

〈論 文〉

## 高壓下의 定積 豫混合氣燃燒에 있어서 煤煙生成에 關한 研究

林載根\* · 裨明煥\*\* · 金鍾一\*\*\*

(1991년 10월 22일 접수)

### A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Combustion at High Pressures

Jae-Keun Lim, Myurng-Hoan Bae and Jong-Il Kim

**Key Words :** Soot Formation(煤煙生成), Premixed Combustion(豫混合氣燃燒), High Pressure(高壓), Laser Extinction Technique(레이저光 減衰法), Two-Color Method(2色法)

#### Abstract

The effect of pressure on soot formation in premixed propane-air combustion is investigated at high pressures over the pressure range of 1 to 5 MPa by using a specially designed constant volume combustion bomb. The combustion chamber of disk type with eight spark plugs located on the circumference at an interval of 45° is 100mm in diameter by 14mm thick. The end gases are compressed to high pressures by the eight converging flames. The soot volume fraction in the chamber center during the final stage of combustion at the highest pressure is measured by the in-situ laser extinction technique, and the burnt gas temperature during the same period is measured by the two-color method. It is found that the soot yield rises with 50 to 100% for the respective equivalence ratio range of 1.9~2.2 at an interval of 0.1 when the combustion pressure is increased from 1 to 5 MPa, and that the turbulent flames decrease in the soot yield as compared with the laminar flames because the burnt gas temperatures increase with the drop of heat loss.

#### 1. 서 론

噴霧燃燒系에서 排出되는 微粒子는 大氣汚染이나 生物에 미치는 惡影響의 憂慮때문에, 그 低減對策이 緊急한 課題가 되고있다. 亂流擴散燃燒의 本質인 噴霧燃燒에서는 局所的으로 燃料過濃한 領域이 存在하는데, 이 領域에서의 燃料의 熱分解에 의해

서 炭素狀物質(煤煙)이 析出된다. 生成된 煤煙의 大部分은 그 다음 段階의 火炎內에서 酸化되어 消滅되지만, 一部는 未酸化의 狀態로 排出된다.

그런데 燃燒系에서 排出되는 煤煙微粒子를 低減시키기 위해서는 우선 微粒子의 生成과 酸化의 메카니즘을 알 必要가 있어 以前부터 많은 基礎的 研究가 行해져 왔으나, 실제의 디젤機關이나 가스 터빈이 高溫·高壓下에서 燃燒가 行해짐에도 불구하고 大部分의 研究는 大氣壓 以下の 火炎을 대상으로 하고 있다. 본 研究에서는 生成과 酸化 가운데에서 生成過程만을 취급하는데, 실제의 燃燒系

\*正會員, 群山水產專門大學 機關科

\*\*正會員, 韓國產業技術大學 動力機械工學科

\*\*\*正會員, 朝鮮大學校 機械工學科

를 고려해, 특히 高壓下에서의 煤煙生成에 注目한다.

高壓下에서의 煤煙生成에 관한 研究는 그 數가 아주 적는데, 以下 이들 研究를 概觀해보기로 한다. 角田 등<sup>(1)</sup>은 高壓容器內에 懸垂한 單一燃料液滴燃燒에 의한 煤煙生成량을 周圍壓力(0.1~3MPa)과 酸素濃度(6~40%)를 變化시켜서 捕集法에 의해 調査한 結果, 火災形態가 大氣壓 附近에서는 橢圓形의 全周炎(envelope flame)에 가깝지만, 壓力이 增加함에 따라 後流에서 火災이 가늘게 늘어나게 되고, 1MPa를 超過하면 亂流火災으로 移行하고 있다는 것과, 煤煙生成량이 1MPa까지는 壓力의 增加에 따라 增加하지만, 1MPa를 超過하면 一定하게 됨을 보여주고 있다.

Flower 등<sup>(2)</sup>은 스테인리스鋼의 壓力容器內에 附着된 Wolfhard-Parker의 버너를 使用하여 壓力 100, 150, 200 및 250kPa의 層流擴散火災에서 壓力上昇에 따른 煤煙生成의 影響을 調査한 結果, 初期 燃料流動率을 一定하게 維持시키기 위해 壓力增加에 따라 燃料량의 流動率을 線形的으로 增加시켰기 때문에, 겉보기 煤煙發生量(煤煙生成量/燃料量)이 壓力의 0.5~1.0乘에 따라 增加한다고 했다.

以上에서와 같이 擴散火災에서는 燃料과 空氣의 混合이 燃燒, 煤煙生成 및 酸化를 總括해서 支配하는 重要因子中的 하나가 되기 때문에 周圍壓力을 變化시키면 混合過程이 變化해버려, 壓力變化에 의한 煤煙發生량의 變化가 生成過程의 變化에 의한 것인지, 아니면 酸化過程의 差異에 의한 것인지 明確하지가 않다. 또, 擴散火災에서는 分子擴散係數나 浮力の 影響과 같은 物理的過程과 化學的過程이 共存하고 있기 때문에, 壓力이 物理的過程과 化學的過程에 미치는 影響을 獨立的으로 調査하기가 困難하다. 이때문에 煤煙生成에 관한 壓力의 影響을 調査하기 위한 基礎的 研究로서는 豫混合氣燃燒가 有利하다고 생각된다.

MacFarlane 등<sup>(3)</sup>은 2MPa까지의 壓力範圍에서 直徑 12.7mm의 實驗用 버너로부터 一定流速으로 作動되는 豫混合버너火災를 使用해서 몇 種의 C<sub>2</sub> 및 C<sub>6</sub>의 炭化水素에 대한 煤煙生成을 捕集法에 의해 調査했다. 그 結果, 煤煙發生의 臨界當量比는 壓力의 影響을 거의 안받지만, 臨界當量比 以上에서는 煤煙生成량이 壓力의 2.5~3乘(P<sup>2.5-3</sup>)정도로 크게 增加함을 알았다. 그러나 이 研究에서는 壓力을 變化시키면 煤煙生成에 커다란 影響을 미치는

溫度도 同時에 變化하므로 煤煙生成에 미치는 純粹한 壓力만의 影響을 나타내고 있지는 않다.

Flower 등<sup>(4)</sup>은 直徑 80mm, 두께 29mm의 定積 燃燒器를 利用해 初期充塡壓力 0.45~1MPa의 壓力範圍에서 當量比 1.8~2.2의 프로판-空氣 豫混合氣燃燒에 있어서 煤煙生成을 레이저光 減衰法에 의해 調査했다. 이들의 研究結果는 前述한 MacFarlane 등의 結果와는 反對로 壓力이 높을수록 煤煙生成량이 減少한다고 했다. 그런데 이 實驗에서는 測定點의 氣가 다른 部分의 燃燒에 의해 壓縮되어 움직이고, 壓力上昇期間 중에 溫度도 上昇하는 등 測定上의 問題가 많아 測定 結果值가 많이 흩어져있는 이들 데이터로부터 煤煙生成에 미치는 壓力의 影響을 논하기에는 無理라고 생각된다.

이들은 다른 論文<sup>(5)</sup>에서 煤煙生成에 미치는 가장 큰 因子로서 溫度를 들고있다. 同 定積燃燒器에 프로판과 乾空氣의 豫混合氣를 使用한 實驗에서 一定한 當量比內에 稀釋劑로서 窒素의 比率를 바꿔 火災溫度를 變化시켜서 煤煙生成량을 調査한 結果, 火災溫度가 높아지면 煤煙發生이 減少되는데, 이것은 溫度가 上昇하면 熱分解나 粒子發生보다는 酸化가 促進되어 煤煙生成이 減少된다고 했다.

豫混合燃燒에서는 燃料과 空氣의 混合過程이 煤煙生成이나 酸化過程에 미치는 影響은 除外시킬 수 있지만, 周圍空氣나 버너림(burner rim)에서의 熱損失의 影響이나 測定上의 誤差 등의 問題가 있어 煤煙生成에 미치는 壓力의 影響에 대해서도 研究者에 따라 逆의 傾向을 나타내는 段階이다.

본 研究에서는 高壓下의 噴霧燃燒에 있어서 煤煙生成에 대한 基礎的 資料를 얻기 위해, 亂流 擴散火災의 複雜한 디이젤 噴霧燃燒를 豫混合氣에 의한 單純한 燃燒에서 모델링 될 수 있는 特殊 定積燃燒裝置를 製作했다. 이러한 定積 燃燒容器內의 프로판-空氣 豫混合氣燃燒를 對象으로, 주로 壓力이 煤煙生成에 미치는 影響을 2色法에 의한 燃燒가스溫度測定과 더불어 4MPa까지의 넓은 壓力範圍에 걸쳐 調査했다.

## 2. 實驗裝置 및 方法

### 2.1 實驗裝置

高壓下에 있어서 煤煙生成을 調査하기 위해 Fig. 1과 같은 定積燃燒器를 製作했다. 燃燒室은 直徑

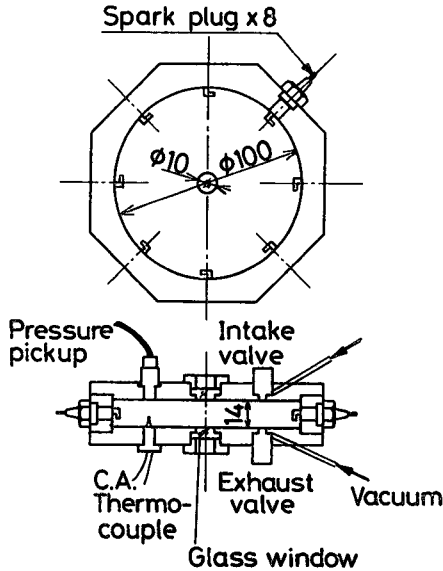


Fig. 1 Cross-section of constant volume combustion chamber

100mm, 두께 14mm의 디스크형인데, 周壁에는 45° 間隔으로 8개의 點火 프러그가 設置되어 있다. 容器內에 充塡한 프로판(純度 99.5%)·空氣의 燃料 過剩 豫混合氣를 8개의 點火프러그에 의해 同時點火<sup>(6)</sup>하면, 火炎은 周邊部로부터 中心을 향해 未燃 領域을 壓縮하면서 傳播하여 中心部가 最後에 燃燒한다. 燃燒室中心의 上·下面에는 直徑 10mm의 유리窓이 設置되어 있고, 이 窓을 통해서 煤煙濃度 및 燃燒가스溫度를 光學的으로 測定한다. 이 방식에 의하면 觀測部의 豫混合氣는 가장 高壓으로 된 燃燒終了時에 等壓燃燒하고, 觀測部의 가스가 移動하지 않는다고 하는 長點이 있다. 또한, 充塡 豫混合氣의 初期壓力을 變化시킴에 따라 燃燒壓力을 쉽게 變化시킬 수 있다. 燃燒室 側壁에는 스트레인게이지식 壓力計 및 初期溫度 測定用的 直徑 0.3mm 크로멜-알루멜 熱電對가 附着되어 있다. 유리面上에 水蒸氣가 凝縮하는 것을 防止하기 위해 容器全體를 리분히터에 의해 420K로 加熱했다.

光學系 및 데이터 處理系를 Fig. 2에 表示한다. 光源은 He-Ne 레이저(波長 632.8nm, 出力 1mW)를 使用했다. 레이저의 透過光과 輝炎의 自發光을 分離하기 위해, 브러그셀을 利用해 레이저光을 周波數 1kHz로 繼續的으로 入射시켰다. 그림에 表示한 光學系를 使用하여, 實效波長  $\lambda_1=633.2\text{nm}$ 에

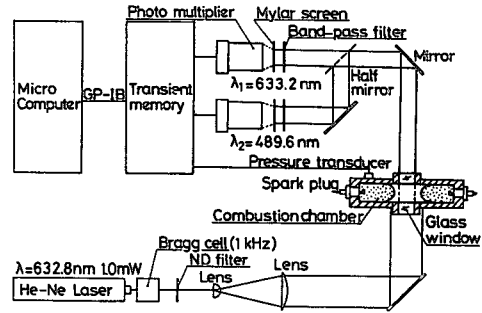


Fig. 2 Schematic of optical arrangement and data acquisition system for the measurements of soot formation and burnt gas temperature

있어서 透過光 및 輝炎으로부터의 自發光強度, 實效波長  $\lambda_2=489.6\text{nm}$ 에 있어서의 自發光強度를 光電子增倍管에 의해 각각 測定했다. 壓力計 및 光電子增倍管의 出力은 웨이브 메모리와 디지털 오실로스코프에서 A/D變換을 행하고, 確認한 후 마이크로 컴퓨터로 轉送하여 壓力, 燃燒가스溫度, 煤煙體積濃度 및 煤煙生成量을 算出한다. 當量比의 範圍는 1.9~2.2이고, 初期壓力을 0.1~1MPa의 範圍에서 變化시킴에 의해 煤煙生成時의 燃燒壓力을 變化시켰다.

2.2 實驗方法

火炎中の 煤煙粒子群에 波長  $\lambda$ 의 光을 入射했을 때 透過率  $\tau$ 와 煤煙體積濃度  $fv$ 와의 關係는 Rayleigh 및 Lambert-Beer의 法則<sup>(4)</sup>에 의해 다음과 같은 式으로 表現된다.

$$\tau = \exp\left\{-\frac{6\pi L}{\lambda} \cdot I_m \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \cdot fv\right\} \quad (1)$$

여기서  $L$ 은 光路長이고,  $m$ 은 煤煙의 複素屈折率인데, 본 論文의 경우  $m$ 은 Dalzell과 Sarofim의 값<sup>(7)</sup>을 使用했다. 본 實驗에서  $fv$ 값은 充塡豫混合氣의 密度, 즉 初期充塡壓力에 依存하므로, 供給된 燃料 중의 炭素가 煤煙으로의 變換率을 煤煙生成率  $C_s$ 로 定義하여 煤煙生成 傾向을 評價하기로 한다.  $C_nH_{2n+2}$ 의 正 파라핀系 燃料를 使用한 경우,  $C_s$ 와  $fv$ 의 關係는 다음과 같이 된다.

$$C_s = \frac{7n+1}{6n} \cdot \left(1 + \frac{1}{\phi_{st}}\right) \cdot \left(\frac{1}{1-DRm}\right) \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{bg}} \cdot fv \quad (2)$$

여기서  $\phi$ 는 혼합기의 당량비,  $f_{st}$ 는 이론燃料酸素比,  $DR_m$ 는 혼합기質量和 不活性가스質量的 比,  $n$ 는 燃料分子中的 炭素原子數,  $\rho_s$ 는 煤煙의 密度 ( $1.8g/cm^{3(8)}$ ),  $\rho_{bg}$ 는 燃燒가스密度이다.

燃燒가스溫度  $T_{bg}$ 는 煤煙粒子로부터의 輻射에 注目하여, 2波長에 있어서 自發光의 強度  $E_1, E_2$ 를 測定하여 다음式에 의해 計算했다.

$$T_{bg} = \frac{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln(\alpha_1/\alpha_2 \cdot \epsilon_1/\epsilon_2 \cdot E_2/E_1 \cdot (\lambda_2/\lambda_1)^5)} \quad (3)$$

여기서  $C_2$ 는 第2輻射定數( $1.438cm \cdot K$ ),  $\lambda$ 는 實效波長,  $\epsilon$ 는 火炎의 射出率이고, 添字 1, 2는 各各 實效波長  $\lambda_1, \lambda_2$ 에 대한 값을 表示한다. 裝置定數  $\alpha$ 와 實效波長  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 黑體爐<sup>(9)</sup>를 利用해서 檢定했다.

當量比  $\phi$ 가 1.9以下인 경우에는 煤煙生成量이 적어 2色法을 適用할 수 없으므로, 簡單한 熱力學的 모델에 의해 計算한 溫度를 使用했다. 燃燒前後에서 比熱과 가스定數가 一定하다고 假定하면 溫度上昇에 의한 壓力上昇이 燃燒가스質량比率  $X$ 에 比例하므로 燃燒가스密度  $\rho_{bg}$ 는 壓力變化로부터 다음式에 의해 計算할 수 있다.

$$\rho_{bg} = \frac{X}{\{1 - (1 - X) \cdot (P_i - P)^{1/n}\}} \cdot \rho_i \quad (4)$$

여기서  $X$ 는  $(P - P_i)/(P_m - P_i)$ ,  $P_i$ 는 初期壓力,  $P_m$ 는 最大壓力,  $n$ 는 포리트로프指數,  $\rho_i$ 는 初期混合기密度이다. 이  $\rho_{bg}$ 와 燃燒가스壓力  $P$ 를 使用하여 狀態方程式에 의해 燃燒가스溫度  $T_{bg}$ 를 구했다. 포리트로프指數  $n$ 은 1.3으로 했는데, 注目하고 있는 時刻이 거의 燃燒終了時, 즉  $X$ 가 1에 가까운 時刻이기 때문에 式(4)의 分母 中 第2項은 거의 0이 되어  $n$ 의 影響은 아주 작다.

Fig. 3에는 當量比  $\phi=2.2$ , 初期壓力  $P_i=0.81MPa$ 에 있어서 測定結果例를 나타낸다. 下段에는 自發光強度 및 透過光強度의 時間變化를, 上段에는 壓力, 煤煙體積濃度  $fv$  및 2色法에 의한 測定燃燒가스溫度를 表示한다. 比較하기 위해 熱力學的으로 計算한 溫度도 表示되어 있는데, 2色法에 의한 溫度와 거의 一致하고 있다. 다른 條件에 있어서도 같은 정도의 一致를 보여주고 있다. 그림 中의 最終 煤煙體積濃度  $fv^*$ 는 이 例에서는 301~350ms의 期間에 대한  $fv$ 의 時間平均値로서 구했는데, 本論文에서 使用한 모든 데이터는 煤煙體積濃도가 一定 値에 到達한 50ms의 連續期間에 대한 平均値로서

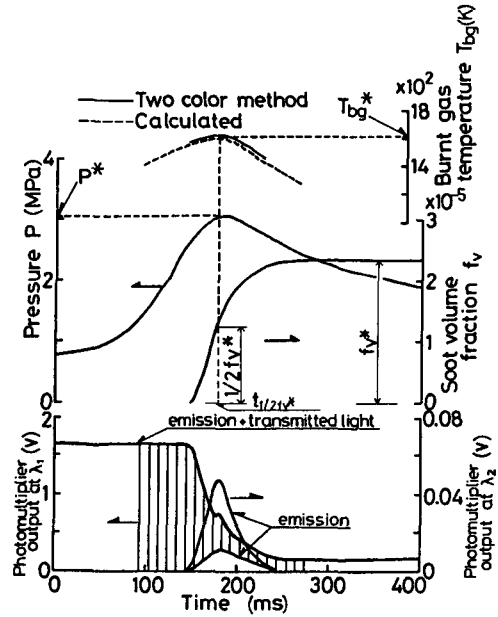


Fig. 3 Typical data of emissions, emitted + transmitted light, pressure P, soot volume fraction  $fv$  and burnt gas temperature  $T_{bg}$  as a function of time. Conditions : laminar combustion, 8 points ignition, equivalence ratio  $\phi=2.2$  and initial pressure  $P_i=0.81MPa$

구했다. 煤煙生成率  $C_s^*$ 는  $fv^*$ 를 利用해서 算出했다.

本 實驗에서는 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼, 煤煙生成期間中 燃燒壓力  $P$ 도 燃燒가스溫度  $T_{bg}$ 도 變化하고 있다. 따라서 本 論文에서는  $fv$ 의 값이  $(1/2)fv^*$ 로 되는 時刻의 壓力과 溫度를 煤煙生成期間中의 代表値로서, 各各  $P^*, T_{bg}^*$ 로 表示하여 데이터를 整理했다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 最終 煤煙生成率 $C_s^*$

Fig. 4는 當量比  $\phi=2.2$ , 初期壓力  $P_i=0.58MPa$ 의 條件에 대한 容器內壓力  $P$ , 煤煙體積濃度  $fv$ , 煤煙生成率  $C_s$  및 燃燒가스溫度  $T_{bg}$ 의 測定例를 보여준다.  $fv$ 는 容器內의 燃燒壓力이 거의 最高로 되었을 때에 增加하기 始作하는데, 이 경우 約 2MPa의 高壓에 대한 煤煙生成이 觀測되고 있다.

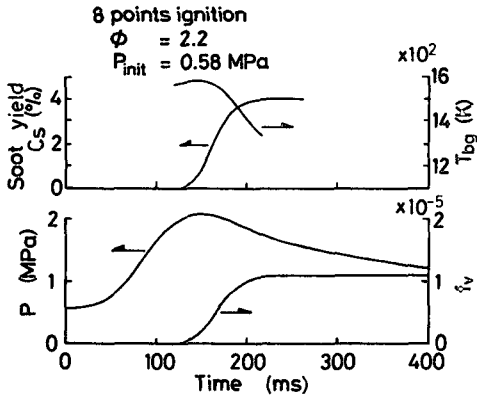


Fig. 4 Typical data of 8 points ignition

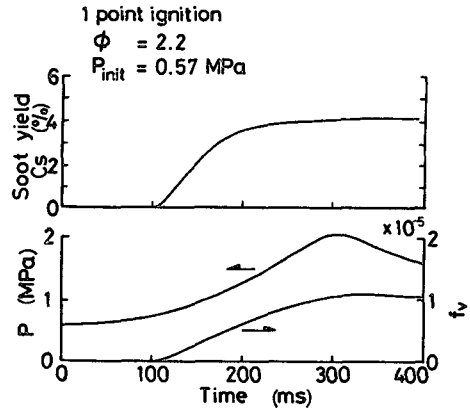


Fig. 5 Typical data of 1 point ignition

燃焼終了時에는 中心部の 8개 層流火炎이 重疊되어 만나 未燃과 既燃가스가 共存하고, 또한 生成된 煤煙粒子가 未燃域의 後火炎에서 生長하기 때문에  $f_v$ 가 一定值로 되기까지는 約 100ms 정도 걸리고 있다.

그런데 Fig. 4에서 念慮되는 점은 燃焼終了後 燃焼가스溫度가 容器壁에의 熱損失에 의해 低下하기 때문에 燃焼生成이 停止한 것이 아닌가 하는 점이다. 이것을 確認하기 위해서 1點點火에 의해 煤煙生成을 觀測해 보았다. 當量比  $\phi=2.2$ , 初期壓力  $P_i=0.57\text{MPa}$ 의 條件에 대한 結果를 Fig. 5에 나타낸다. 이 그림에 의하면 1點點火 프로그래에서 發達하여 傳播한 層流火炎面이 觀測部를 通過한 直後 觀測部의 가스 중에서 煤煙이 生成되는데, 火炎이 進行됨에 따라 觀測部의 가스는 燃焼한 가스의 膨脹에 의해 壓縮된다. 이 때문에 觀測部의 煤煙體積濃度는 煤煙生成이 完了했어도, 壓縮에 의해서 燃焼가 終了될 때까지, 즉 壓力이 最大로 될 때까지 계속해서 增加한다.

本 論文에서는 式(4)의 熱力學的 모델을 利用해서 壓縮에 의한 影響을 考察해 보기 위해서 壓力變化로부터 計算한 燃焼가스密度  $\rho_{bg}$ 와 煤煙體積濃度  $f_v$ 를 式(2)에 代入하여 煤煙生成率  $C_s$ 를 구했다. Fig. 5에 의하면 最高壓力은 8點點火와 거의 같지만, 煤煙生成期間은 約 130ms 정도 걸리고 있다. 여기서 燃焼가스溫度는 觀測部를 通過한 후, 燃焼終了까지 계속해서 上昇하지만, 煤煙生成은 220~230ms의 時刻에서 終了하고 있음이 明白하다. 230ms부터 燃焼終了까지의 煤煙體積濃度  $f_v$ 의 增加는 同 期間中 燃焼한 가스에 의해서 觀測部에 生成된

煤煙이 壓縮되었기 때문이다. 이 觀察로부터 Fig. 4의 8點點火 燃焼의 경우, 一定值에 달한 煤煙生成率은 最終值를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 煤煙生成率  $C_s^*$ 에 미치는 壓力의 影響

Fig. 6은 當量比  $\phi$ 를 파라미터로 한 煤煙生成時의 壓力  $P^*$ 와 最終 煤煙體積濃度  $f_v^*$ 의 關係를 나타낸다. 그림으로부터 當量比  $\phi$ 가 增加할수록  $f_v^*$ 가 增加함을 알 수 있다. 또한  $\phi$ 가 一定한 경우,

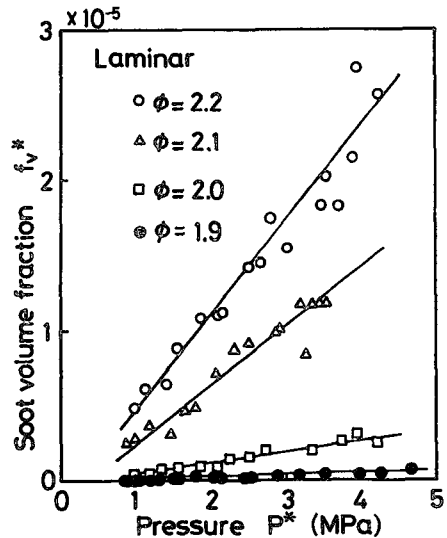


Fig. 6 Final volume fraction of soot  $f_v^*$  in laminar premixed propane-air flames relative to pressure  $P^*$  for each equivalence ratio

$f_v^*$ 는 壓力  $P^*$ 의 增加에 따라 거의 直線의 으로 增加하고 있다. 그러나  $P^*$ 가 높을수록 初期 充填混合氣의 密度도 높아지기 때문에  $f_v^*$ 로서는 煤煙生成 傾向을 比較할 수 없다. 이 때문에 Fig. 7에는  $\phi$ 를 파라미터로 한  $P^*$ 와 煤煙生成率  $C_s^*$ 를 나타낸 것이다. 그림에서  $\phi$ 가 높을수록  $C_s^*$ 가 增加하고, 同 當量比에 대해서는  $C_s^*$ 가  $P^*$ 와 함께 增加함을 알 수 있다. 이 傾向은 MacFarlane 등<sup>(3)</sup>의 定常 豫混合火炎에 있어서 實驗結果와 類似하나, Flower 등<sup>(4)</sup>의 定積 豫混合氣燃燒에 대한 實驗과는 反對結果를 보여주고 있다. 그러나 Fig. 7에는 壓力의 影響과 同時에 溫度의 影響도 包含되었다고 생각되므로, Fig. 7의 각 그래프에 對應하는  $T_{bg}^*$ 를  $P^*$ 에 대해서 表示하면 Fig. 8처럼 된다. 그림에서 壓力이 높아지면 燃燒가스의 單位質量當 燃損失率이 減少하기 때문에  $T_{bg}^*$ 도 높아짐을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7의 데이터에 壓力뿐만 아니라 溫度의 影響도 包含되어 있음을 意味한다.

豫混合氣燃燒에 있어서 煤煙生成에 미치는 溫度의 影響이 以前부터 研究되어 왔는데, 一般의 으로 溫度가 增加함에 따라 煤煙生成率이 減少되는 것으로 알려져 있다. 이것은 Fig. 8의 각 當量比에 대해  $T_{bg}^*$ 가 壓力에 關係없이 一定하다고 하면, Fig. 7에서 보여준 煤煙生成量에 대한 壓力의 依存性이 상당히 顯著함을 暗示하고 있다. 따라서  $C_s^*$

에 미치는 壓力의 影響을 調査하기 위해서는 當量比 一定의 條件에서 燃燒가스溫度를 變化시키는 追加實驗이 必要하다고 생각된다.

Fig. 9는 Fig. 7과 8의 데이터를 利用해서  $T_{bg}^*$ 를 파라미터로 한  $C_s^*$ 와  $P^*$ 의 關係를 나타낸 것인데, 본 實驗의 當量比 範圍內에서는 燃燒가스溫度가 낮은 경우, 煤煙生成量은 壓力의 上昇과 더불어

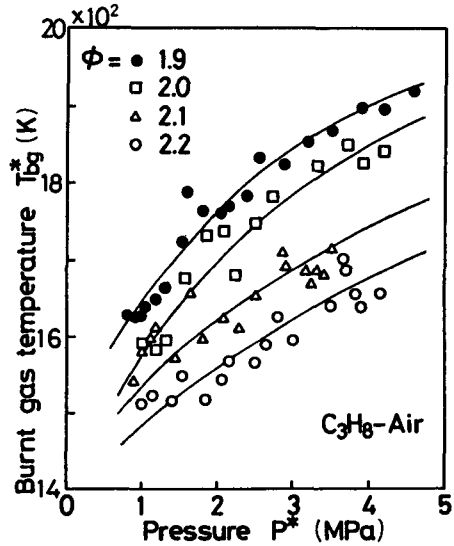


Fig. 8 Burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  relative to pressure  $P^*$  in Fig. 6

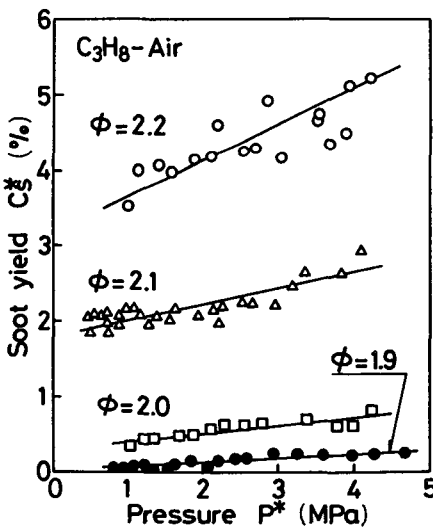


Fig. 7 Soot yield(mass of soot/mass of carbon in fuel)  $C_s^*$  relative to pressure  $P^*$  in Fig. 6

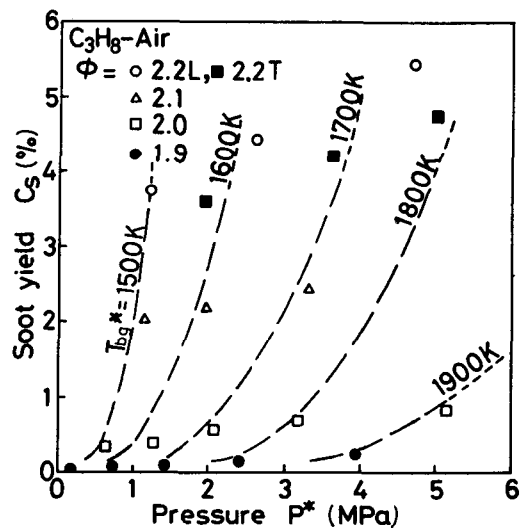


Fig. 9 Correlation between  $C_s^*$  and  $P^*$  with  $T_{bg}^*$  as a parameter in Fig. 6

急激히 增加하는 傾向이 있지만, 溫度가 높아짐에 따라서 壓力의 影響이 작아지고, 同時에 煤煙生成量이 減少함을 알 수 있다. Fig. 9 中の 當量比 兪에  $L, T$ 의 記號가 表示되어 있는데, 前者는 層流燃焼, 後者는 亂流燃焼를 意味한다.

3.3 煤煙生成率  $C_s^*$ 에 미치는 亂流燃焼의 影響

本 實驗은 主로 層流燃焼에 對해 行해졌지만, Fig. 9의 結果에 의하면 燃焼容器 內壁附近에 있어서 溫度境界層內의 溫度가 낮기 때문에, 거기서 煤煙濃度가 높아지는게 아닌가 하는 것이 念慮된다. 亂流燃焼의 경우에는 溫度境界層의 두께도 얇아진다고 생각되므로, 亂流燃焼와 層流燃焼의 實驗結果를 比較하여 溫度境界層이 煤煙生成에 미치는 影響을 調査하기 爲해 亂流燃焼에 있어서 煤煙濃度를 測定했다.

直徑50mm, 높이14mm, 두께2mm의 圓筒에 直徑4mm의 구멍 27개를 鑿은 亂流發生圓筒(구멍의 總面積比 15.4%)를 燃焼室內에 中心을 一致시켜 設置했다. 8點點火 프리그로부터 傳播되어 온 層流燃焼는 이 多孔圓筒의 內側을 通過할 때 亂流火炎으로 된다. Fig. 10은  $\phi=2.2$ 에 對한 層流燃焼와 亂流燃焼의  $P^*$ 와  $T_{bg}^*$ 의 關係를 比較하고, Fig. 11

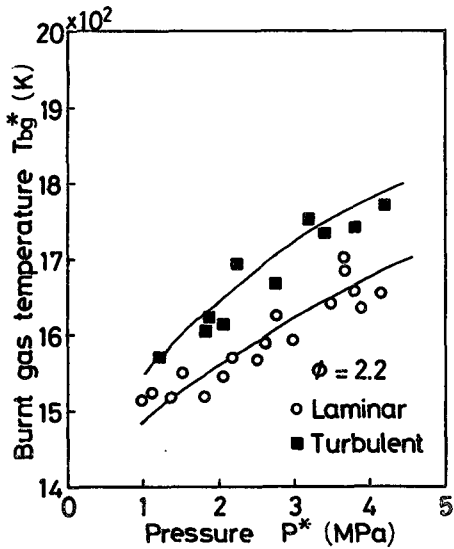


Fig. 10 The comparison between burnt gas temperatures  $T_{bg}^*$  of laminar and turbulent combustion for premixed propane-air mixture

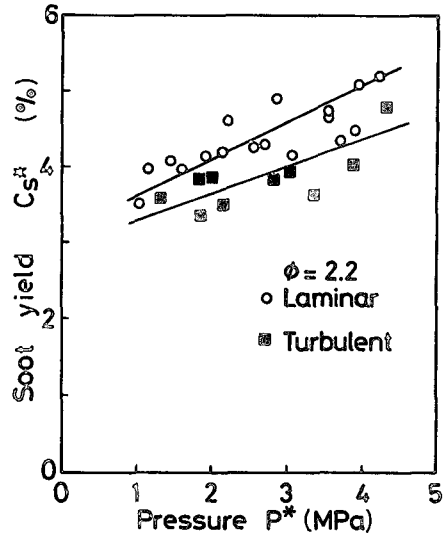


Fig. 11 The comparison between soot yields  $C_s^*$  of laminar and turbulent combustion for premixed propane-air mixture

은 Fig. 10에 對應한  $P^*$ 와  $C_s^*$ 의 關係를 比較하고 있다. 亂流燃焼의 경우, 層流燃焼에 比해  $T_{bg}^*$ 가 平均的으로 100K 정도(6~7%) 더 높다. 이것은 亂流燃焼의 燃焼期間이 層流에 比較해서 25~30% 정도 짧아져 相對的으로 熱損失이 低下하기 때문이다. 이 差에 의해 Fig. 11에서 보여준 亂流燃焼의 煤煙生成量이 6~7% 정도 減少된다. Fig. 10과 Fig. 11의 結果를 整理해 Fig. 9에 表示하여 보면, Fig. 9에서 보여준 것처럼 層流데이터도 亂流데이터도  $T_{bg}^*$ 가 같다면 거의 同一線上에 表示됨을 알 수 있다. 결국 溫度境界層의 影響은 작다고 判斷된다.

3.4 煤煙生成期間  $T_{0.95}$

Fig. 12는 層流燃焼와 亂流燃焼에 對한 最終 煤煙體積濃度  $fv^*$ 와 걸보기 煤煙生成期間  $t_{0.95}$ 의 關係를 보여주고 있다. 여기서 걸보기 煤煙生成期間  $t_{0.95}$ 는  $fv^*$ 가  $fv^*$ 의 95%에 달할 때까지의 期間이다. 이처럼 定義한 煤煙生成期間을 使用한 것은  $fv^*$ 의 時刻를 정확히 把握하기가 困難하기 때문이다.

從來의 定常 豫混合火炎에 있어서 大氣壓 以下에서 的 煤煙生成速度에 關한 研究<sup>(10-14)</sup>에 의하면 煤煙生長이 表面生長反應에 의해 일어나고, 煤煙生成速度가 燃料의 種類나 實驗條件에 關係없이 表面生長變化에 關한 半經驗的인 1次反應式(5)로 表現될

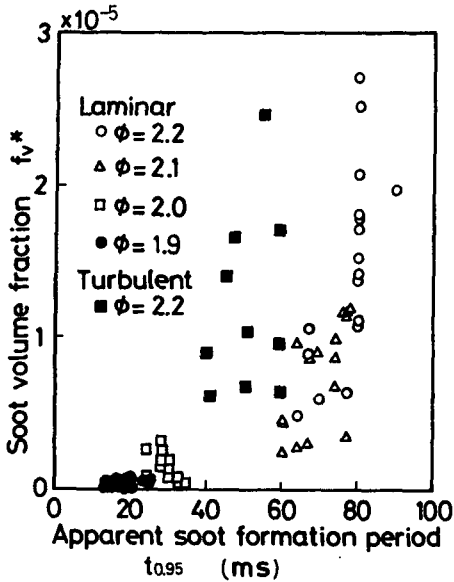


Fig. 12 Final volume fraction of soot  $f_v^*$  relative to apparent period of soot formation  $t_{0.95}$  for both laminar and turbulent flames

수 있다. 또한,煤煙生成速度定數  $k_{sg}$ 는 燃料의 種類, 當量比, 壓力,  $C/H$ 比, 最終煤煙體積濃度 등에 關係없이 溫度만에 依存한다고 알려져 왔다.

$$\frac{df_v}{dt} = k_{sg} \cdot (f_v^* - f_v) \quad (5)$$

式(5)를 積分하면 겉보기 煤煙生成期間  $t_{0.95}$ 와 煤煙生成速度定數  $k_{sg}$ 는 다음과 같이 逆比例 關係를 나타낸다.

$$t_{0.95} = \frac{3}{k_{sg}} \quad (6)$$

따라서  $t_{0.95}$ 도  $k_{sg}$ 와 마찬가지로 當量比, 壓力, 最終煤煙體積濃度 등에 關係없이 溫度만에 依存하고, 溫度가 높아지면  $t_{0.95}$ 도 짧아진다. 본 實驗에서  $t_{0.95}$ 는 15~80ms의 範圍에 걸쳐 있는데, 從來의 定常 豫混合火炎<sup>(10-12,14,15)</sup>의 實驗結果와 각 實驗條件 중 溫度만을 基準으로 이 값을 比較해 보면 본 實驗의 結果처럼 燃燒가스溫度가 1500~1900K의 範圍에서는  $t_{0.95}$ 가 15~80ms정도임을 알 수 있다.

Fig. 12에서 겉보기 煤煙生成期間은  $1 \times 10^{-5}$  ~  $10^{-7}$ 以上的  $f_v^*$ 에 대해 각각 一定하게 됨을 알 수 있는데, 이것은 본 實驗範圍內에서도 煤煙生成速度가 1次反應式(5)로 表現될 수 있음을 暗示하고

있다. 다시 말하면  $(df_v/dt)$ 의 變化가  $f_v^*$ 에 比例함을 意味하고 있다. 그러나 煤煙生成速度를 직접 測定해 相關關係를 알아보아야 하고, 디젤機關 등과 같은 高溫域에서의 追加實驗을 할 必要性이 있다.

#### 4. 結 論

定積容器內的 프로판-空氣 豫混合氣燃燒 걸쳐서 있어서 煤煙生成量을 1~5MPa의 壓力範圍에서 레이저光 減衰法에 의해 調査했다. 當量比 1.9~2.2의 豫混合氣에 대해 얻은 主要한 實驗結果는 다음과 같다.

(1) 壓力이 1MPa에서 5MPa까지 增加할 때, 煤煙生成量은 각 當量比에 대해 50~100% 增加한다.

(2) 亂流燃燒는 層流燃燒에 비해 煤煙生成量이 減少하는데, 이것은 熱損失의 低下에 의해 燃燒가스溫度가 上昇했기 때문이다.

(3) 煤煙生成期間  $t_{0.95}$ 은 煤煙生成速度定數  $k_{sg}$ 와 마찬가지로 溫度만의 函數로 보여지고, 溫度가 增加하면  $t_{0.95}$ 는 짧아진다. 또한, 본 實驗範圍에서도 煤煙生成速度는 最終煤煙體積濃도에 거의 比例하는 傾向이 보인다.

본 研究는 東京工業大學 機械工學科 神本研究室에서 행한 것임을 밝혀두며, 始終 아낌없는 指導를 해 주신 指導教授 神本武征博士님께 感謝드립니다.

#### 參考文獻

- (1) Katota, T., Hiroyasu, H. and Farazandeh-mehr, A., 1977, "A Soot Formation by Combustion of a Fuel Droplet in High Pressure Gaseous Environments," Comb. and Flame 29, pp. 67~75.
- (2) Flower, W. L., and Bowman, C. T., 1984, "Measurements of the Effect of Elevated Pressure on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames," Comb. Science and Tech. 37, pp. 93~97.
- (3) MacFarlane, J. J., Holderness, F.H. and Witcher, F.S.E., 1964, "Soot Formation Rates in Premixed  $C_6$ - and  $C_8$ -Hydrocarbon Air Flames at Pressures up to 20atm," Comb. and Flame 8, pp. 215~229.
- (4) Flower, W. L. and Dyer, T. M., 1980, "Time- and Space-Resolved Measurements of Particu-



- late Formation during Pemixed Constant Volume Combustion," 1980, Spring Tech. Meeting of the Central States Section/The Comb. Institute, Baton Rouge, SAND 79-8798, pp. 1~29.
- (5) Dyer, T.M. and Flower, W. L., 1981, "a Phenomenological Description of Particulate Formation during Constant Volume Combustion," Particulate Carbon Formation During Combustion, pp. 363~386.
- (6) 和田佳之, 内海正文, 河野通方, 飯沼一男, 1981, "Fundamental Study of Combustion Control in Spark Ignition Engine, Part 1 Effect of Number and Location of Spark Gaps," 自動車技術會論文集 23, pp. 12~19.
- (7) Dalzell, W. H. and Sarofim, A. F., 1969, "Optical Constants of Soot and Their Application to Heat Flux Calculations," Trans. of ASME, Journal of Heat Transfer 91, pp. 100~104
- (8) Park, C. and Appleton, J. P., 1973, "Shock-tube Measurements of Soot Oxidation Rates," Comb. and Flame 20, pp. 369~379.
- (9) 松井幸雄, 神本武征, 松岡信, 小栗彰, 1978, "ディーゼル機関の火炎温度の測定に関する研究", 日本機械學會論文集 44-337, pp. 228~238.
- (10) Haynes, B. S. and Wagner, H. Gg., 1982, "The Surface Growth Phenomenon in Soot Formation," Zeit. für Phys. Chemie Neue Folge 133, pp. 201~213.
- (11) Bockhorn, H., Fetting, F., Heddrich, A. and Wannemacher, G., 1984, "Investigation of the Surface Growth of Soot in Flat Low Pressure Hydrocarbon Oxygen Flames," 20th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 979~988.
- (12) Baumgärtner, L., Hesse, D., Jander, H. and Wagner, H. Gg., 1984, "Rate of Soot Growth in Atmospheric Premixed Laminar Flames," 20th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 959~967.
- (13) Bockhorn, H., Fetting, F. and Heddrich, A., 1986, "Investigation of Particle Inception in Sooting Premixed Hydrocarbon Oxygen Low Pressure Flames," 21st Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1001~1012.
- (14) Baumgärtner, L., Jander, H. and Wagner, H. Gg., 1983, "Soot Formation in Various Fuel-Air Flames," Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 87, pp. 1077~1080.
- (15) Mätzing, H. and Wagner, H. Gg., 1986, "Measurements about the Influence of Pressure on Carbon Formation in Premixed Laminar C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Air Flames," 21st Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1047~1055.