

熱線濃度 프로우브를 利用한 予混合氣의 瞬間濃度 測定에 關하여

Concentration Measurements of the Premixed Mixture by Using a Hot Wire Concentration Probe

朴 涇 錫*
Kyoung Suk Park

1. 序 言

一般적으로 予混合氣 燃燒에 있어서 最終 연소상태를 결정하는 主要因의 하나는 可燃性 混合氣體의 成分組成(燃料, 酸化劑의 種類와 混合比) 및 物理的 狀態(壓力, 溫度) 등이다. 따라서 予混合氣 燃燒器에 있어서는 燃燒狀態(出口溫度, 速度, 가스組成 등)의 콘트롤을 可燃混合比 設定에 의해서 행하는 것이 比較的 容易한 것으로 알려져 있다. 그런데 可燃性 混合氣는 通常 완전히 均一한 狀態로 이루어지기가 어렵고 當量比 分布의 분산, 時間的인 變動 및 間歇性 등을 포함하고 있다. 따라서 予混合氣 燃燒에 있어서 에 혼합기의 燃料와 空氣의 不均一性은 燃燒特性 및 燃燒排氣成分에 큰 영향을 미치고 있다. 그러므로 予混合氣의 不均一성과 燃燒特性 및 排氣成分과의 關係를 定量的으로 表現하는 것은 燃燒特性的 向上 및 燃燒排氣物의 低減에 큰 역할을 한다고 본다. 이에 대하여는 우선 予混合氣의 不均一度를 어느 一般的인 形으로 表現하는 것이 필요하며 이를 위하여는 混合氣의 不均一성을 時間平均的인 濃度の 空間分布 외에 局所濃度の 時間變動을 포함해서 定量的으로 表示할 것이 必要하다.

周圍氣體와 다른 氣體를 間歇적으로 또는 單

發로 噴射한 경우, 噴流內의 噴射體의 濃度は 時間에 따라 急激히 變化한다. 數ms 사이의 濃度の 測定에는 밸브의 열림시간이 數ms인 電磁式 氣體 採取밸브를 이용해서 氣體를 採取하고, 가스마토그래프 등에 의해 가스分析을 행하는 方法이 있고 주로 피스톤式 內燃機關의 燃燒室內 濃度の 測定에 이용되고 있다. 이 方法은 밸브 열림시간을 短縮시켜도 約 1ms가 限度이고 時間分解能力도 1ms程度가 最短時間이다. 또 同一한 場所에서 濃度の 時間經過를 얻는 데에는 각각의 時間에 대해서 氣體의 採取와 分析을 행하지 않으면 안되어 실제時間의 濃度測定이 不可能하다는 結論이 있다.

最近 레이저 應用技術의 進歩에 의해 라만散亂⁽¹⁾, 레리散亂⁽²⁾, CARS⁽³⁾ 法 등의 濃度瞬間測定이 可能해지고 있고, 점차 현실화되어가고 있다. 이들의 方法은 局所의 瞬間濃度뿐만 아니라 溫度的 同時測定도 可能하게 하는 特徵을 갖고 있다. 그러나 레이저에 의한 測定裝置는 現時點에서는 아직 가격이 高價이고 光學系의 설치 등, 實驗上의 조작이 복잡한 것 등의 缺點을 갖고 있다. 本稿에서는 最近 進展이 현저하고 實用化에 대한 確신을 갖고 있는 熱線濃度 Probe에 의한 瞬間濃度の 測定方法을 소개하고자 한다.

2. 基本原理

熱線濃度Probe는 從來의 定溫度型 熱線風速計의 原理를 應用한 測定裝置이다. 熱線風速計가 密度一定의 測定系에서 流速을 測定하는 것에 대해서, 熱線濃度計에서는 流速을 音速狀態로 하고 密度成分, 混合氣의 濃度成分을 同一의 定溫度型 熱線風速計처럼 이용하여 測定하는 것이다. 그림 1과 같이 電氣的으로 熱線을 가열하며 氣流中에 놓은 경우를 생각하면, 加熱時의 熱線抵抗 R_w 로 熱線에 흐르는 電流 I 일 때, 熱線에서 發生하는 單位時間當의 發生熱量 Q_{out} 는

$$Q_{out} = R_w I^2 \dots\dots\dots(1) \text{이고}$$

L. D. King⁽⁴⁾의 熱線의 冷却法則에 따라서 熱線에 의한 放熱量과 氣流에 의한 冷却이 平行狀態가 될 때 熱線이 잃어버리는 熱量式은

$$Q_{out} = R_w I^2 = (A_1 + B_1 \sqrt{U}) \Delta T \dots\dots\dots(2)$$

$$A_1 = a L_w \lambda, \quad B_1 = b L_w \lambda \sqrt{\rho C_p U d}$$

$\Delta T = T_w - T_a$, a 와 b 는 定數로 表示된다.

- 단, L_w (m) : 熱線의 길이
- d (m) : 熱線의 直径
- ρ (kg/m³) : 氣體의 密度
- C_p (J/kg, K) : 氣體의 定壓比熱
- λ (J/mSK) : 氣體의 熱傳導率
- T_w (K) : 加熱線溫度
- T_a (K) : 氣體의 溫度
- U (m/s) : 氣體의 流速이다.

중래의 熱線風速計에 있어서는 氣流中에 ρ , C_p , λ 의 物性值를 일정하게 하고, 위의 식(2)에 있어서 I 가 定溫度 $\Delta T = \text{Const}$ 下에서 流速 U 만의 함수로 되는 것을 이용하여 流速을 測定하는

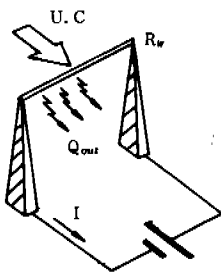


그림 1. 熱線의 放熱量

것이다.

熱線을 濃度測定에 이용하는 데에 있어서는 식(2)에 있어서 流速 U 를 일정하게 하든가 流速 U 가 역시 ρ , C_p , λ 의 함수가 되도록 한다.

斷熱흐름에 있어서 音速 A 는 다음 式으로 表示된다.

$$A = \sqrt{\lambda P / \rho} \dots\dots\dots(3)$$

단열흐름에 있어서 C 를 定數로 취하면

$$A = C \sqrt{\lambda \rho^{k-1}} \dots\dots\dots(4) \text{되고}$$

따라서

$$A = f_1(\lambda \rho) \dots\dots\dots(5) \text{로}$$

音速은 λ , ρ 의 함수로 된다. 또 그 成分에 의한 任意濃度에 있어서 熱傳導率 λ_m 는 Lindsay-Bromley⁽⁵⁾의 理論式에 의하면 다음과 같이 表示된다.

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^2 \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1}{C_i} \sum_{i=1}^2 C_i A U} \dots\dots\dots(6)$$

$$A_U = \frac{1}{4} \left[1 + \left| \frac{U_i}{U} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{3/4} \left(\frac{1 + S_i/T}{1 + S_j/T} \right)^{1/2} \right|^2 \frac{(1 + S_U/T)}{(1 + S_i/T)} \right]$$

$$S_U = \sqrt{S_i S_j}$$

- 단, C (Nm³/Nm³) : 濃度(體積퍼센트)
- μ (kgS/m²) : 粘性係數
- M (kg/Mol) : 分子量
- T (K) : 混合가스의 溫度
- S (K) : Sutherland의 定數

첨자 i, j 는 混合가스의 2成分을 表示한다. 따라서 式(6)은 濃度和 溫度的 함수로 $\lambda = f_2(C, T)$ 로 表示되고, 溫度가 一定할 때에 있어서는

$$\lambda = f_3(C) \dots\dots\dots(7)$$

$$C_p = f_4(C) \dots\dots\dots(8) \text{로}$$

表示될수 있으므로 式(5), (7), (8)로부터

$$Q_{out} = R_w I^2 = f_5(C) \dots\dots\dots(9) \text{로}$$

電流 I 는 濃度 C 의 함수로 된다. 熱線을 흐르는 電流 I 대신에 熱線兩端의 電壓을 V_w 로 하면 式(9)는 다음과 같이 된다.

$$Q_{out} = V_w^2 / R_w = f_s(C) \dots\dots\dots(10)$$

$$V_w = \{R_w f_s(C)\}^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

이상의 식으로부터 熱線부근의 흐름을 音速 또는 流速이 濃度の 함수로 되도록 하면 濃度を 熱線의 出力電壓으로 表示할 수가 있게 된다. 濃도와 熱線의 出力電壓의 관계는 식(11)이 具體的으로 어떤 曲線으로 表示되는가를 實際 實驗的으로 濃도와 熱線의 出力電壓의 관계를 구하여 그 檢定曲線으로 이용하면 된다.

3. 實用 濃度 Probe 및 測定系

本 熱線濃度Probe의 考案은 G. L. Brown⁶⁾ 등에 의해서 시작되었고 그 구조는 그림 2와 같다. 또한 이 試作 Probe를 이용하여 질소 분위기

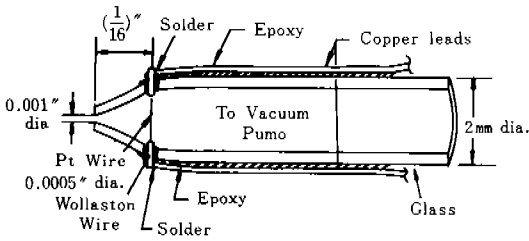


그림 2. 熱線濃度 Probe의 구조

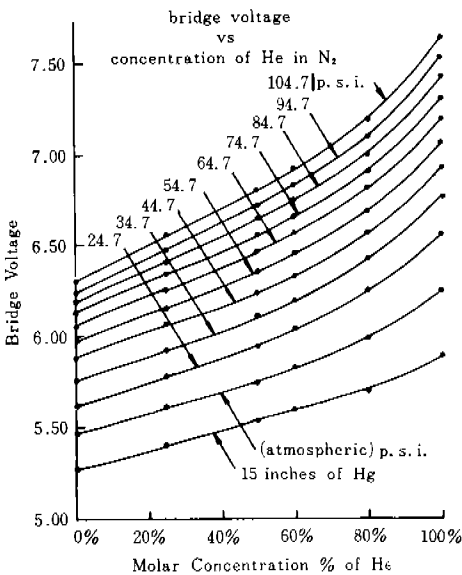


그림 3. N₂ 내의 He 濃度の 檢定曲線

속의 헤리움의 농도와 出力電壓의 관계를 구하고 그림 3에 그 一例를 表示하였다.

桜井, 岸本⁷⁾ 등은 同軸噴流에서의 氣體混合에 관한 實驗에 그림 4와 같은 熱線濃度 Probe를 製作사용하였다. 그림 5는 濃度測定 系統圖를 나타내고 그림 6은 空氣中에 CO₂ 噴流의 濃도와 出力電壓의 關係檢定曲線을 表示하였다. 또한 이 濃度 Probe의 特性을 考察하기 위하여 周圍速度의 영향을 조사한 결과의 一例를 그림 7에 表示하였다.

일련의 熱線濃度Probe를 이용한 순간농도 測定을 要하는 연구 중에서도 本格的인 濃度 Probe

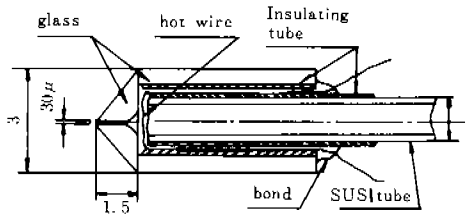


그림 4. 熱線濃度 Probe의 구조

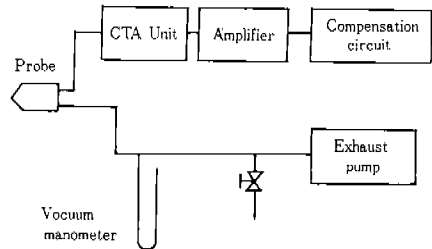


그림 5. 濃度測定系統圖

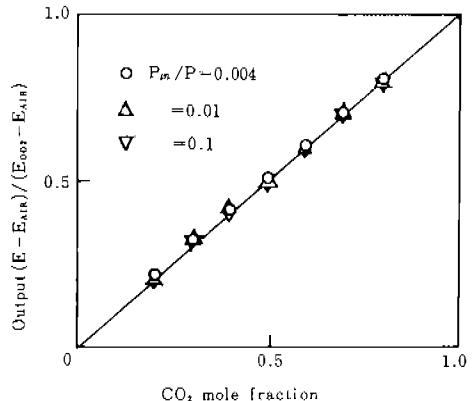


그림 6. 濃도와 Probe 出力

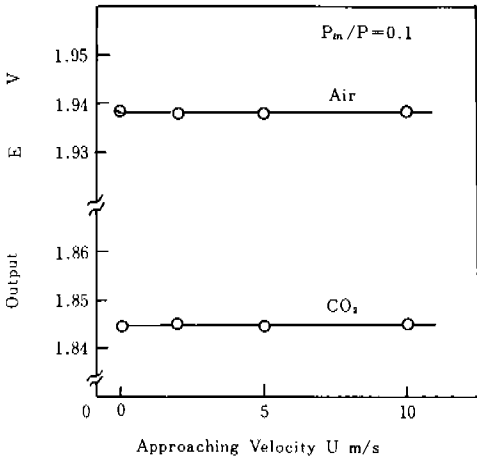


그림 7. 周圍速度的 영향

의 開發은 田邊, 佐藤⁸⁾ 등에 의해서 實用化된 것이다. 그림 8은 田邊, 佐藤 등에 의해서 實用化된 熱線濃度計의 熱線濃度 Probe의 구조를 表示한 것이다.

Probe는 先端에 노즐①을 갖고 後端은 써어징 탱크를 거쳐 진공펌프에 접속되어 있다. Probe 內②를 진공으로 吸引함으로써 採取氣體는 Probe 先端의 노즐①에서 音速 A로 되고 熱線에 도달한다. 音速 A는 노즐上流의 採取空間의 溫度, 壓力이 一定한 경우 採取氣體의 物性值, 吸引 저항, 壓力 등에 의해 결정된다. Probe를 흐름에 直交시키는 경우, Probe 外部의 採取부근의 流速이 音速에 비해서 작게 될 때, 노즐上流의 採取空間의 정체壓力은 流速의 영향을 받지 않는다고 생각한다. 따라서 熱線으로부터의 放熱量 Q_{out} 는 基本

原理에서 記述한 바와 같이 採取氣體의 物性值에 의해 정해진 音速 A 및 λ, ρ, μ 등의 物性值로 주어지고 Probe外部의 氣體流速에 대한 영향은 거의 받지 않는다.

本 濃度測定系는 그림 9와 같이 定溫度型 熱線流速計의 制御回路를 이용하고 있다. 이 制御回路는 熱線의 溫度 T_w 가 一定하게 되도록 抵抗 브리지에 생기는 電位差로부터 피이드백 電流로 變換하고 熱線에 흐르는 電流를 制御하고 있다.

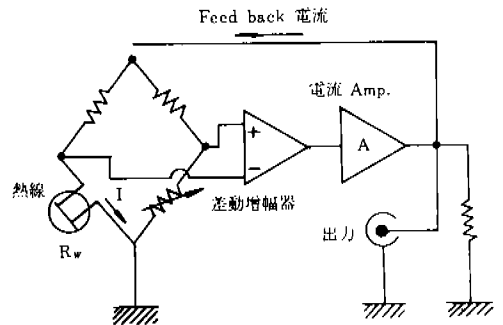


그림 9. 熱線濃度計의 制御回路

그림 10에는 濃度 Probe의 檢定曲線의 一例를 表示하였다. 이 檢定曲線의 再現性은 높고 採取空間의 溫度가 室溫의 範圍에서 變하여도 同一한 結果를 나타내는 것으로 되어 있다.

熱線濃度計의 時間應答性은 Probe先端의 노즐로부터 吸引된 기체가 熱線에 도달하는데 要하는 時間과 熱線自體의 應答特性에 관계한다. 本實用熱線濃度 Probe의 熱線의 直徑은 $5\mu m$, 길이는 $1mm$ 이고 定溫度型 熱線制御回路에 접속한

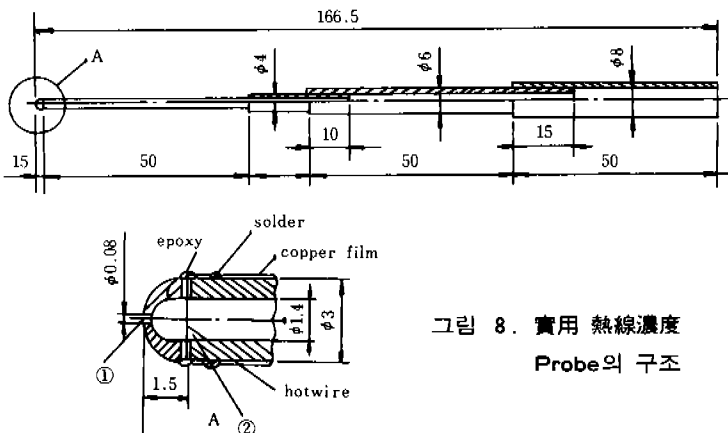


그림 8. 實用 熱線濃度 Probe의 구조

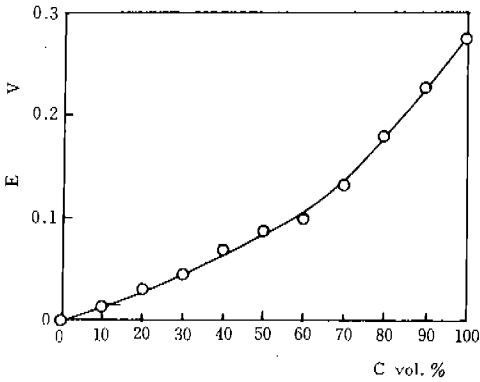


그림 10. 공기중 헬륨농도와 Probe의出力檢定曲線

경우의 주파수 응답은 10KHz 以上으로 노즐로부터吸引된 기체가 熱線에 도달할 때까지의 時間 지연에 比較해서 그 應答은 충분히 빠른 것

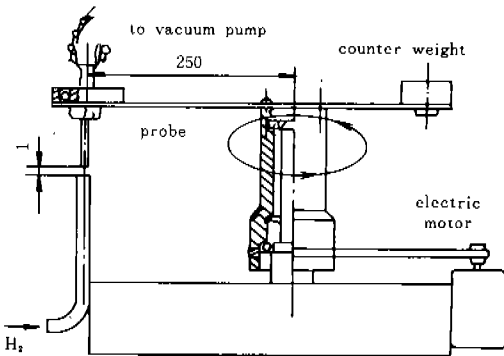


그림 11. 應答特性 實驗裝置

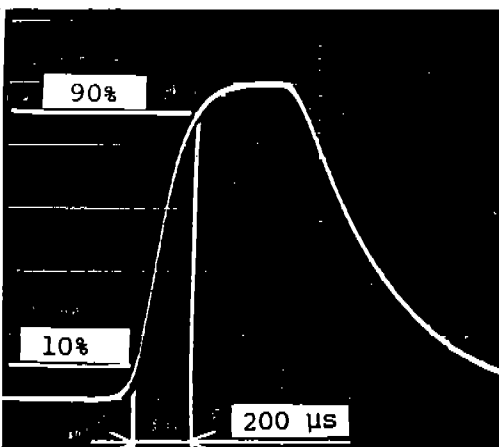


그림 12. 應答特性의 一例

으로 되어 있다.

本 熱線濃度計의 時間應答性을 조사하기 위하여 그림 11에 表示한 裝置를 이용하여 應答時間을 測定한 結果의 例를 그림 12에 表示하였다. 그림으로부터 濃度 10% - 90%의 應答時間은 200 μ s 以下를 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 變動 濃度系의 測定例

그림 13과 그림 14에는 風筒內에 헬륨을 擴散氣體로 해서 噴射하였을 때 時間平均的인 局所濃度의 分布 및 濃度變動 分布를 本 熱線濃度 Probe를 이용하여 구한 例를 表示하였다. 그림에서 時間平均的인 局所濃度의 흐름과 垂直한 方向의 分布는 $Z/D = 0$ 부근에서 피크를 갖는 山型으로 되고, 헬륨 분사에 의한 噴流의 存在를 나타내고 있다.

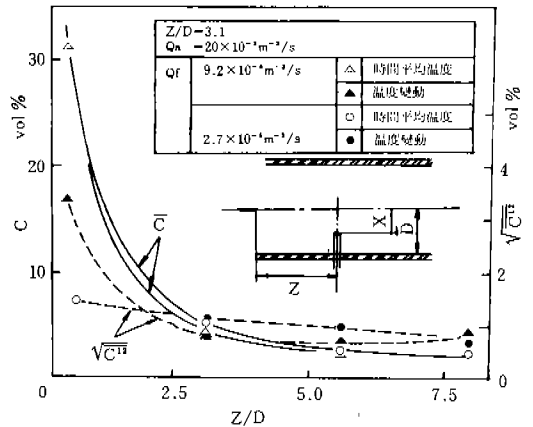


그림 13. 中心軸上의 濃度分布

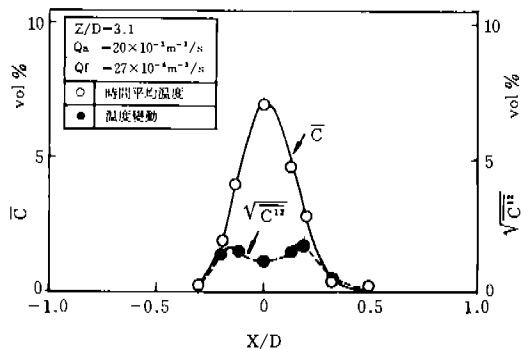


그림 14. 흐름에 수직인 方向의 濃度分布

이 山型의 分布는 周圍氣體流動과 噴射氣體의 運動量比 $\rho_e \bar{U}_r / \rho_a \bar{U}_a$ 의 增加에 따라서 흐름과 垂直한 方向으로 넓어진다. 時間平均 濃度의 中心軸上의 分布는 運動量比의 차이에 關係없이 거의 같은 分布를 나타내며, 下流로 감에 따라서 一定値로 된다.

Z/D=3.1 斷面에 있어서 흐름과 垂直한 方向의 時間平均 濃度分布로부터 고찰하면 噴流濃度의 확대 半角은 約 7° 정도이고 이 噴流가 風筒壁面에 到達하는 것은 330mm 下流이다. 따라서 噴流가 風筒壁面에 가까워짐에 따라서 中心軸上의 時間平均濃度는 一定値로 된다.

한편 濃度變動의 흐름과 수직한 方向의 分布는 헤리움噴流와 周圍空氣流動의 運動量比의 차이에 對應해서 速度의 相對 亂流強度와 같은 特徵의 分布를 나타낸다. 즉, 周圍空氣流動의 運動量이 큰 경우, 噴流中心部に 피크를 갖는 山型의 分布가 되고, 분사기체인 헤리움噴流의 운동량이 큰 경우는, 噴流 境界층 附近에 피크를 갖는 파도형의 分布를 나타내고 있다.

5. 結 言

燃焼工學에 있어서 중요한 瞬間濃度 測定方法의 하나로써 熱線濃度 Probe를 이용하여 熱線制御回路와 조합함으로써 간단히 행할 수 있는 方法을 소개하였다.

記述한 熱線濃度 Probe에 의한 方法은 그 測定範圍가 非燃焼의 경우에 限하지만 比較的 값이 싸고 간편히 濃度의 瞬間計測이 될 수 있다는 利點을 갖고 있다. 特히 予混合氣의 形成에 관한 研究에 그 利用도가 클 것으로 사료된다.

後 記

本稿에서 소개한 資料는 筆者가 一年間 文獻部 海外派遣研究 教授로 파견되어 研究를 行한

慶應義塾大學 理工學部 佐藤豪教授 研究室에서 얻은 것이다.

筆者가 파견時에 행한 予混合氣 形成에 관한 實驗에도 直接 本 熱線濃度 Probe를 製作 사용하였으며, 現在 本人 研究室에서는 關聯研究에 使用하고자 製作試驗중에 있다. 그러나 아직 확실한 研究의 成果를 내고 있지 못하여 충분한 利用의 소개를 하지 못함을 유감으로 생각하며 조금이나마 참고가 되었으면 바란다.

參 考 文 獻

- 1) Johnston, S. C., Robinson, C. W., Rorke, W. S., Smith, J. R. and Witze, P. O.; "Application of Laser Diagnostics to an Injected Engine," SAE Trans. 790079 (1979)
- 2) Dyer, T. H.; "Rayleigh Scattering Measurements of Time-Resolved Concentration in a Tubulent Propane Jet," J. of AIAA. 17-8, pp. 912-914, 1979
- 3) Eckbreth, A. C.; "CARS Investigations in Flames," 7th Symposium (International) on Combustion, pp. 975-983, 1978
- 4) L. D. King; Phil. Trans. Roy. Soc., p. 264, 1914
- 5) A. L. Lindsay and L. A. Bromley; "Thermal Conductivity of Gas Mixtures," Ind. Eng. Chem., 41, p. 1345, 1949
- 6) G. L. Brown and M. R. Rebollo; "A Small Fast-Response Probe to Measure Concentration of a Binary Gas Mixture," J. of AIAA, 10-5, p. 649, 1972
- 7) 桜井, 岸本; 第20回 燃焼シンポジウム前刷集, p. 293, 1982
- 8) 田辺, 佐藤; "高速應答熱線風速計의 實用化와 應用," 日本設計製圖學會誌, NO. 79-1, p. 75, 1979