

<論 文>

火焰의 總括輻射 係數를 나타내는 吸收係數 및 加重值의 計算

하 만 영* · 허 병 기**

(1985年 10月 14日 接受)

Calculation of the Absorption Coefficient and Weighting Factor Expressing the Total Emissivity of Flame

Man Yeong Ha and Byung Ki Hur

Key Words: Total Emissivity of Gas Mixture(氣體混合物의 總括輻射率), Absorption Coefficient of Gray Gas(灰色氣體의 吸收係數), Weighting Factor of Gray Gas(灰色氣體의 加重值), Radiation Pathlength(輻射徑路길이), Exponential Model(指數函數의 모델)

Abstract

Using the absorption coefficients and the weighting factors of the gray gas, the total emissivities of CO₂-H₂O and CO₂-H₂O- transient species-soot gas mixtures can be expressed by the following equation, $\epsilon = \sum_{i=1}^n a_i (1 - e^{-K_i L})$

Where, a_i and K_i represent the weighting factor and the absorption coefficient of i -gray gas respectively; L is the pathlength of the gas. This equation is widely used for the analyses of the radiation heat transfer in the combustors of internal combustion engines and in the furnace of external combustion engines.

In this work, a simple calculation model of the weighting factor and the absorption coefficient of the above equation was developed. The weighting factors and the absorption coefficients of combustion products were calculated by applying the model to various kinds of fossil fuels such as coal and heavy oil.

Then, the computed total emissivities for each fuel and pathlength were compared with measured and calculated values which have been already published in the literatures.

The followings were the results obtained through the comparisons between the calculated emissivities and the published values; the developed model for the calculations of the weighting factor and the absorption coefficient of CO₂-H₂O and CO₂-H₂O- transient species-soot gas mixtures

*韓國重工業(株) 保溫器設計室

**正會員, 仁荷大學校 工科大學 環境工學科

could be applied over the wide ranges of the temperature and the pathlength; the errors between the total emissivities calculted and the values published were maximum 10%, and average 1%, respectively.

記號說明

- ϵ : 기체의 總括輻射率, 無次元
 α : 기체의 總括吸收率, 無次元
 T : 溫度, R 혹은 K
 E_λ : 스펙트랄 輻射強度, $\text{Btu}/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$ 혹은 W/m^2
 K_λ : 스펙트랄 吸收係數, ft^{-1} 혹은 m^{-1}
 K : 褐色기체의 吸收係數, ft^{-1} 혹은 m^{-1}
 σ : Stefan Boltzmann 的 常數, $0.1713 \times 10^{-8} \text{Btu}/\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{R}^4$ 혹은 $1.798 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$
 p : 壓力, atm
 L : 輻射徑路길이, ft 혹은 m
 F_E : F_E Operator, 無次元
 a_i : 褐色기체의 加重值, 無次元
 b_{ik} : 溫度에 대한 加重因子, 無次元

添字

- λ : 波長, μm
 g : 氣體
 s : 面
 c : 二酸化炭素
 w : 수증기
 present : 本 研究結果
 $C-E$: $C-E$ 社의 結果

1. 序論

輻射熱傳達은 核爆發, 超音速衝擊層, 로켓 推進機關, 核融合을 위한 플라즈마 發生器, 高溫 燃燒室 및 太陽熱 시스템 等에서 중요시 되는 복잡하고 흥미 있는 热傳達 메카니즘으로서 오래전부터 많은 研究者들의 관심의 대상이 되어왔고 현재에도 활발한 研究가 進行되고 있다^(1,2). 產業用 및 發電用 보일러 等의 外燃機關의 燃燒爐는 물론 內然機關의 燃燒器內에서 化石燃料를 燃燒시킬 때生成되는 火焰의 溫度는 대단히 높으며, 이런 高溫 燃燒氣體에 의한 热傳達은 주로 輻射熱傳達 메카니즘에 의하여 이루어진다. 따라서 高溫 燃燒爐 및 燃燒器의 热性能은 주로 輻射熱傳達 메카니즘에 의하여 解析되어지고 있다. 燃燒爐나 燃燒器內에서生成되는 火焰은 통상 여러가지 成分의 氣體로構成되어 있으며, 火焰에 의한 輻射는 주로 H_2O 및 CO_2 의

回轉・振動 에너지의 遷移에 의한 난—루미너스輻射와 겹명이 等과 같은 固形物質의 連續스펙트럼에 의한 루미너스輻射로 이루어진다^(1~5).

Edward 및 그의 동료들은 係數 세 가지를 導入하여 스펙트랄 輻射率을 쉽게 나타낼 수 있는 指數型 와이드 벤드 모델을 提案하였다^(6~8). Tien과 Lower는 總括벤드吸收率이 가지는 特性을 반죽시키는 간결한 式을 開發하여 任意의 벤드에서 輻射率을 計算하였다⁽⁹⁾. 또한 Hottel과 그의 동료들⁽¹⁰⁾은 氣體의 總輻射量을 測定한 기존의 資料를 理論으로 보완하여 넓은 範圍의 輻射徑路길이와 溫度에 대하여 總括輻射率을 나타내는 圖表를 만들었으며 이 圖表는 現재 輻射熱傳達 裝置의 性能設計 및 解析에 가장 널리 이용되어 가고 있다.

Hottel의 圖表中 輻射徑路길이가 긴 領域과 高溫 領域의 總括輻射率은 外插法에 의하여 計算된 값들로서, Boyton과 Ludwig⁽¹⁰⁾는 이를 값이 實際 測定值보다 조금 낮다고 지적하였다. 이런 현상은 微量이기는 하나 火焰을 構成하고 있는 겹명이 및 過渡氣體成分(OH , CO , CN , HCN , NO , HCO , C_2 , CH 等)의 影響 때문에 발생된다^(11~15). 따라서 미국의 Combustion Engineering社에서는 여러 종류의 燃料의 燃燒에 따른 實測 總括輻射率로부터 각 燃料에 대한 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 氣體成分외에 過渡氣體成分 및 겹명의 影響을 算出하여 이 結果를 “ F_E Operator”라는 因子에 壓縮시켜 燃燒爐 性能設計에 이용하고 있다^(16~18).

實際氣體의 總括輻射率은 吸收係數가 K_i 인 몇개의 褐色기체의 加重值의 합으로 나타낼 수 있다^(1, 11~13, 19~21).

實際燃燒氣體의 總括輻射率을 몇개의 褐色기체의 합으로 나타내는 것은, (1) 實際氣體 輻射의 복잡한 스펙트럼 特性을 몇개의 褐色기체의 特性의 합으로 간결히 나타낼 수 있고, (2) 광범위한 溫度 및 輻射徑路길이에 대한 總括輻射率을 손쉽게 구할 수 있으며, (3) 燃燒爐나 燃燒器內에서의 热精算과 같은 工學計算에 손쉽게 이용할 수 있는 잇점이 있다.

本 研究에서는 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 氣體混合物에 대한 吸收係數 및 加重值를 간단하고 효과적인 모델을 사용하여 計算하고 計算된 吸收係數에 光學的 두께 限制值에 해당하는 $K \rightarrow \infty$ 인 吸收係數 하나를 더 添加하여 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-$ 過渡氣體成分—겹명이 混合氣體에 대한 總括吸收係數

를 나타내었다. 本 研究의 計算모델로부터 얻어진 係數들에 의하여 算出되는 總括輻射率은 測定値는 물론 기존하는 모델에 의한 計算値를 잘 대비하였다.

2. 燃燒氣體의 热輻射 特性值

$\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 混合氣體는 回轉・振動 에너지 遷移에 의하여 스펙트럼 상에 不連續帶를 形成시키며, 이混合氣體의 吸收係數 K_ϵ 는 스펙트럼 상에서 波長에 대하여 매우 不連續의로 變한다. 氣體의 溫度가 T_ϵ 이고 이氣體를 둘러싸고 있는 境界의 溫度가 T_s 인 系의 總括輻射率 $\epsilon_\epsilon(T_s)$ 와 吸收率 $\alpha_\epsilon(T_s)$ 는 다음 式 (1), (2)와 같이 에너지 加重平均으로 表現된다⁽¹⁾.

$$\epsilon_\epsilon(T_s) = \frac{\int_0^\infty E_{\lambda,\epsilon} [1 - e^{-K_\epsilon \lambda}] d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda,\epsilon} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty E_{\lambda,\epsilon} [1 - e^{-K_\epsilon \lambda}] d\lambda}{\sigma T_s^4} \quad (1)$$

$$\alpha_\epsilon(T_s) = \frac{\int_0^\infty E_{\lambda,s} [1 - e^{-K_\epsilon \lambda}] d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda,s} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty E_{\lambda,s} [1 - e^{-K_\epsilon \lambda}] d\lambda}{\sigma T_s^4} \quad (2)$$

여기서 $E_{\lambda,\epsilon}$ 및 $E_{\lambda,s}$ 는 각各 氣體溫度 T_ϵ 및 境界溫度 T_s 에 대한 黑體의 스펙트랄 輻射強度를 나타낸다.

미국의 C-E 社는 CO_2 및 H_2O 의 總括輻射率을 나타내는 기존의 資料를 여러範圍의 溫度領域 및 氣體分壓領域에 따라서 분활하고 각領域에 대하여 式 (3)과 같은 總括輻射率을 計算하는 式을 誘導하였다⁽¹⁶⁾.

$$\epsilon = F(R) [PL]^{G(R)} - H(R) \quad (3)$$

윗式에서 $F(R)$, $G(R)$, 및 $H(R)$ 은 溫度의 係數로서 각各 溫度範圍 및 氣體分壓과 輻射徑路길이의範圍에 따라서 각각 다른 係數로 表示되며, PL 은 氣體의 分壓과 輻射徑路길이의 積, R 은 Rankine 溫度를 나타내는 變數이다.

化石燃料를 공기와 混合하여 燃燒爐內에서 燃燒시킬 때 CO_2 와 H_2O 가 순간적으로 생성된다고 가정하고 热傳達을 解析하면 爐벽면에서 吸收하는 热量은 實測値보다 훨씬 적은 값을 나타낸다. 따라서 過渡氣體成分 및 氧化物에 의한 輻射 에너지 影響도 고려되어야 한다. 일반적으로 過渡氣體成分 및 氧化物들이 燃燒爐에서 내는 輓射熱傳達量을 計算하기 위하여서는 火焰에 대한 化學速度論으로부터 その 成分들의 生成率과 分布狀態를 정확히 紋明하여야 되나 현재까지 이들에 대한 완전한 紋明이 이루어가고 있지 않은 상태이다.

$\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 混合氣體외에 過渡氣體成分과 氧化物의 影

響을 효과적으로 나타내는 方案으로 C-E 社에서는 F_E Operator를 導入하여 實際火焰의 總括輻射率을 나타내었다^(16~18). 환연하면, 過渡氣體成分 및 氧化物의 影響을 고려한 實際 火焰의 總括輻射率 ϵ_ϵ 와 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 氣體混合物의 ϵ_{c+w} 및 F_E Operator와의 函数關係를 式 (4)와 같이 誘導하였다.

$$\epsilon_\epsilon = \frac{F_E - 1 + \epsilon_{c+w}}{F_E} \quad (4)$$

여기서, $1 \leq F_E \leq \infty$

즉, F_E 는 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 氣體만의混合物에 대한 值 ($F_E=1$, $\epsilon_\epsilon=\epsilon_{c+w}$)과 黑體에 해당하는 值 ($F_E=\infty$, $\epsilon_\epsilon=1$) 사이에 存在한다.

3. 實際 氣體混合物에 대한 輻射率 計算모델

3.1 指數函數 모델

輻射徑路길이 L 에 대한 燃燒氣體의 總括輻射率 ϵ 는 式 (5)와 같이 複色기체들의 吸收係數 K_i 및 이들의加重值 a_i 의 函数로 表示할 수 있다^(1, 11~13, 19~21).

$$\epsilon = \sum_{i=1}^M a_i (1 - e^{-K_i L}) \quad (5)$$

윗式에서 M 은 複色기체의 總數를 나타내며, 加重值 a_i 는 吸收係數가 K_i 인 複色기체가 존재하는 스펙트럼領域에서의 에너지 分量을 나타낸다. 또한 式 (5)는 $L \rightarrow \infty$ 일 때 $\epsilon \rightarrow 1$ 의 條件을 만족하여야 함으로 a_i 의 值의 합은 다음 式 (6)을 만족시켜야 한다.

$$\sum_{i=1}^M a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_M = 1 \quad (6)$$

윗式에서 a_i 는 式 (7)과 같이 零 또는 陽의 值을 갖는다.

$$a_i \geq 0 \quad (7)$$

輻射徑路길이 L 이 매우 큰 值을 가지면, 總括輻射率의 值은 1에 接근하나 實際範圍의 輻射徑路길이 L 에 대한 總括輻射率은 1보다 작은 值을 가지게 된다⁽¹²⁾. 그러므로 式 (5)의 總括輻射率은 完全透過性氣體成分 ($K=0$)과 몇개의 複色기체의 합으로 충분히 表现될 수 있게 된다. 式 (5)의 吸收係數 K_i 는 燃燒氣體의 溫度 T_ϵ 나 境界溫度 T_s 에 無關하게 一定한 值을 가진다. 따라서 다음 式과 같이 加重值 a_i 를 溫度 T 의 多項式으로 表现함으로써 ϵ 와 溫度와의 函数關係를 定義하고 있다.

$$a_i = \sum_{k=1}^N b_{i,k} T^{k-1} \quad (8)$$

3.2 加重值 및 吸收係數의 計算過程

먼저 指數函數의 特性을 이용하여 吸收係數 K_i 를 決定하고 이 K_i 값을 사용하여 溫度變化와 關係되는 b_{ik} 를 決定한다.

(1) 吸收係數

式(6)에서 吸收係數 $K=0$ 인 完全透過性氣體에 해당하는 加重值 a_i 를 除外한 나머지 褐色기체들의 加重值을 Z 라 하면 Z 는 다음 式과 같이 表現할 수 있다.

$$Z = \sum_{i=2}^M a_i = 1 - a_1 \quad (9)$$

式(9)를 이용하여 式(5)를 다시 整理하면 다음 式과 같아 된다.

$$Z - \epsilon = a_2 e^{-K_2 L} + a_3 e^{-K_3 L} + \dots + a_M e^{-K_M L} \quad (10)$$

윗 式에서 $K_2 < K_3 < \dots < K_M$ 이고, 辐射徑路길이 L 的 값이 상당히 큰 경우에는 指數函數의 特性에 의하여 式(10)의 右側의 첫 項을 除外한 나머지 項을 無視할 수 있다. 그리므로 상당히 큰 辐射徑路길이 L 에 대하여 式(10)은 다음 式으로 變한다.

$$Z - \epsilon = a_2 e^{-K_2 L} \quad (11)$$

固定된 L 에 대하여 溫度에 따른 ϵ 的 值을 위의 非線型 方程式에 代入하여 Z , a_2 , 및 K_2 를 구한다. 일 반적인 吸收係數 K_i 는 式(11)에서 구한 Z 值, $i-1$ 단계에서 구한 吸收係數 K_{i-1} 值 및 a_{i-1} 值과 指數函數의 特性을 고려하여 구한다. 즉, 指數函數의 特性을 만족하는 상당히 큰任意의 辐射徑路길이 L_n 및 L_{n+1} 에 해당하는 辐射率를 이용하면 K_i 는 다음 式으로 구하여 진다.

$$K_i = \frac{1}{L_{n+1} - L_n} \ln \left\{ \frac{Z - \epsilon_{L_n} - \sum_{i=2}^{i-1} a_i e^{-K_i L_n}}{Z - \epsilon_{L_{n+1}} - \sum_{i=2}^{i-1} a_i e^{-K_i L_{n+1}}} \right\} \quad (12)$$

윗 式에서 ϵ_{L_n} 및 $\epsilon_{L_{n+1}}$ 은 辐射徑路길이 L_n 및 L_{n+1} 에서 式(3)에 의하여 計算된 總括辐射率이다. 그리고 吸收係數 K_i 에 대한 加重值 a_i 는 다음 式(13)과 같다.

$$a_i = e^{K_i L_n} \left[Z - \epsilon_{L_n} - \sum_{i=1}^{i-1} a_i e^{-K_i L_n} \right] \quad (13)$$

(2) 加重值 a_i 的 係數 b_{ik}

任意의 溫度 T_s 에서 式(11) 및 (12)로부터 구한 吸收係數 $K_1 (=0)$, K_2, \dots, K_M 은 溫度의 變化에 無關한 一定한 值으로 褐色기체의 辐射特性值들이다. 이 吸收係數를 사용하여 任意의 溫度 T_i 에서 褐色기체 K_i 에 해당하는 加重值 a_i^j 는 다음 方程式의 解로부터 구한다.

$$\sum_{i=2}^M U_{li} a_i^j = \epsilon_i^j ; l = 2 \sim M \quad (14)$$

윗 式에서

$$U_{li} = 1 - e^{-K_i L_l} \quad (14-1)$$

$$a_i^j = 1 - \sum_{k=2}^M a_k^j \quad (14-2)$$

式(14-1)에서 L_l 은 指數函數의 特性을 만족시켜 주는 標本 辐射徑路길이이며, ϵ_i^j 는 溫度 T_i 와 辐射徑路길이 L_l 에서 計算된 總括辐射率를 나타낸다.

吸收係數 K_i 와 式(14)로 부터 구한 a_i^j 를 사용하면 溫度 T_i 에 대한 a_i^j 的 係數 b_{ik} 는 다음 方程式으로부터 구할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^M V_{jk} b_{ik} = a_i^j ; j = 1 \sim N \quad (15)$$

윗 式에서

$$V_{jk} = T_j^{k-1} \quad (15-1)$$

4. 燃燒氣體의 吸收係數 및 加重值

實際 燃燒氣體에 대한 總括辐射率을 앞에서 설명한 一連의 過程에 따라 燃燒氣體混合物에 適用하면 이를 氣體에 대한 吸收係數 및 加重值을 쉽게 구할 수 있다. 먼저 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 氣體混合物에 대하여 앞의 過程을 適用하면 이 氣體混合物의 總括辐射率 ϵ_{c+w} 는 式 (16) 과 같다.

$$\epsilon_{c+w} = \sum_{i=1}^M (a_i)_{c+w} (1 - e^{-K_i L}) \quad (16)$$

여기서,

$$(a_i)_{c+w} = \sum_{k=1}^M (b_{ik})_{c+w} T_s^{k-1} \quad (16-1)$$

윗 式에서 T_s 는 燃燒氣體의 溫度를 나타내며 $(b_{ik})_{c+w}$ 는 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 混合氣體에 대한 總括辐射率 ϵ_{c+w} 에 해당하는 式(8)의 係數들이다.

式(4)와 式(16)을 組合하면, 實際 燃燒氣體인 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ -過渡氣體成分-겸생이混合物에 대한 總括辐射率를 나타내는 式(17)을 導出해 볼 수 있다.

$$\epsilon_t = \frac{F_E - 1}{F_E} + \sum_{i=1}^M \frac{(a_i)_{c+w}}{F_E} (1 - e^{-K_i L}) \quad (17)$$

윗 式에서 ϵ_t 는 實際 燃燒氣體에 대한 總括辐射率를 나타내며, F_E 는 Operator를 意味한다. 여기서 $K_{M+1} \rightarrow \infty$ 가 되는 褐色기체 成分을 導入하면 式(17)의 첫째 項은 指數函數의 特性에 의하여 다음 式과 같이 表現할 수 있다.

$$\frac{F_E - 1}{F_E} = \frac{F_E - 1}{F_E} (1 - e^{-K_{M+1} L}) \quad (18)$$

式(17)에 式(18)과 같은 特性을 지닌 褐色기체 成分 하나를 추가하면 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{過渡氣體成分}-\text{겸생}i$ 로 構

成된 氣體 混合物의 總括輻射率은 式(5)와 같은 一般의 式(19)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_t = \sum_{i=1}^{k+1} a_i (1 - e^{-K_i t}) \quad (19)$$

윗 式에서

$$a_i = \sum_{k=1}^n (b_{ik})_t T^{k-1} \quad (19-1)$$

式(19-1)의 $(b_{ik})_t$ 는 式(15)로부터 구하여, 式(15)의 a_i^j 는 다음 값을 가진다.

$$a_i^j = (a_i)_{c+w}/F_E; i=1 \sim M \quad (19-2)$$

$$a_i^j = (F_E - 1)/F_E; i=M+1 \quad (19-3)$$

5. 시뮬레이션 및 結果

化石燃料를 燃燒할 경우, 生成되는 火焰의 總括輻射率을 Fig. 1의 流程圖에 따라 計算을 수행하여 구하였다. Table 1은 發電用 보일러에 널리 사용되는 標準燃料⁽²²⁾에 대한 燃燒氣體의 組成 및 F_E Operator의 값을 나타내고 있다.

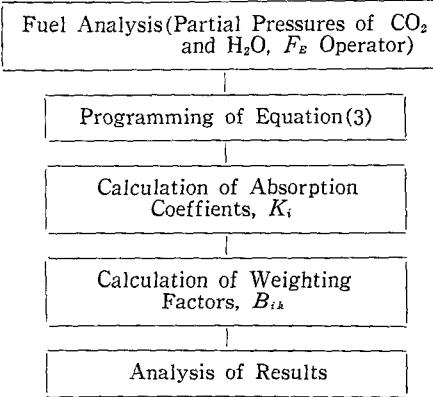


Fig. 1 Flow chart

Table 1 Data for the present calculation model

Fuel	Bunker-C Oil	Natural Gas	Coal, Bit. East. LV
Excess Air	0.05	0.08	0.2
Total Pressure	1 Atm.	1 Atm.	1 Atm.
Combustion Product (Volume %)			
CO ₂	13.11	8.65	14.21
SO ₂	0.09	0.02	0.12
N ₂	73.36	70.79	75.23
O ₂	0.92	1.38	3.31
H ₂ O	12.51	19.17	7.12
Tilt Angle(Deg.)	0	0	0
F_E Operator	1.24	1.20	1.30

5.1 CO₂—H₂O 混合氣體에 대한 總括輻射率 計算結果

Table 2는 燃燒爐 内의 全壓이 1 氣壓이고 CO₂와 H₂O의 分壓이 각각 0.1 氣壓인 경우에, 本研究의 모델을 適用하여 計算한 CO₂—H₂O 混合氣體에 대한 吸收係數 및 加重值를 나타내고 있다.

Fig. 2는 CO₂—H₂O 混合氣體의 總括輻射率에 대한 本研究의 結果와 Hottel 圖表 및 C-E 社의 計算值와의 比較이다. 本研究의 結果는 氣體溫度 800R에서 3,500 R 사이 및 輻射徑路길이 1 ft에서 50 ft의 範圍에서 Hottel 圖表과 잘一致하였다.

Fig. 3은 Taylor 및 Foster⁽¹²⁾와 Felske 및 Charalampopoulos⁽¹³⁾의 結果와 本研究의 結果를 比較한 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 本研究의 모델에 의하여 計算된 總括輻射率은 高溫과 상당히 큰 輻射徑路길이에 대하여서는 Felske 및 Charalampopoulos의 값

Table 2 Values of the coefficients K_M and b_{MN} in the total emissivity equations for a CO₂—H₂O gas mixture; $P_c = P_w = 0.1\text{atm}$; $P_{tot} = 1\text{atm}$; available temperature range = 800~4,000R; available pathlength range = 0.3~150 ft

	M	K_M	b_{M1}	$b_{M2} \times 10^4$	$b_{M3} \times 10^7$	$b_{M4} \times 10^{11}$
ϵ_{c+w}	1	0	0.357563	-4.77295	2.33220	-2.69557
	2	0.008028	0.131190	2.831940	-0.977794	0.992962
	3	0.046952	0.243352	1.783050	-0.888885	0.928346
	4	0.453093	0.164508	-0.0595255	-0.211228	0.409675
	5	3.750280	0.103384	0.217531	-0.254311	0.364615

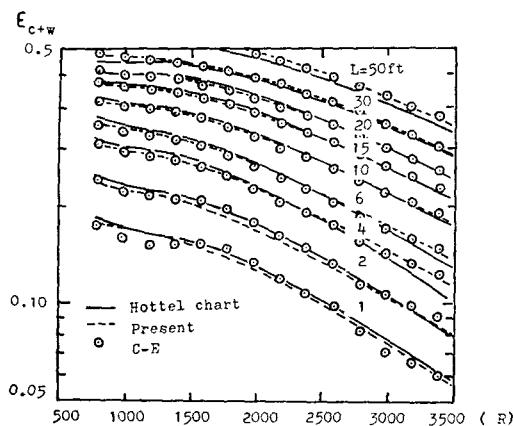


Fig. 2 Comparision of the sum of gray gas model of the $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ mixture total emissivity with the total emissivity results from Hottel (1) and C-E correlation(16); $P_c=P_w=1 \text{ atm}$; $P_{\text{tot}}=0.1 \text{ atm}$

보다 낮은 값을 나타내고 있으며 全體的으로는 文獻에發表된 값들을 잘 대비하고 있다.

5.2 CO_2-HO_2 —過渡氣體成分—검명이 混合氣體의 吸收係數 및 加重值의 計算結果

Table 3 은 Table 1 의 特性을 지닌 Bunker-C 燃料

Table 3 Values of the coefficients K_M and b_{MN} in the total emissivity equations for $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ —transient species-soot gas mixtures: Fuel=Bunker C Oil; $P_c=0.1311 \text{ atm}$; $P_w=0.1251 \text{ atm}$; $P_{\text{tot}}=1.0 \text{ atm}$; available temperature range=800~4,000°R; available pathlength range=0.3~150 ft.

	M	K_M	b_{M1}	$b_{M2} \times 10^4$	$b_{M3} \times 10^7$	$b_{M4} \times 10^{11}$
ϵ_{c+w}	1	0	0.306374	-4.751840	2.336610	-2.682990
	2	0.007934	0.263649	1.515110	-0.549953	0.521355
	3	0.049687	0.0356175	4.189080	-1.682560	1.783710
	4	0.430673	0.305099	-1.426920	0.253473	-0.111083
	5	4.569411	0.0892566	0.474610	-0.357594	0.489031
ϵ_T	1	0	0.355542	-3.077340	1.513220	-1.737530
	2	0.007934	0.212170	1.219280	-0.442575	0.419562
	3	0.049687	0.0286633	3.371140	-1.354030	1.435430
	4	0.430673	0.245527	-1.148310	0.203981	-0.0893952
	5	4.569411	0.0718285	0.381943	-0.287773	0.393547
	6	∞	0.195256	0	0	0

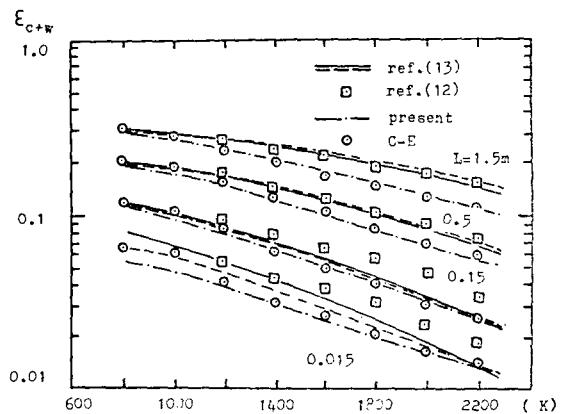


Fig. 3 Comparision of the sum of gray gas model of the $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ mixture total emissivity with the total emissivity results from references(12, 13) and C-E correlations(16), $P_c=P_w=0.1 \text{ atm}$, $P_{\text{tot}}=1 \text{ atm}$

에 대한 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 및 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ —過渡氣體成分—검명이 混合氣體의 吸收係數 및 加重值의 値들이다. 이 値들은 輻射路길이 0.3 ft 내지 150 ft, 溫度 800 R 내지 4,000 R의 範圍에서 사용될 수 있다.

$\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ —過渡氣體成分—검명이 混合氣體에 대한 複色기체 數는 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 를 나타내는 複色기체 成分數 5에 光學的 두께 限界值에 해당하는 複色기체 ($K \rightarrow \infty$)

를 하나 더 추가한 6個의 成分이며 溫度에 대한 多項式은 3次로 하였다.

Table 3의 結果를 사용하여 計算한 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 및 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{過渡氣體成分}-\text{검댕이}$ 混合氣體에 대한 總括輻射率과 C-E社의 設計值를 Fig. 4 및 Fig. 5에서

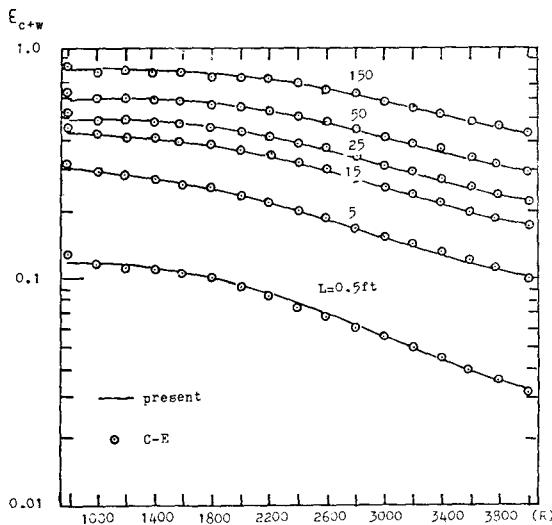


Fig. 4 Comparision of the sum of gray gas model of the $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ mixture total emissivity with the total emissivity computed from C-E correlations(16); Fuel=Bunker C oil; $P_c=0.1311 \text{ atm}$; $P_w=0.1251 \text{ atm}$; $P_{tot}=1 \text{ atm}$

Table 4 Values of the coefficients K_M and b_{M1} in the total emissivity equations for $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{transient species-soot}$ gas mixtures; Fuel=Coal Bit. East LV; $P_c=0.1421 \text{ atm}$; $P_w=0.0712 \text{ atm}$; $P_{tot}=1 \text{ atm}$; available temperature range=800~4,000°R; available pathlength range=0.4~150 ft

	M	K_M	b_{M1}	$b_{M2} \times 10^4$	$b_{M3} \times 10^7$	$b_{M4} \times 10^{11}$
ϵ_{c+w}	1	0	0.377226	-4.829250	2.340740	2.677490
	2	0.010493	0.304045	2.646730	-1.019830	1.005380
	3	0.067017	-0.0387353	3.268330	-1.327810	-1.454460
	4	0.304097	0.269777	-1.930150	0.507683	-0.421674
	5	2.504499	0.0876843	0.844383	-0.500798	0.639350
ϵ_T	1	0	0.400274	-2.857530	1.385050	-1.584300
	2	0.010493	0.233881	2.035940	-0.784480	0.773365
	3	0.067017	-0.0297969	2.514110	-1.021400	1.118820
	4	0.304097	0.207521	-1.484730	0.390526	-0.324364
	5	2.504499	0.0674495	0.649525	-0.385229	0.491809
	6	∞	0.230769	0	0	0

比較하였다. 이 結果에 의하면 溫度 800 R 내지 4,000 R, 輻射徑路길이 0.5 ft 내지 150 ft 範圍에서는 本 研究의 結果值가 C-E社의 計算值와 잘一致하고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 Table 1에 수록된 特性을 지닌 石炭에

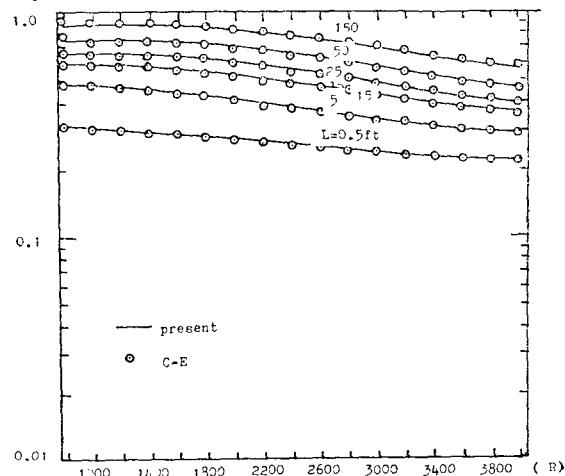


Fig. 5 Comparision of the sum of gray gas model of the $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{transient species-soot}$ mixture emissivity with the total emissivity results from C-E correlation(16); Fuel=Bunker C oil; $P_c=0.1311 \text{ atm}$; $P_w=0.1251 \text{ atm}$; $P_{tot}=1.0 \text{ atm}$

대한 吸收係數 및 加重値를 나타내고 있다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 위의 吸收係數와 加重値를 사용하여 計算한 總括輻射率과 C-E 社의 設計值와의 比較를 나타내고 있다. 이 結果 역시 溫度 800 R 내지 4,000 R, 輻射徑

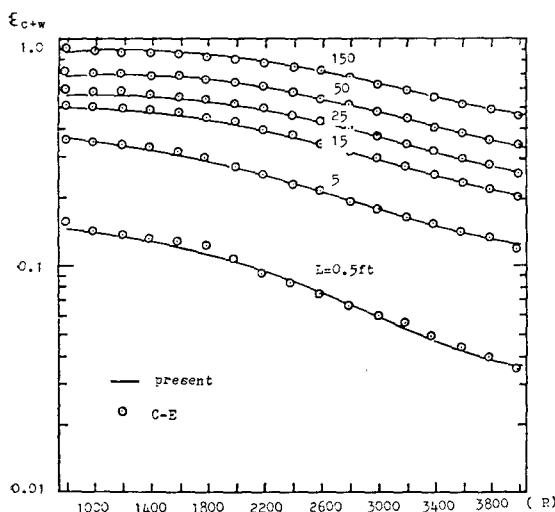


Fig. 6 Comparison of the sum of gray gas model of the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ mixture total emissivity with the total emissivity computed from C-E correlation(16); Fuel=Coal, Bit. East LV; $P_c=0.1421 \text{ atm}$; $P_v=0.0712 \text{ atm}$ $P_{tot}=1 \text{ atm}$

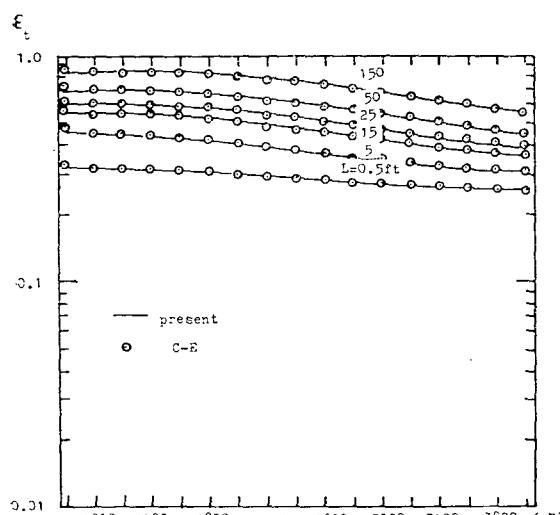


Fig. 7 Comparison of the sum of gray gas model of the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -transient species-soot mixture total emissivity with the total emissivity computed from C-E correlations(16); Fuel=Coal, Bit. East LV; $P_c=0.1421 \text{ atm}$; $P_v=0.0712 \text{ atm}$; $P_{tot}=1 \text{ atm}$

路길이 0.5 ft 내지 150 ft範圍內에서 두 값이 서로 잘一致하고 있음을 나타내고 있다.

本研究의 結果를 보다正確하게 比較検討하기 위하여 다음 두式에 의하여 C-E社의 計算結果와 本研究의 結果를 比較分析하였다.

$$\% \text{ Error} = \frac{|\epsilon_p - \epsilon_{C-E}|}{\epsilon_{C-E}} \times 100 \quad (20)$$

$$\text{Average \% Error} = \frac{\sum f_i \times (\% \text{ Error})}{\sum f_i} \quad (21)$$

위 式에서 ϵ_p 는 本研究의 計算結果, ϵ_{C-E} 는 C-E社의 計算結果를 나타내고 있다.

Table 5 및 Table 6은 각자 Bunker-C 및 石炭에 대한 本研究의 結果와 C-E社의 計算值 사이의 最大誤差 %와 平均誤差 %를 나타내고 있다.

Table 5 Percentage differences between present and C-E results for the total emissivity of $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ mixtures and $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -transient species-soot gas mixtures; Fuel=Bunker C oil; Pathlength range=0.3~150 ft

Temperature (°R)	ϵ_{c+w}		ϵ_t	
	Average % Error	Maximum % Error	Average % Error	Maximum % Error
800	5.04	6.05	3.81	4.49
1,000	1.11	7.33	0.83	2.91
1,200	0.22	6.04	0.15	2.36
1,400	0.30	3.74	0.20	2.32
1,600	0.40	6.14	0.26	2.89
1,800	0.47	9.03	0.30	3.65
2,000	0.49	7.99	0.32	3.06
2,200	0.59	4.88	0.40	1.73
2,400	0.51	5.75	0.34	2.28
2,600	0.80	6.10	0.55	2.33
2,800	0.40	5.90	0.25	1.90
3,000	0.29	3.55	0.17	1.17
3,200	0.45	6.85	0.27	2.17
3,400	1.03	9.05	0.63	2.73
3,600	1.30	9.34	0.78	2.67
3,800	0.94	6.89	0.56	1.85
4,000	0.77	7.84	0.40	1.82

위의 Table 5, 6에서 알 수 있듯이 이들 두 값 사이의 最大誤差는 10%를 넘지 않으며 平均誤差는 1%를 넘지 않음을 알 수 있다.

C-E社는 總括輻射率을 計算하기 위하여 溫度를 4個의 領域으로, 分壓과 輻射路길이의 積을 3個의 領域으로 구분하고 각 領域에서 式(3)의 係數函數 $F(R)$,

Table 6 Percentage differences between present and C-E results for the total emissivity of $H_2O - CO_2$ mixtures and $H_2O - CO_2$ -transient species-soot gas mixtures; Fuel=Coal Bit. East LV; Pathlength range=0.4~150 ft

Temperature (°R)	ϵ_{c+w}		ϵ_T	
	Average % Error	Maximum % Error	Average % Error	Maximum % Error
800	5.79	8.93	4.02	4.81
1,000	1.55	6.87	1.05	2.35
1,200	0.42	7.34	0.26	2.28
1,400	0.32	6.88	0.21	2.11
1,600	0.39	4.86	0.24	1.39
1,800	0.43	8.97	0.25	2.17
2,000	0.35	2.64	0.20	1.26
2,200	0.40	5.28	0.25	1.22
2,400	0.33	6.60	0.21	1.41
2,600	1.01	6.37	0.64	1.26
2,800	0.33	10.49	0.19	1.97
3,000	0.20	6.68	0.11	1.17
3,200	0.64	3.60	0.35	1.00
3,400	1.16	5.65	0.61	1.48
3,600	1.37	6.09	0.70	1.50
3,800	0.96	4.03	0.49	1.00
4,000	0.94	9.25	0.44	1.41

$G(R)$, $H(R)$ 30여 개를 經驗의로 誘導하고 이들을 사용하고 있다^[16]. 本研究에서는 燃燒氣體를 몇 개의 회색기체의 群으로 나누고 각 회색기체 群의 吸收係數 및 加重值를 이용하여 指數函數 方程式 하나로 總括輻射率을 計算하도록 하였다.

本研究의 結果와 C-E社의 計算值 사이에 誤差가 발생하는 것은 本研究가 광범위한 溫度 및 輻射徑路 길이에 대한 總括輻射率을 하나의 方程式으로 表示하는 반면, C-E社는 복잡하고 많은 數의 方程式을 이용하여 각 範圍에 따라 보다 정확한 輻射率을 計算하고 있기 때문이다. 그러나 本研究의 結果는 적은 誤差範圍 내에서 간단한 式으로 광범위한 輻射率을 計算할 수 있다.

6. 結論

本研究를 通하여 얻은 結果를 要約하면 다음과 같다.
(1) 組成이 알려진 燃料를 燃燒할 경우에 生成되는 火焰에 대한 總括輻射率을 나타내는 회색기체의 吸收係數 및 加重值을 計算하는 數學的 모델을 提示하였다.

(2) $CO_2 - H_2O$ -過渡氣體成分-검명이 氣體混合物의 吸收係數는 $CO_2 - H_2O$ 氣體混合物의 吸收係數에 光學的 두께 限界值에 해당하는 無限히 큰 吸收係數 하나를 더 추가하여 나타내었고, 加重值는 $CO_2 - H_2O$ 에 대한 加重值와 F_E Operator를 組合하여 구하였다.

(3) 本研究에 의하여 計算된 總括輻射率의 값은 $CO_2 - H_2O$ 氣體混合物의 경우, 기존하는 값에 대하여 最大 10%의 誤差, 平均 1%의 誤差를 넘지 않았으며, $CO_2 - H_2O$ -過渡氣體成分-검명이 混合物의 경우, 最大 5%, 平均 1%의 誤差를 넘지 않는 結果를 얻었다. 여리 化石燃料에 대하여 本 모델을 적용하여 유사한 結果를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) H.C. Hottel and A.F. Sarofim, "Radiative Transfer", McGraw-Hill, New York, 1-st Edition, 1967
- (2) R. Siegel and J.R. Howell, "Thermal Radiative Transfer", McGraw-Hill, Second Edition, 1981
- (3) C.L. Tien, "Thermal Radiation Properties of Gases", in T.F. Irvine, Jr. and J.P. Hartnett (eds.) Advances in Heat Transfer, Vol. 5, pp. 253~324, Academic Press Inc., New York, 1968
- (4) R.D. Cess, and S.N. Tiwan, "Infrared Radiative Energy Transfer in Gases", in T.F. Irvine, Jr., and J.P. Hartnett(eds.), Advances in Heat Transfer, Vol. 8, pp. 229~283, Academic press Inc., New York, 1972
- (5) D.K. Edwards, "Molecular Gas Band Radiation", in T.F. Irvine, Jr., and J.P. Hartnett(eds.), Advances in Heat Transfer, Vol. 12, pp. 115~193, Academic press, Inc., New York, 1976
- (6) D.K. Edwards, and W.S. Menard, "Comparision of Models for Correlation of Total Band Absorption", Appt. Optics 3, pp. 621~625, 1964
- (7) M.M. Weiner and D.K. Edwards, "Theoretic Expression of Water Vapor Spectral Emissivity with Allowance for Line Structure", Inc. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 11, pp. 55~65, 1965
- (8) D.K. Edwards and A. Balakrishnan, "Thermal Radiation by Combustion Gases", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, pp. 15~40, 1973
- (9) C.L. Tien and J.E. Lowder, "A Correlation for

- Total Band Absorptance of Radiating Gases", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 9, pp. 698~701, 1966
- (10) F.B. Boyton and C.B. Ludwig, "Total Emissivity of Hot Water Vapor., Semi-Emperical Charts Deduced From Longpath Spectral Data", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 14, pp. 963~973, 1971
- (11) F.R. Steward and H.K. Gurug, "Mathematical Simulation of an Industrial Boiler by the Zone Method of Analysis", in N.H. Afgan and H.M. Beer(eds.), Heat Transfer in Flames, pp. 47~71, Scripta Book Company, Washington D.C., 1974
- (12) P.B. Taylor and P.J. Foster, "The Total Emissivities of Luminous and Non-Luminous Flames", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 17, pp. 1591~1605, 1974
- (13) J.D. Felske and T.T. Charalampopoulos, "Gray Gas Weighting Coefficients for Arbitrary Gas-Soot Mixtures", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 12, pp. 1849~1855, 1982
- (14) W.H. Dalzell and A.F. Sarofim "Optical Constants of Soot and Their Application to Heat Flux Calculations", J. of Heat Transfer, pp. 100~104, February, 1969
- (15) R.O. Buckius and C.L. Tien, "Infrared Flame Radiation", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 20, pp. 93~106, 1977
- (16) K.E. Bueters, J.G. Cogoli and W.B. Habelt, "Performance Prediction of Tangentially Fired Utility Furnaces by Computer Model", Presented at the Fifteenth International Symposium on Combustion, 1974, Tokyo, Japan, C-E Paper # TIS-3865
- (17) K.A. Bueters, "Combustion Products by Fe Operator", Combustion, pp. 12~18, March, 1974
- (18) "ICES FPD Furnace Performance Design Engineering Program User's Manual", June, 1978, Engineering Science Department Fossil Power System Division, Power Systems Group, C-E Inc., Windsor, CT
- (19) I.H. Farag and T.A. Allam, "Gray-Gas Approximation of Carbon Dioxide Standard Emissivity", J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 403~405, May, 1981
- (20) H.C. Hottel and A.F. Sarofim, "The Effects of Gas Flow Pattern in Cylindrical Furnaces", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1153~1169, 1966
- (21) N.K. Nakara and T.S. Smith, "Combined Radiation-Convection for a Real Gas", J. of Heat Transfer, pp. 60~65, February, 1977
- (22) 김재학, 허병기, 이정종, 현호준, "C-E 발전용 보일러 시스템 구조 및 성능 설계에 관한 연구", RP-BTD-TH#83001, 한국중공업(주), 기술본부 보일러개발팀 (1983)