 계산하기 위하여 수없이 반복과정을 거치는 컴퓨터 시뮬레이션에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

後 記

本 硏究는 한국과학재단의 IBRD 차관연구비 지원과 한국중공업의 도움으로 이루어진 것입니다. 이에 대하여 깊은 感謝를 드립니다.

參考文獻

(1) Holter, H.C. and Sarofim, A.F., 1967, "Raditive Transfer", McGraw-Hill, New York.

(2) Mcadams, W.H., 1954, "Heat Transmission", McGraw-Hill.

(3) Farag, I.H. and Allam, T.A., 1981, "Gray-Gas Approximation of Carbon Dioxide Standard Emissivity", J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 403~405.

(4) Ha, M.Y. and Hur, B.K., 1986, "Calculation of the Absorption Coefficient and Weighting Factor Expressing the Total Emissivity of Flame", Trans, KSME, Vol. 10. No. 1., pp. 121~130.

(5) Sarofim, A.F., Farag, I.H., and Hottel, H.C., 1978, "Radiative Heat Transmission From Non-Luminous Gases. Computational Study of the Emissivities of Carbon Dioxide", Presented at the AIAA-ASME Thermophysics & Heat Transfer Conferance, Palo, Alto, Calif.

(6) Felske, J.D., and Charalam Populos, T.T., 1892, "Gray Gas Weighting Coefficients for Arbitrary Gas-Soat Mistures", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 12, pp. 1849~1855.

(7) Nakara, N.K., and Smith, T.S., 1977, "Combined Radiation-Convection for a Real Gas", J. of Heat Transfef, pp. 60~65.

(8) Pivovonsky et al., 1961, Tables of Blackbody Radiation Functions", Macmillan Company, New York.

(9) Wiebelt, John A., 1966, "Engineering Radiation Heat Transfer", Holt, Riehart and Winston, Inc., New York.

(10) Farag, I.H., 1976, "Radiation Heat Transmission From Non-Luminous Gases. Computational Stuay of the Emissivities of Water Vapor and Carbon Dioxide", SC. D. Thesis, MIT., Cambridge Mass.