

熱線白金抵抗線을 利用한 過渡的 傳播火焰의 火焰溫度測定에 關한 研究

A Study on the Flame Temperature Measurement of the Transiently Propagating Flame by using Platinum-Hot-Wire-Resistance-Thermometry

鄭 仁 碩* 趙 慶 國** 黃 相 淳*

In-Seuck Jeung, Kyung-Kook Cho, Sang Soon Hwang

Abstract

The flame temperature of LPG-air premixture flame was measured by extrapolation of limiting case corresponding to the infinitely thin diameter of Platinum-resistance-hot-wire. LPG-air premixture flame, initially under atmospheric pressure and room temperature, propagates downward from top of the model combustion chamber maintained at constant pressure through the whole combustion process.

Analytical calculation technique was also applied to determine full temperature history or spatial temperature distribution from flame reaction zone to burnt gas region.

1. 序 論

內燃機關에 있어서 燃燒現象을 규명하기 為한基礎研究로서 重要한 因子中에서 傳播火焰의 火焰溫度의 測定을 들 수 있다. 可燃性 混合氣의 火焰溫度의 決定問題는 内燃機關에 있어서뿐만 아니라 諸般 一般的인 燃燒現象에서도 重要한 課題이며 이를 正確히 測定하기 為하여 몇 가지 方法이 提示되었다. 光學的인 方法으로는 오래전부터 使用하여 온 Sodium線反轉法(Sodium Line Reversal Method)⁽¹⁾ 과 最近에 와서 活發한 研究對象이 되고 있는 레일레이散亂法(Rayleigh Scattering Method)나 라만散亂法(Raman Scattering Method) 혹은 Coherent Anti-Stokes Raman

Scattering Method)⁽²⁾ 等을 들수 있다. 그리고 白金抵抗線, 热電對를 使用하는 方法等이 있다. 前者는 光學的으로 計測하는 方法이므로 現在까지 開發된 光學裝備, 光電素子를 利用하면 充分히 正確度있는 測定이 可能하나 光學窓이 있어야 하여 測定流体가 光學的으로 깨끗하여야 하며, 아직도 CARS方式은 基礎研究段階에 지나지 않고 高價의 實驗裝置가 所要된다. 이에 比하여 後者の 測定方式은 光學的인 方法에 比하여 아주 低價의 實驗裝置만으로도 充分히 測定可能하며 利用面이나 取扱面에도 簡便하여 热電對와 細線抵抗線이 많이 使用되고 있다. 그러나, 热電對나 抵抗線도 火焰溫度의 測定에 使用하나 이 方法의 缺點은 使用하는 金屬의 融點에 따라 測定可能

*서울大學校 航空工學科

**서울大學校 航空工學科, 正會員

한 最高溫度가 제限된다. 그리고 辐射에 依한 热損失, 支持棒으로의 傳導에 依한 热損失이 있고, 热慣性에 依한 應答時間遲延과 火焰面이 支持棒에 依하여 攪亂을 받는다는 點等을 缺點으로 들 수 있다. 몇 가지 热損失은 간단히 修正할 수 있으며 支持棒에 依한 攪亂은 本 研究의 實驗結果, 無視할 수 있을 정도임을 確認할 수 있었으나 가장 重大한 問題點은 热慣性에 依한 應答時間遲延이었다.

著者는 直徑이 서로 다른 白金抵抗線을 使用하여 測定코자하는 燃燒反應가스의 火焰面과 白金抵抗線과의 热傳達係數를 소거하는 方式인 2線式修正法(Two-Wires Correction Method) 을導入하여 過渡的으로 傳播하는 傳播火焰의 火焰溫度量 測定한바 있었다.⁽⁹⁾ 그러나 이 方法은 時間에 따라 급격히 變化하는 過渡의 現象에 對하여 定常狀態의 热平衡方程式을 適用하였기 때문에 測定上에 상당한 偏差가 發生하였다.

이에 本 研究에서는 2 가지 새로운 過渡的으로 變動하는 傳播火焰의 火焰溫度測定 方式을 導入하고 그 結果를 檢討하였다. 첫번째 方法은 比較的 應答時間遲延이 짧은 直徑이 서로 다른 4種類의 白金線을 使用하여 各 白金線의 直徑에 따른 指示最高溫度를 測定하여 白金線의 直徑이 無限小의 値을 가질 때의 推定溫度를 外挿法에 依하여 決定하고 이에 對한 檢증을 위하여 最高溫度까지의 risetime을 求하여 이 方法의 妥當性을 檢討하였다. 白金線의 直徑은 20 μm , 25 μm , 30 μm , 50 μm 의 値을 使用하였다.

두 번째 방법은 白金抵抗線의 温度指示가 一次
遲延이라고 가정하고 逆으로 數值의 으로 解析의
으로 火焰温度를 決定하는 方法이다.⁽⁴⁾勿論 이 方
法에 있어서도 火焰面과 白金抵抗線과의 热傳達
係數를 決定하여야 하는 點이 있으나 矢捷한 經
驗式으로부터 豫測할 수 있었다. 本 研究에 있어
서는 Step function形態의 入力에 對한 白金線의
應答結果로부터 폐 接近된 真火焰面 温度分布를
豫測할 수 있었다.

2. 一次遲延反應에 对한 理論解析

白金線에서의 輻射에 依한 热損失을 無視하면

高温ガス内에 있는 白金測定素子에 對하여 單位時間當, 單位길이當 热平衡式은 다음과 같다.⁽⁶⁾

단, c ; 白金線의 比熱, ρ ; 白金線의 密度, λ ; 白金線의 热傳導率, h ; 白金線과 高温ガス사이의 热傳達率, d ; 白金線의 直徑, I ; 白金線에 流하는 電流, r ; 單位길이當 白金線抵抗, T_g ; 高温ガス 温度, T_w ; 白金線의 温度, t ; 時間

그런데 白金線에 流하는 電流는 微少하므로, 이에 依한 Joule熱은 無視할 수 있다. (1)式을 無次元화하기 為하여 다음 無次元量을 導入하면

여기서, ℓ : 白金線의 길이, 첨자 α 는 初期值를 나타낸다. 그리고 (2)式을 (1)式에 代入하면

$$\frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial X^2} + A_1 (A_2 \Theta_B - \Theta_w) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{常數 } A_1, A_2 \text{ 是 } A_1 = \frac{4\ell^2 h}{\lambda d}, \quad A_2 = \frac{T_{go}}{T_{wo}} \phi_1 \text{ 且}$$

마지막으로 热傳達係數 h 는 $h = \frac{\lambda_g}{d} N_u$ 로 決定되는데 여기서 λ_g ; 高溫ガス의 热傳導率, Nu ; Nusselt 數이다. Nusselt 數는 $Nu = 0.42 Pr^{0.2} + 0.57 Pr^{0.31} Re^{0.5}$ 을 使用한다.⁽¹⁰⁾ 또 Pr ; Prandtl 數, Re ; Reynolds 數이다.

高温ガス에 對하여 感知하는 白金線의 應答이
時間的으로 一次遲延이라고 가정하면

여기서, $\bar{\theta}_w$ 는 白金抵抗線길이에 對한 平均無次元溫度로서

$$\tilde{\theta}_w = \int_0^1 \theta_w dX$$

로 表示되어, 實驗結果와 式(3)에서 τ_c 를 決定하면, 實時間 t 에 對한 高溫ガス溫度 T_g 는

로 求할 수 있다.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

本 實驗에 使用한 燃燒室은 $50 \times 50 \times 200\text{mm}$ 的 直六面体의 鐵製燃燒室이며 上端에는 $30\text{mm}\phi$ 直徑의 캡이 設置되어 있어 캡의 開閉動作에 依해 定壓, 定積燃燒가 可能하다. 燃燒室의 正中央에는 白金抵抗線測定素子, 下端에는 點火栓, 上端에는 黃銅製吸排氣用코크, 側面에는 壓電形壓力變換器(piezo-electric pressure transducer, PC B 102A04)가 設置되어 있다. 壓電素子의 信號는 電源, 增幅機(ICP power supply-amplifier, PC B 482A10)로 연결된다. 燃燒室의 上端에는 參考文獻(7)을 參照하기 바란다. 燃燒究의 前後面은 火焰傳播過程을 술리렌高速度寫眞撮影하기 為하여 두께 20mm 의 光學유리窓이 附着되어 있다. 술리렌光學配置는 平面Z方式이며 直徑 $30\text{cm}\phi$, 焦點距離 3m 의 Itoh Koken製 술리렌 오목거울을 使用하였다.⁽⁷⁾前述한 바와같이 白金抵抗線을 使用할 경우에는 支持棒에 依한 火焰面에의 摆亂이豫想되었으므로 이에 對한 影響을 調査하기 為하여 高速度술리렌寫眞을 撮影하였다. Fig. 1에 火焰面이 白金抵抗線을 通過할 때의 火焰傳播過程을 可視化한 結果를 表示한다. 寫眞은 市販LPG-空氣可燃性混合氣混合比 3.3% 때의 전파과정을 2200 pictures/sec 로 撮影한 것이며, 火焰面이 白金線測定素子에 接觸한 後 열마동안 까지도 火焰傳播形態는 明顯한 變動이 없으며 상당히 火焰面이 傳播된 後에야 약간의 摆亂이 一部 觀測됨을 알 수 있다. 즉 白金抵抗線을 使用하는 경우에도 測定自體에는 誤差가 誘發될 可能性은 없다고 思料된다.

白金測定素子는 $20\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ 直徑의 것을 使用하였으며 素子의 길이는 4mm , 8mm , 12mm , 16mm 4種類를 使用하여 Biot數의 影響을 考慮하였으나 數值解析時에 支持棒으로 热損失을 考慮하였기 때문에 影響은 나타나지 않았다. 白金素子의 支持棒으로의 接着은 Spot welder(DISA 55A12/13)으로 行하였으며 接着의 成功與否는 Steromicroscope(Bausch and Lomb)으로 確認하였다. 白金素子를 火焰溫度測定에 使用할 경우에는 火焰溫度가 1000°C 以上의 高溫이기 때문에 白金表面에서의 觸媒反應이豫

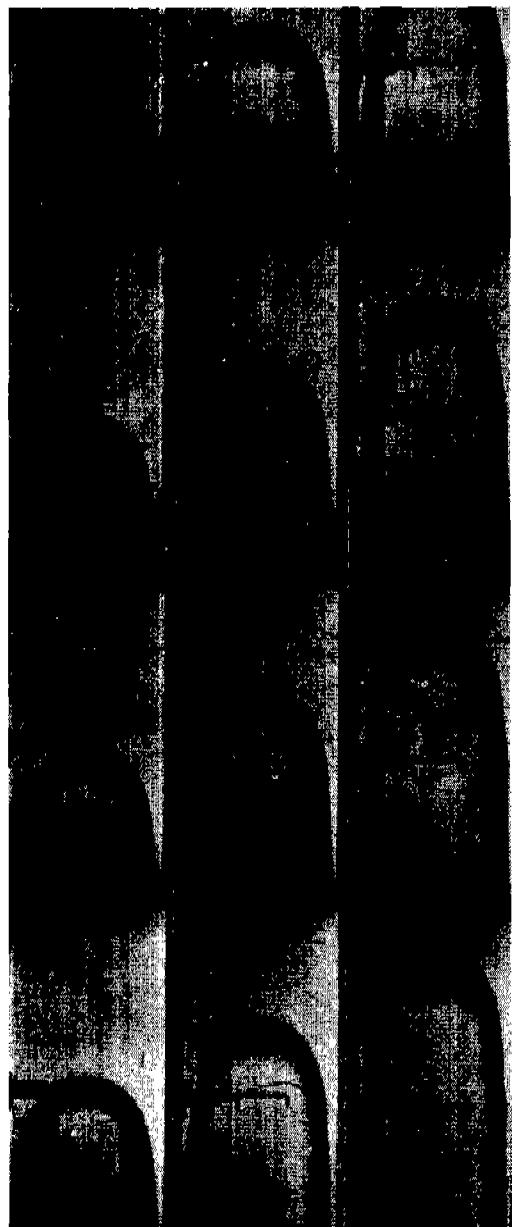


Fig. 1 Schlieren photography of flame propagation near platinum-resistance thermometry supporting prongs.

想되어 白金抵抗線素子表面에 Silicone Coating을 하였다.⁽⁸⁾ Fig. 2에는 Silicone coating하지 않은 白金線(Fig. 2의 A, B, C 경우)과 coating된 白金線(Fig. 2의 D)을 走査電子顯微鏡(Scanning electronmicroscope, JEOL JSM-35)에 依하여 調査

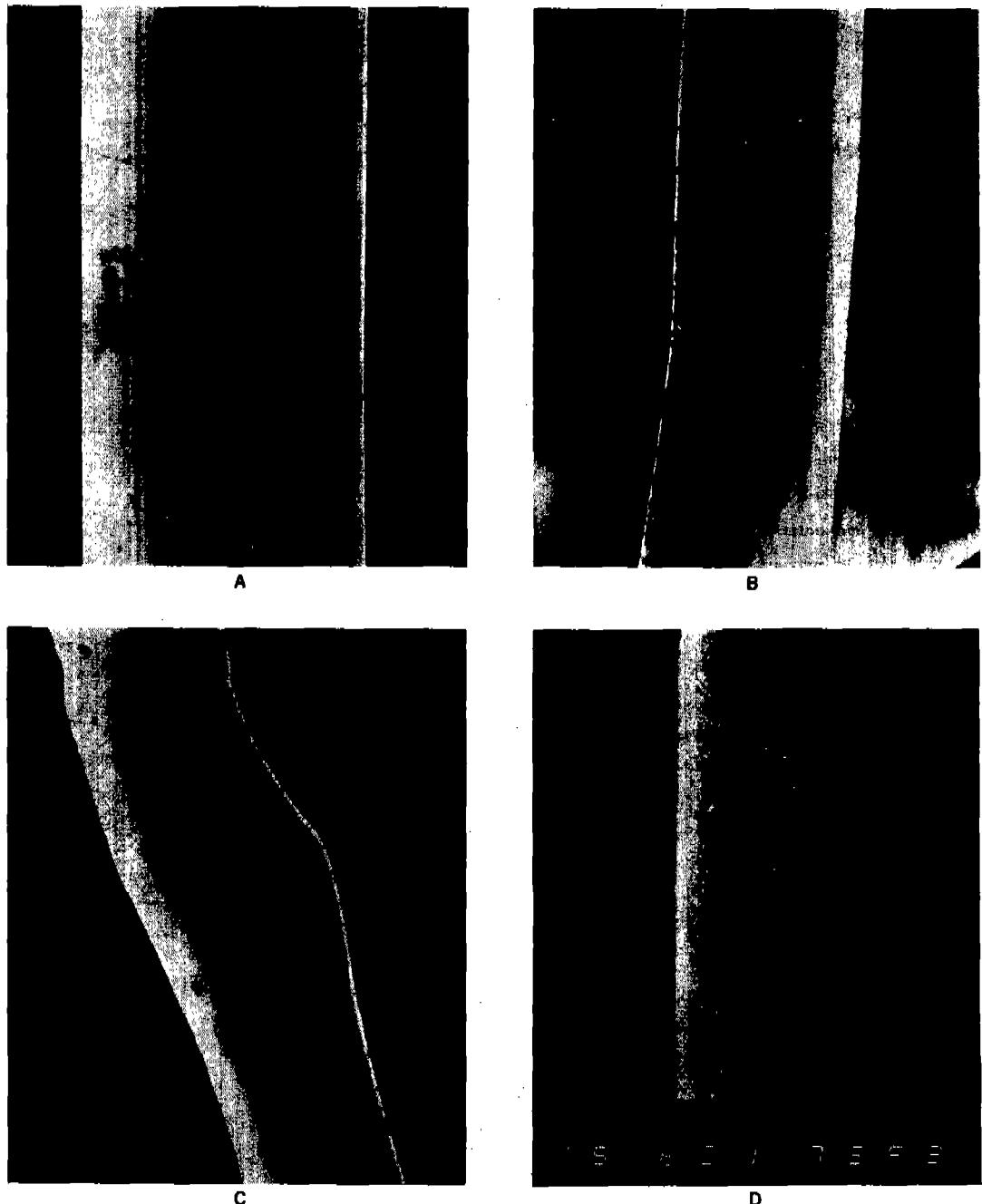


Fig. 2 Electron microscopic photographs (A, B,
C) uncoated (D) silicone coated

하였다. 電子顯微鏡寫眞에서 알 수 있는 것처럼 coating 안된 白金線은 白金線의 表面이 火焰面의 高温에 依하여 갈라지거나(Fig. 2의 A 경우), 주

름이 지거나(Fig. 2의 B 경우), 혹은 白金線이 局部的으로 녹았다가 다시 굳은 形狀(Fig. 2의 C 경우)等이 觀察되었으나 silicone coating된 白金

線 (Fig. 2의 D 경우) 은 白金線表面에 特別한 異常은 發見되지 않았다.

測定回路의 测定原理⁽³⁾는 定電流回路에서 温度의 變化에 따라 變化하는 白金線의 兩端에 걸리는 電壓의 變化를 测定하는 方法으로서, 使用된 定電流電源은 YEW 2854 Precision Current Supply이었으며 白金線의 電壓變化는 2 Channel Digital Memory Oscilloscope (Iwatsu DMS-6430)에 Digital信號로 저장한 後, 小形電子計算機 (D EC, PDP 11-23)에 전송하여 모든 計算을 完了하였다.

使用한 可燃性混合氣는 市販LPG-空氣混合氣이었으며 豐混合流路의 上塞는 參考文獻(3)을 參照하도록 한다. 市販LPG 가스는 通稱 propane 가스로 일컬어지는데 主成分이 propane이고 其他 ethane, iso-butane이 混合되어 있다. 경인에 너지에 依하면 propane이 体積分率로 77%, ethane이 17%, iso-butane이 6% 정도이며 不純物은 0.1% 以下이다. 本研究에 있어서 斷然火焰溫度를 計算할 때에는 ethane과 iso-butane의 百分率이 적고 또 ethane 및 iso-butane의 特性이 propane과 거의 같으며 實際計算結果도 propane만에 依한 計算值와 거의 같아서 使用한 市販LPG의 特性은 純粹propane으로 代表的으로 表示하였다.

4. 實驗結果 및 討論

白金抵抗線에 依하여 测定된 指示火焰溫度의 测定結果의 1例를 混合比 3.3%線徑 20 μm, 線長 8mm에 對하여 Fig. 3에 表示한다. 그림의 가로軸은 燃燒室下端에서 CDI電氣點火한 後로 부터의 時間을 나타낸다. 이 경우는 約 30 msec 경에 火焰面이 白金線에 到達하여 白金線에 걸리는 電壓이 급격히 上昇하고 約 45 msec 경에 最高指示火焰溫度를 보인 後, 서서히 冷却된 다음, 約 60 msec 경에 燃燒가 完了됨을 나타내고 있다. 그 以後 温度가 급격히 低下되는 것은 燃燒室에서 燃燒가 完了될 때쯤에 燃燒室上端의 개방된 캡으로 燃燒火焰이 噴出되면서 燃燒室外部의 大氣中의 空氣가 流入되어 高温燃燒gas와 混合되기 때문이다. 이 過程은 Fig. 1에서 나타낸

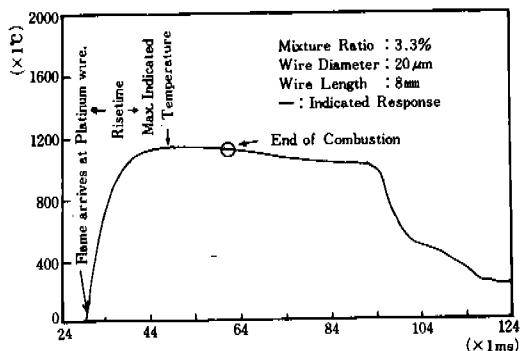


Fig. 3 Oscillogram of Platinum-resistance thermometry.

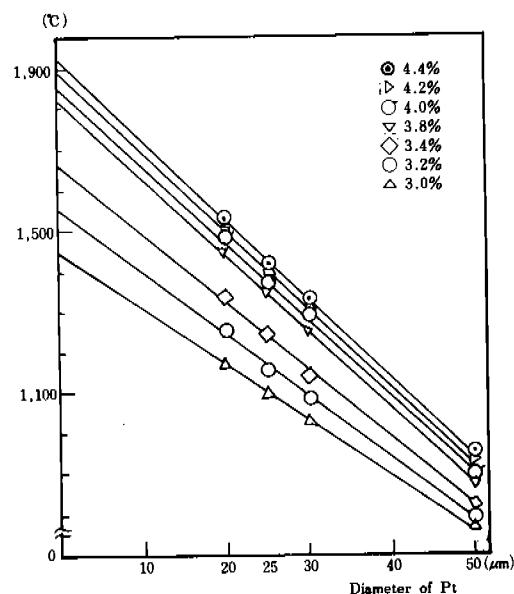


Fig. 4 Maximum flame temperature by extrapolation method.

술리렌高速寫眞에 依하여 確認할 수 있었다. Fig. 3에 表示한 바와같이 各 白金線直徑에 따른 最高指示溫度를 白金線直徑에 對하여 図示하면 가상적으로 白金線直徑이 無限小로 접근할 때의 火焰指示溫度를 外挿할 수 있다. 各 混合比에 따른 测定結果를 Fig. 4에 表示한다. Fig. 4는 定壓燃燒에 있어서 몇 가지 理論燃燒混合比보다 낮은 混合比, 理論燃燒混合比부근의 混合比에서 白金線直徑에 따른 最高溫度의 値을 利用하여 最高火焰溫度를 求한 것이다. 그림에서 直徑에 따른 最高溫度의 函数式이 거의 1次式으로 나타남을

할 수 있다. 각 實驗值들을 각각 1, 2 次式으로 가정하고 最小自乘法에 依하여 計算하였을 때 2 次項의 係數가 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 정도이어서 實驗值의 表示는 1次式으로 가정하여도 充分히 正確함을 알 수 있었다.

以上의 方法과 같이 求한 定壓燃燒時의 市販 LPG-空氣混合氣의 最高火焰溫度를 各 混合比에 對하여 Fig. 5에 表示한다. 그리고 理論的으로 求한 定壓燃燒斷熱火焰溫度도 같이 表示한다. 斷熱火焰溫度計算은 다음과 같은 热解離平衡方程式을 考慮한 것이다.⁽⁹⁾

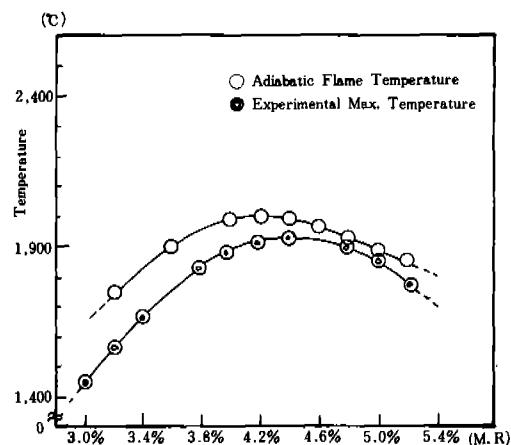


Fig. 5 Comparison of measured flame temperature and adiabatic flame temperature.

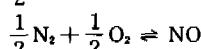
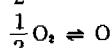
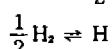
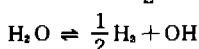
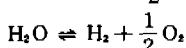
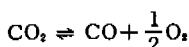


Fig. 5에서 理論的으로 求한 斷熱火焰溫度는 本 實驗의 結果보다 約 5% 정도 높은 값을 나타내고 있으나 이것은 白金線의 支持棒으로의 热損失이 있음을 考慮하면 대체로一致된 것으로 思料된다. 그리고 斷熱火焰溫度와 本 實驗의 測定值가 理論燃燒混合比보다 대략 10% 정도 過濃인混合比에서 最大值를 나타내고 있으며 이는 炭

化水素燃料의 一般的인 特性과도 부합되는 結果이다.

外挿法에 依한 火焰溫度測定의 妥當性을 檢討하기 為하여 Fig. 3에서 定義한 바와 같이 火焰面이 白金線에 到達하여 火焰溫度를 感知하기 시작할 때로부터 最高指示溫度를 나타낼 때까지의 應答時間을 risetime으로 定義하여 各 實驗值들을 白金線直徑에 따라 Fig. 6에 表示한다. 그림

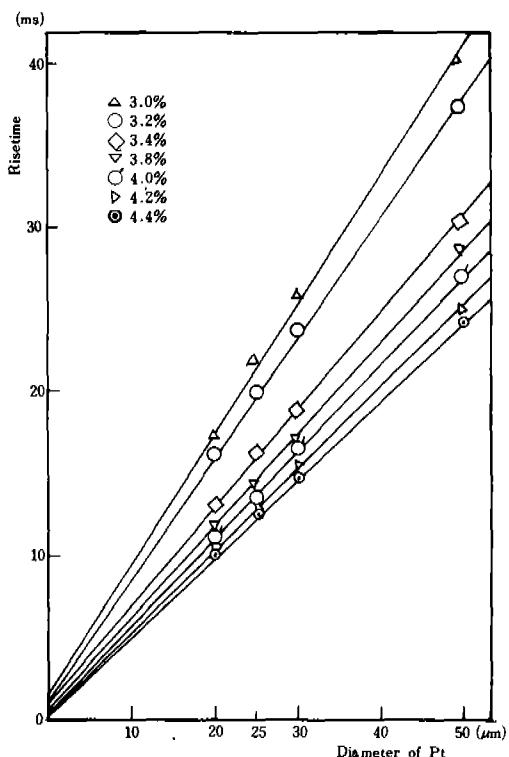


Fig. 6 Risetime to maximum indicated temperature by extrapolation method.

에서 알 수 있는 것처럼 risetime값도 白金線直徑을 無限小로 접근시킨 外挿值는 거의 無視할 수 있을 정도의 較은 값을 가짐을 알 수 있다. 參考的으로 混合比 3.2%에서는 risetime 外挿值는 約 1.5 msec, 混合比 4.4%에서는 risetime外挿值는 約 400 μsec 정도인데 이 結果는 다음에 討議할 두번째 實驗方法에 依하여 求한 값과도 매우 잘 일치하는 것이다. 솔리렌高速度寫眞으로 測定한 火焰傳播速度와 risetime을 使用하여 火焰面두께를 計算하면, 이 實驗의 結果는 火焰面

두께가 대략 6~7mm정도를 나타낸다. 이것은 通常의 베어너에서 测定된 火焰面두께 1mm정도에 比하면 같은 order內에는 있으나 빠높은 값을 나타내고 있는데 이와같은 結果를 表示하게 된 理由는 주로 火焰面의 曲面效果에 기인한 것으로 推定된다. 즉 Fig. 1에서 알 수 있는 것처럼 火焰面이 白金線에 到達할 때는 약간의 曲率을 가지고 있어서 火焰帶가 白金線을 通過하는 時間이 曲率이 없는 理想的인 平面火焰보다 길기 때문이다. 그러나 비록 값의 差異는 있지만 대략 같은 order內에서 火焰面두께를 推定할 수 있다는 點에서 外挿法에 依한 火焰溫度測定法의 妥當性을 檢證할 수 있다.

그러나 上以上에서 求한 外挿法에 依한 傳播火焰의 火焰溫度測定方法으로는 火焰面의 最高溫度(즉, 火焰溫度)는 決定할 수 있으나 傳播하고 있는 火焰面의 溫度分布 그리고 火焰面 背後의 既燃部의 溫度分布에 對한 情報는 얻을 수 없다. 이 點을 補完하는 方法으로서 2章에서 說明한 바와같이 白金線의 反應이 測定코자 하는 火焰面溫度分布의 變化에 對하여 一次遲延을 가지고 있다고 가정하여 逆으로 解析的으로 求한 火焰面 및 火焰背後 既燃ガス部의 溫度分布의 計算例를 混合比 3.3%인 경우에 대하여 Fig. 7에 表示한다. Fig. 7의 (a)는 使用한 白金線中에서 直徑이 가장 가는 경우이고(즉 热慣性이 가장 적은 경우) (b)는 直徑이 가장 깊은 경우(热慣性이 가장 큰 경우)를 나타내고 있으며豫想할 수 있는 것처럼 (a)는 risetime이 짧은데 比하여 (b)는 risetime이 매우 길게 나타난다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이 指示溫度로부터 解析的으로 求한 推定溫度變化形態는 各 計算點의 値을 四角形表示로 나타내었다. 여기서 쉽게 알 수 있듯이 真溫度分布로 밀어지는 溫度變化曲線을 얻을 수 있다. 火焰面이 白金線測定素子에 到達하는 순간 거의 step function形態로 火焰面溫度를 指示하며, 그 背後 既燃ガス部의 溫度分布 特性을 應答하고 있다고 料된다. (a), (b)의 結果는 多少間의 差異는 있으나 計算結果의 曲線이 거의 類似하여, 이 두가지 경우도 risetime은 約 1.5 msec 정도이며 이것은 外挿法에 依하여 求한 ri-

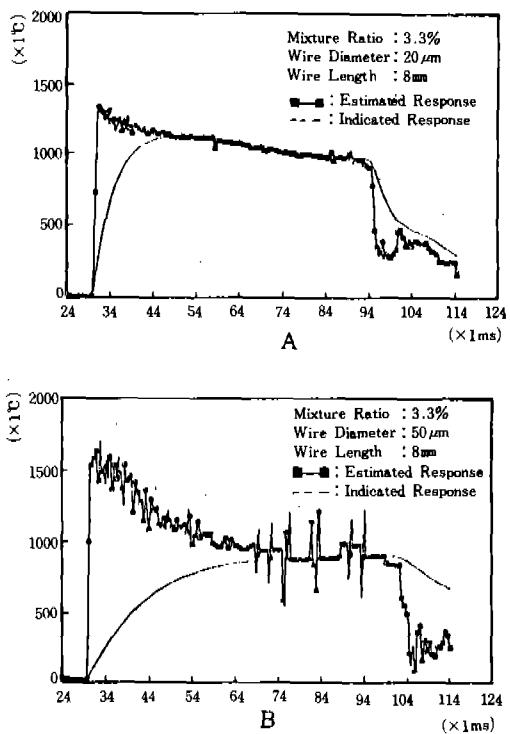


Fig. 7 Estimated temepature history calculated from Platinum-resistance-hot-wire indicated response.

setime外挿值와 거의同一한 값을 나타내고 있다. 解析的으로 求한 溫度分布變化는 火焰面周圍의 最高溫度分布와 火焰面背後의 既燃ガス溫度分布뿐 만아니라 서서히 既燃ガス가 冷却되는 過程의 溫度變化도 상세히 表示하고 있으며 燃燒가 終了된 約 100msec 以後에는 白金線指示溫度는 热慣性의 影響으로 서서히 降下하고 있으나 解析的으로 求한 溫度應答曲線은 급격히 冷却되는 경과를 잘 나타내고 있으며 特히 燃燒室上端 cap으로 噴出되고 다시 外氣空氣가 混入되어 溫度變動이 일어나는 傾向을 잘 보여주고 있다.

그러나 이 方法에 있어서의 큰 問題點은 式(5)에서의 미분항 $\frac{dT_w}{dt}$ 의 變動量이 高溫ガス溫度의 決定에 크게 左右하는 點이다. 왜냐하면 火焰面이 白金線에 到達할 때에는 感知溫度의 變動이 매우 커서 수치미분구간의 설정에 依하여 計算溫度값이 多小 變動하여 Fig. 7 (b)에서 나타난 것

처럼 白金線指示溫度의 變化가 매끄럽지 못하면 미분치가 (+) (-)로 심하게 變化하게 되어一種의 數值計算雜音과 같은 效果가 發生된다. Fig. 7의 (a)와 (b)를 比較하여 보면 (a)의 경우는 대체로 雜音成分이 없으나 (b)의 경우는 매우 雜音成分이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 (b)의 경우가 白金線直徑이 굵은 경우이어서 白金線 半徑方向의 溫度分配의 影響과 白金線과 火焰面사이의 過渡的 热傳達過程의 影響으로 思料된다. 이 問題는 앞으로 더욱 많은 研究가 行하여져야 할 것으로 期待된다.

5. 結論

市販LPG-空氣可燃性混合氣中을 過渡的으로 傳播하는 傳播火焰의 火焰面周圍의 火焰溫度 또는 火焰面溫度分布와 火焰面背後溫度分布를 外插法과 白金線의 反應遲延을 考慮한 解析的方法에 依하여 測定하였으며, 結果를 整理하면 다음과 같다.

1) 定壓燃燒過程에 있어서 白金線의 最高指示溫度와 risetime은 白金線直徑에 關하여 1次函數의 形態로 表示되며, 그函數를 外插하여 火焰面溫度를 求할 수 있었다.

2) 定壓燃燒에 있어서 最高火焰溫度는 混合比 4.4%에서 約 1910°C를 나타내었고, 最低火焰溫度는 混合比 3.0%에서 約 1450°C를 나타내었다.

3) 測定하고자 하는 火焰溫度와 火焰面周圍 및 背後의 溫度分布에 따른 時間의 溫度變動에 따른 白金線의 應答性을 1次遲延으로 가정하여 白金線의 指示溫度로부터 解析的으로 火焰面溫度分布를 計算하여 定量的으로 表示할 수 있었다.

後記

本論文은 1984年度 文教部 學術研究助成費에 依하여 研究되었으며 이에 심심한 謝意를 表한다.

参考文獻

- (1) B. Lewis and G. von Elbe; "Flame Structure"

in Temperature its Measurement and Control in Science and Industry, pp. 707-719, Reinhold Publishing Co. 1941.

- (2) J. R. Smith; "Temperature and Density Measurements in an Engine by Pulsed Raman Spectroscopy," SAE Technical Paper Series 800137, 1980.
- (3) 趙慶國, 鄭仁碩; "傳播火焰에서의 火焰溫度測定에 關한 研究," 大韓機械學會論文集 第1卷 第1號, pp. 182-189, 1977.
- (4) P. A. Croce; "A Method for Improved Measurement of Gas Concentration Histories in Rapidly Developing Fires," Combustion Science and Technology, Vol. 14, pp. 221-228, 1976.
- (5) 八賀正司, 脇坂知行, 浜本嘉輔, 嶋本謙, "冷線を用いた内燃機関シリンド内ガス 溫度の 測定方法(數値解析による方法の検討)," 日本機械學會論文集, B編 49卷 440號, pp. 909-920, 1983.
- (6) G. E. Andrews, D. Bradley and G. F. Hundy; "Hot Wire Anemometer Calibration for Measurements of Small Gas Velocities," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1765-1786, 1972.
- (7) Kyung-Kook Cho and In-Seuck Jeung; "Ignition Characteristics of the Repetitive Electric Sparks," Proceedings of the Second International Pacific Conference on Automotive Engineering, pp. 49-55, 1983.
- (8) J. M. Madson and E. A. Theby; "SiO₂ Coated Thermocouples," Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 205-209, 1984.
- (9) In-Seuck Jeung and Kyung-Kook Cho; "Computation of the Adiabatic Flame Temperature and Chemical Species Composition of Hydrocarbon-Air Flames," Seoul National University, Department of Aeronautical Engineering, Internal Report CL-80-01, 1981.