

定積 豫混合氣 燃燒에 있어서 2領域 모델 및 2色法에 의한 燃燒溫度 比較에 關한 研究*

裴明煥** · 李昇揆*** · 金成泰***

A Study on Comparisons Between Combustion Temperatures Calculated by Two-Region Model and Measured by Two-Color Method in Premixed Constant-Volume Combustion*

M. W. Bae** · S. K. Lee*** · S. T. Kim***

Key words : Constant-Volume Combustion Chamber(定積 燃燒器), Burnt Gas Temperature(燃燒가스溫度), Two-Color Method(2色法), Two-Region Model(2領域 모델), Laminar Combustion(層流燃燒), Transmissivity(透過率)

Abstract

A constant-volume combustion chamber is developed to measure the burnt gas temperature over the wide ranges of equivalence ratio from 1.5 to 2.7 and pressure from 0.1 to 6 MPa by two-color method. The combustion temperature is also calculated by the conventional two-region model. The premixed fuel rich propane-oxygen-inert gas mixtures under high pressures are simultaneously ignited by eight spark plugs located on the circumference of combustion chamber with 45 degree intervals. The eight converging flames compress the end gases to high pressures. The transmissivity in the chamber center during the final stage of combustion at the highest pressure is measured by in situ laser extinction method. Comparisons are made with the combustion temperatures between two-color method and two-region model. It is found that the burnt gas temperature measured by two-color method is higher than that calculated by two-region model because of being the negative temperature gradient on the calculation and the temperature distribution of light path-length on the measurement, and the burnt gas temperature for the turbulent combustion is higher than that of the laminar combustion under the same conditions because the heat loss for turbulent combustion is lower due to the shorter combustion period.

* 韓國船用機關學會 春季學術大會(1997. 4. 26)에서 發表(원고접수일 : 99년 1월)

** 慶尙大學校 工科學 機械設計學科, 生産技術研究所

*** 慶尙大學校 農科學 農業機械工學科

1. 緒 論

實際엔진이 要求하고 있는 高效率, 低排氣 등을 滿足시키기 위해서는 燃燒室內에서 일어나는 諸般 現象을 理解하는 것이 아주 重要하다. 그러나 實際엔진의 燃燒現象은 複雜해서 調査하는 것이 簡單하지 않기 때문에, 엔진內의 燃燒過程을 單純化한 모델링에 의해 調査하는 것이 燃燒現象을 理解하는데 도움이 되고, 또한 貴重한 資料로 活用될 수 있음이 立證되어 왔다. 最近, 이러한 여러 가지 모델化 實驗裝置가 開發되고 있지만, 有用한 資料를 얻기 위해서는 좋은 特性 및 實用的인 모델裝置를 活用해서 얻어진 實驗 데이터로부터 實際의 燃燒現象과 比較하고 確認하여야 한다. 이와 같은 모델 實驗裝置中의 하나로서 自動車엔진의 上死點附近에서 發生하는 實際의 燃燒過程의 特性에 接近하여 시뮬레이션하기 위한 單發의 定積 燃燒器를 以前부터 設計하고 製作하여 使用해 왔다.

和田 등¹⁾은 가솔린엔진 燃燒制御 觀點의 基礎研究로서 定積容器內의 層流 프로판-空氣 豫混合氣에 있어서 點火源의 數와 配置가 燃燒過程에 미치는 效果를 調査한 結果, 點火源의 數와 配置에 의해 火炎面積의 時間的 變化가 크게 다르다는 것과, 火炎面積의 時間的 變化에 隨伴해서 壓力 上昇率 이 크게 變化한다고 했다. 또한 燃燒時間을 短縮시키기 위해서는 各 點火源에서의 火炎傳播距離가 같게 되도록 點火源을 配置하는 것이 有利하다는 것과 最高 壓力값은 燃燒가스가 壁面에 接觸하는 面積에 대한 時間積分의 增加와 함께 低下한다고 했다.

浜本 등²⁾은 定積 燃燒器內의 CH₄-空氣 豫混合氣에 多孔板을 急速하게 움직여서 亂流을 만들어 電氣불꽃에 의해 點火한 亂流火炎을 슈리렌寫眞에서 觀察함과 同時에 레이저 流速計에 의해 亂流을 計測하고, 이 값에 의한 燃燒速度 및 燃燒領域 두께를 調査한 結果, 火炎傳播 및 壓力上昇은 亂流強度의 增加에 따라서 빨라지지만, 같은 火炎體積에 比較하면, 亂流가 強할수록 壓力上昇이 작아지고, 또한 亂流強度가 增加하면 亂流火炎의 燃燒領域 두께 및 燃燒速度가 增加한다고 했다.

Kamimoto 등³⁾은 定積容器內의 프로판-酸素-不

活性价스 豫混合氣 燃燒에 있어서 0.4~5.8 MPa의 넓은 壓力範圍에 대해 지금까지 不明確했던 壓力, 溫度 등이 煤煙生成에 미치는 影響을 레이저光 減衰法에 의해 調査하였다. 그들은 當量比 2.1에 있어서 初期壓力, 不活性价스 組成 및 酸素의 體積比率를 變化시켰을 境遇, 煤煙生成量은 壓力과 溫度만으로 決定되고, 酸素濃도의 影響은 보이지 않는다고 했다. 또한 煤煙生成量은 溫度가 낮은 境遇는 壓力의 增加에 따라 急激히 增加하지만, 溫度가 높아짐에 따라 壓力 依存성이 약해진다고 했다. 그러나 同研究에서는 溫度를 熱力學的 모델에 의해 計算한 값을 使用했다.

最近, 藤本 등⁴⁾은 定積容器內에 가스混合氣를 燃燒室 接線方向으로 噴射하여 燃燒室 中心을 基準으로 한 濃度形態 및 그곳으로부터 火炎傳播方向으로 濃度差를 變化시킨 프로판 및 水素의 層狀混合氣를 燃燒시켜 그 때의 燃燒壓力, 燃燒火炎傳播 狀況 및 既燃燒가스中の NO_x 濃度を 測定하고, 混合氣 濃度分布의 變化가 燃燒排氣特性에 주는 影響에 대해서 調査했다. 그 結果, 均一한 混合氣 分布와 比較하여 點火位置의 濃도가 높아질수록, NO_x 排出量이 平均 空氣過剩率의 稀薄側에서 增加하고, 過濃側에서 減少하는 反面에, 點火位置의 濃도가 낮아질수록, 過濃側에서 NO_x 排出량이 增加하고, 稀薄側에서는 減少한다고 했다.

城戶 등⁵⁾은 定積 燃燒器를 利用하여 水素混合氣의 亂流燃燒機構에 대해서 選擇擴散의 效果에 着眼하고, 그 效果를 받아 變化하는 局所 燃燒速度에 대해서 定量的으로 考察하였다. 그들은 層流燃燒速度를 맞춘 水素混合氣에서는 當量비가 작을수록 亂流에 의한 燃燒促進效果가 顯著하고, 亂流燃燒速度도 增加하며 消災限界가 커진다고 했다.

其他 混合氣의 亂流燃燒速度⁶⁾, 均一混合氣의 燃燒室內 旋回亂流 特性 및 時間的 變化⁷⁾, 均一混合氣의 火炎傳播速度, 未燃가스速度, 層流 및 亂流燃燒速度⁸⁾, 豫混合 亂流火炎領域의 平均 두께⁹⁾ 등 定積 燃燒器를 利用한 研究例가 많이 있다.

最近, 國內에서도 定積 燃燒器를 利用하여 煤煙生成¹⁰⁾, 亂流 豫混合火炎의 傳播速度¹¹⁾, 亂流強度 및 點火에너지¹²⁾, 豫混合 亂流火炎의 構造¹³⁾, 點火時期¹⁴⁾ 등에 관한 研究를 하고 있다.

以上, 定積 燃燒器를 利用한 몇 가지의 例를 調査해 보았는데, 各各 特徵을 가지고 火炎, 煤煙生成, NO生成, 溫度, 亂流, 火炎核 등 여러 가지 燃燒 診斷에 대한 研究를 하고 있다.

本 研究에서는 디스크型 燃燒器의 周邊部에서 8點 同時點火를 시켜, 8個의 火炎이 收束하는 容器 中心部의 高溫·高壓 燃燒가스를 觀察하는 새로운 方式¹⁵⁾을 採擇하여, 高壓下의 가스移動이 없는 燃燒器 中心部에서 2色法을 適用하여 燃燒가스溫度를 定量的으로 測定하고, 이러한 測定溫度를 熱力學的의 모델에 의해 計算한 溫度와 比較해 보았다.

2. 熱力學的의 모델

本 研究에서는 以前부터 豫混合燃燒에 活用되고 있는 容器內部를 燃燒 및 未燃燒 領域으로 나누는 熱力學的의 2領域 모델¹⁶⁾을 考慮하여 다음과 같은 假定下에 燃燒溫度를 計算했다.

- (1) 燃燒室內的 燃燒 및 未燃 가스는 各各 時間的 및 空間的으로 均一하다.
- (2) 各 瞬間에 있어서 兩領域은 化學的 및 熱力學的의 平衡이 成立한다.
- (3) 燃燒 및 未燃 領域에서 가스로부터 容器壁面으로의 熱傳達係數는 같다.
- (4) 燃燒가스 容器壁面으로의 傳熱面積은 燃燒體積比率에 比例한다.

上記의 假定下에 兩領域에 대해서 다음과 같은 6個의 方程式을 세운다.

燃燒領域 에너지式 ;

$$dQ_1 - dQ_{11} = dU_1 - h_2 dm_1 + PdV_1 \quad (1)$$

未燃領域 에너지式 ;

$$-dQ_{12} = dU_2 - h_2 dm_2 + PdV_2 \quad (2)$$

燃燒領域 狀態方程式 ;

$$PdV_1 + V_1 dP = m_1 R_1 dT_1 + R_1 T_1 dm_1 \quad (3)$$

未燃領域 狀態方程式

$$PdV_2 + V_2 dP = m_2 R_2 dT_2 + R_2 T_2 dm_2 \quad (4)$$

質量保存式 ; $dm_1 + dm_2 = 0$

$$(5)$$

體積保存式 ; $dV_1 + dV_2 = 0$

$$(6)$$

여기서, m = 質量(kg), Q = 發熱量(kJ), U = 內部에너지(kJ), h = 엔탈피(kJ), RMP = 容器內 가스壓力(MPa), V = 體積(m³), Q_l = 熱損失(kJ), R = 가스常數(kJ/kg·K) 및 T = 溫度(K)이고, 添字 1과 2는 燃燒 및 未燃 領域을 나타낸다.

燃燒領域 가스常數와 定積比熱은 CO₂, CO, H₂O, H₂, N₂ 등 11種의 燃燒가스 生成物에 대한 平衡濃度로서 計算하고, 未燃領域의 가스常數와 定積比熱은 反應物의 物性값을 利用하여 計算했다. 熱傳達係數는 斷熱火炎溫度를 假定한 境遇의 燃燒終了時 壓力과 實測한 燃燒終了時 壓力과의 差로부터 假定 (3)과 (4)에 의해 計算했다. 燃燒室內的 壓力 測定값를 入力하여 이들 6個의 6元 連立一次 微分方程式을 풀면, 구하고자 하는 燃燒溫度 $T_{bg}(T_1)$ 를 얻을 수 있다. 計算은 Gauss 消去法에 의해 1 ms의 間隔으로 했다.

3. 實驗 裝置 및 方法

3.1 實驗裝置

高溫·高壓下의 燃燒가스溫度를 測定하기 위하여 Fig. 1과 같은 定積 燃燒器를 製作했다. 燃燒室은 直徑 100 mm, 두께 14 mm의 디스크型이고, 燃燒室 周邊에는 45° 間隔으로 8個의 點火플러그가 設置되어 있다. 容器內에 充塡된 프로판(純度 99.5%)—酸素—不活性가스의 燃料過濃 豫混合氣를 8個의 點火플러그에 의해 同時點火하면, 火炎은 周邊部로부터 中心을 향해 未燃領域을 壓縮하면서 傳播하고, 中心部가 最後에 燃燒한다. 燃燒室 中心의 上下面에는 直徑 10 mm의 유리窓이 設置되어 있고, 이 窓을 통하여 透過光 減衰法에 의하여 透過率을 測定한다. 이 方式에 의하면 觀測部의 豫混合氣는 가장 高壓이 된 燃燒終了時에 定壓燃燒하고, 觀測部의 가스가 移動하지 않는 長點이 있다. 또한, 充塡 混合氣의 初期壓力를 變化시킴에 따라 燃燒壓力를 쉽게 바꿀 수 있다.

燃燒室 側壁에는 壓力測定用的 스트레인 게이지式 壓力測定器 및 初期溫度 測定用的 直徑 0.3 mm의 K型(chromel-alumel) 熱電對가 設置되어 있다. 또한 眞空펌프로부터의 吸引, 混合氣의 吸入

및 燃燒가스의 排出에 利用되는 1個씩의 벨브가 上下의 덮개에 各各 附着되어 있고, 유리窓面에 是 水蒸氣의 凝縮을 防止하기 爲하여 容器全體를 리본 加熱器에 의해 420 K로 加熱하였다.

Fig. 2에는 透過率과 2波長의 自發光強度를 測定하기 爲한 光學系 및 데이터 處理系를 보여주고 있다. 光源은 He-Ne 레이저(波長 632.8 nm, 出力 1 mW)를 利用하고, 레이저의 透過光強度와 煤煙으로부터의 自發光強度를 分離하기 爲하여 브라그셀(Bragg Cell)를 使用해서 레이저光을 周波數 1 kHz로 斷續的으로 入射한다. 本 實驗에서는 觀察領域의 燃燒室 中心附近에 對한 平均的인 透過光을 測定하기 爲하여 그림과 같은 光學系에 의해 레이저로부터의 光을 擴大해서 使用한다. 레이저光을 直接 入射하는 方法도 試圖해 보았지만, 二 方法의 透過率 測定값은 거의 一致했다. 燃燒器는 浮力의 影響을 작게 하기 爲하여 水平으로 設置하고, 브라그셀로부터 나온 光이 直徑 10 mm의 觀察用 유리窓에 充分히 들어갈 수 있도록 2個의 볼록렌즈에 의해 直徑 約 20 mm의 平行光으로 擴大했다. 擴大된 光은 反射鏡에 의해 直角으로 굽어져 觀察用 유리窓을 通過하여 燃燒室內을 貫通한다. 貫通된 光은 또 다른 反射鏡에 의해 다시 直角으로 굽어져 實效波長 $\lambda_1 = 633.2$ nm의 透過光 및 煤煙의 自發光 強度, $\lambda_2 = 489.6$ nm의 自發光 強度가 干涉필터를 通過하여 마이러膜(Mylar screen)에 當

은 후, 이들 強度를 光電子倍增管에 의해 各各 測光한다. 壓力測定器 및 光電子倍增管의 出力은 웨이브 메모리(8 bits, 8192 words) 및 디지털 스트레지 오실로스코프(8 bits, 4 kwords)에서 A/D 變換하여 確認한 후, 컴퓨터에 轉送하여 壓力, 透過率 및 燃燒가스溫度를 算出한다.

3.2 2色法에 의한 燃燒가스溫度 測定 方法^{17, 18)}

測定값比로부터 燃燒가스溫度를 구하는 相對값 測定法에서는 測定時와 檢定時의 測定裝置 感光特性이 같으면, 入射光量에 依存하지 않은 溫度를 正確하게 구할 수 있다. 波長 λ , 溫度 T 에 있어서 黑體의 單色 輻射強度 $e(\lambda, T)$ 는 黑體의 單位面積에서 單位時間에 放出되는 波長 λ 의 輻射에너지인데, 火炎으로부터 波長 λ 에 있어서 自發光을 檢出한 檢出器의 出力을 $E(\lambda, T_{bg})$ 라 하면, 煤煙粒子로부터의 輻射에 注目하여 2個의 波長 λ_1, λ_2 에 있어서 檢出器의 出力 E_1, E_2 를 測定하여 다음과 같은 式에 의해 燃燒가스溫度 T_{bg} 를 求할 수 있다.

$$T_{bg} = \frac{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln[\alpha_1/\alpha_2 \cdot \epsilon_1/\epsilon_2 \cdot E_2/E_1 \cdot (\lambda_2/\lambda_1)^6]} \quad (7)$$

여기서 $C_2 =$ 第 2輻射 常數(1.438 cm · K), $\lambda =$ 實效波長, $\alpha =$ 檢出器에 들어오는 光束의 立體角, 檢出器의 感度 등을 考慮한 裝置常數, $\epsilon =$ 火炎의 射出率인데, 添字 1, 2는 各各 實效波長 λ_1, λ_2 에 있어서 값을 나타낸다. Fig. 3은 黑體爐를 使用한 光學系의 檢出器 出力과 輝度溫度와의 關係에 對한

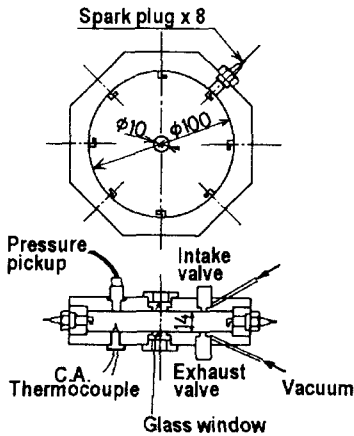


Fig. 1 Cross-section of constant-volume combustion chamber

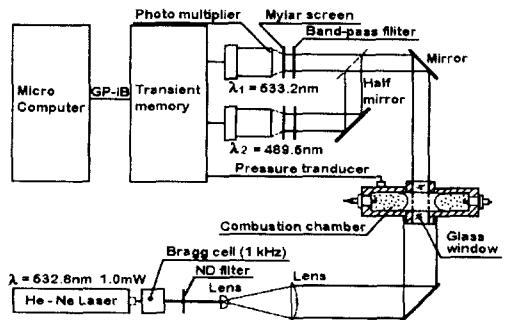


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental arrangement

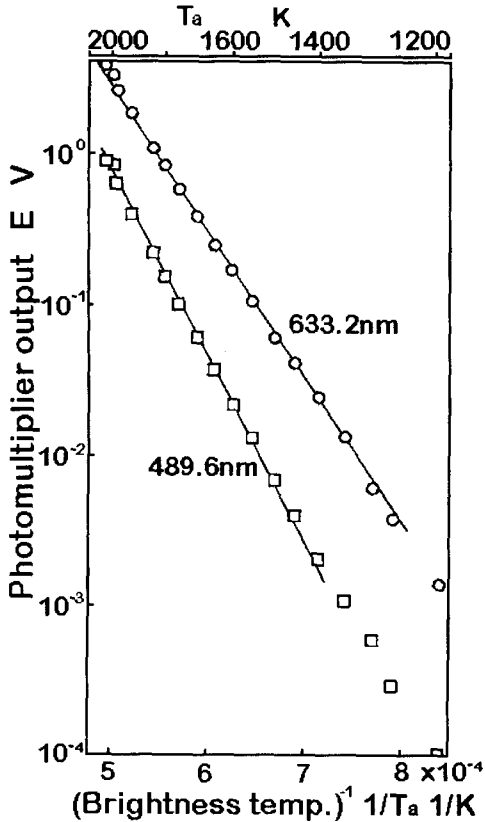


Fig. 3 Calibration curves of the brightness temperature versus optical detector intensity by black body furnace

檢定結果를 보여주고 있는데, 이 檢定結果에 의해 實效波長 λ_1, λ_2 및 裝置常數 α 를 求하여 燃燒가스 溫度 測定에 適用하였다.

3.3 實驗條件

豫混合氣의 燃燒가스溫度를 獨立的으로 變化시키기 위해서는 豫混合氣의 初期溫度나 不活性가스의 組成을 變化시키는 方法 등이 있지만, 本研究에서는 初期溫度를 固定하고 不活性가스中의 아르곤이나 窒素의 體積比率를 變化시켜 燃燒가스溫度를 變化시켰다. 燃燒壓力은 初期壓力을 變化시킴에 따라 變化시켰다.

2色法에 의한 燃燒가스溫度 測定은 煤煙生成 霧圍氣의 火炎條件이 아주 重要하다. 大氣壓下의 프로판-空氣 豫混合氣 火炎에 있어서 煤煙生成 臨界

當量比는 1.91로 알려져 있지만⁹⁾, 本研究에 있어서 高壓下의 프로판-空氣 豫混合氣火炎에서도 煤煙生成 臨界當量比는 거의 1.9임을 確認했다.³⁾ 그런데 煤煙生成 臨界當量比는 溫度의 函數이므로, 燃燒가스溫度를 變化시킴에 의해 臨界當量比 以下の 當量比, 혹은 臨界當量比보다 훨씬 높은 當量比에서도 煤煙生成 霧圍氣를 造成할 수도 있을 것이다.¹⁰⁾

本研究에서는 當量比가 1.9보다 작은 境遇는 空氣보다 窒素의 體積比率를 增加시켜 溫度를 低下시키고, 當量比가 1.9보다 훨씬 큰 2.5 以上の 境遇에 대해서는 空氣보다 窒素의 體積比率를 減少시키고, 또한 窒素 代身에 아르곤의 體積比率를 늘려 燃燒가스溫度를 增加시키는 反面에, 當量比 1.9 ~ 2.3의 境遇는 空氣의 境遇와 같은 窒素의 體積比率를 適用해서 燃燒가스溫度에 미치는 當量比의 影響을 調査해 보았다.

Table 1은 本研究의 實驗條件인 當量比 1.5, 1.7, 1.8, 1.9, 2.2, 2.3, 2.5 및 2.7에 대한 混合氣中 各成分의 比率 및 斷熱火炎溫度를 나타내고 있는데, 表中 * 및 **는 實際의 實驗條件이 아니다. *의 境遇는 空氣의 體積比率를 基準으로 한 混合氣 組成값을 나타내고, **는 當量比 2.7인 境遇, 實驗에 사용된 다른 두條件과 比較하기 위하여 나타낸 값이다.

4. 實驗 結果 및 考察

4.1 典型的 測定例

Fig. 4는 當量比 2.2, 初期壓力 $P_1=0.81$ MPa인 境遇의 典型的인 測定例를 보여주고 있다. 下段에는 壓力計의 出力, 波長 λ_1, λ_2 의 自發光強度 E_1, E_2 및 透過率, 中段에는 壓力, 上段에는 2領域 모델에 의한 計算溫度 및 2色法에 의한 測定溫度의 時間變化를 나타내고 있다.

當量比가 1.9 以下の 境遇에는 溫度가 낮아지지 않으면 煤煙이 生成되지 않고, 또한 煤煙生成量이 적으면 自發光強度가 약해서 2色法으로 溫度를 求할 수가 없다. 따라서 當量比가 1.9 以下인 境遇는 2領域 모델의 假定 (1)과 (2) 以外에 燃燒前後에서

Table 1 Compositions and adiabatic flame temperature estimates(T_{ad}) of propane-oxygen-inert gas pre-mixtures

Equivalence Ratio	C_3H_8	O_2	$N_2 + Ar$	Ar	Constant Volume(K)		Constant Pressure(K)	
	MX	MX	MX	$N_2 + Ar$	$P_i = 1 \text{ MPa}$	$P_i = 0.1 \text{ MPa}$	$P_i = 1 \text{ MPa}$	$P_i = 0.1 \text{ MPa}$
1.5	0.045	0.151	0.804	0.00 L	2142	2137	1766	1766
	0.041	0.138	0.821	0.00 L	2031	2028	1674	1674
1.7	0.052	0.152	0.796	0.00 L	2031	2028	1672	1672
1.8	0.057	0.159	0.784	0.00 L	2031	2028	1670	1670
1.9	0.074	0.194	0.732	0.00 L	2193	2182	1804	1804
	0.064	0.168	0.768	0.00 L	2030	2026	1668	1668
2.2	0.084	0.192	0.724	0.00 L	1983	1977	1625	1625
	0.084	0.192	0.724	0.50 L	2189	2176	1744	1744
	0.084	0.192	0.724	0.50 T	2189	2176	1744	1744
	0.084	0.192	0.724	1.00 L	2397	2343	1893	1890
2.3	0.088	0.191	0.721	0.00 L	1875	1874	1539	1539
	0.088	0.191	0.721	0.50 L	2066	2062	1639	1639
	0.088	0.191	0.721	0.50 T	2066	2062	1639	1639
	0.088	0.191	0.721	1.00 L	2321	2300	1775	1774
2.5	* 0.095	0.190	0.716	0.00 L	1738	1738	1430	1430
	0.135	0.270	0.596	0.00 L	2050	2046	1668	1668
	0.135	0.270	0.596	0.50 L	2198	2187	1754	1754
	0.135	0.270	0.596	1.00 L	2373	2345	1855	1854
2.7	* 0.102	0.188	0.710	0.00 L	1568	1568	1293	1293
	** 0.188	0.348	0.464	0.00 L	2041	2037	1652	1652
	0.188	0.348	0.464	0.82 L	2210	2201	1749	1749
	0.188	0.348	0.464	1.00 L	2252	2241	1773	1772

MX = $C_3H_8 + O_2 + N_2 + Ar$, L = Laminar, T = Turbulent, P_i = Initial Pressure

比熱과 가스常數가 變化하지 않는다고 假定하고, 溫度上昇에 의한 壓力上昇은 燃燒가스 質量比率 X에 比例한다고 하여 燃燒가스 密度 ρ_{bg} 를 壓力變化로부터 簡單한 熱力學的 模型을 使用하여 計算했다.³⁾ 이 ρ_{bg} 를 狀態方程式에 代入하여 溫度를 計算했는데, 이러한 熱力學的 計算溫度는 2色法에 의한 燃燒가스 溫度와 條件에 關係없이 잘 一致됨을 著者의 다른 論文에서 밝혔다.¹⁰⁾

$$\rho_{bg} = \frac{X}{[1 - (1 - X) \cdot (P_i/P)^{1/n}] \cdot \rho_i} \quad (8)$$

여기서, $X = (P - P_i)/(P_m - P_i)$, P_i = 初期壓力, P_m = 最大壓力, n = 포리트로프 指數(1.3) 및 ρ_i = 混合氣 初期密度이다.

燃燒室을 지난 레이저의 透過光속에는 火炎自體 發光中 干涉필터를 通過하여 光電子增倍管에서 檢出되는 波長의 光이 包含되어 있다. 이 發光

의 影響은 레이저光을 强하게 하면 相對的으로 작아지지만, 本 研究에서는 燃燒가스 溫度를 測定하기 위하여 레이저光 強度를 比較의 弱하게 했기 때문에, 自發光을 無視할 수 없다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 透過光 強度에 비해 自發光 強度가 相當히 크므로, 本 研究에서는 브라그셀을 利用해서 透過光과 自發光의 強度를 同時에 測定하여 自發光 強度를 除外한 透過光 強度를 利用해서 透過率을 測定했다.

燃燒가스 溫度를 求하기 위해서는 火炎의 射出率을 알아야 하는데, 本 研究에서는 레이저光 減衰法²⁰⁾에 의해 測定한 觀測領域의 透過率 τ 로부터 Kirchhoff 法則에 의해 波長 $\lambda_1(633.2 \text{ nm})$ 의 單色 射出率 ϵ_1 을 구하고, 이 값을 Hottel-Broughton式에 代入하면 波長 $\epsilon_2(489.6 \text{ nm})$ 에서의 射出率 ϵ_2 을 구할 수 있다. 時間間隔에 대해서 求한 2個의 射出率 ϵ_1, ϵ_2 를 式 (7)에 代入하여 풀면 燃燒가스 溫度를

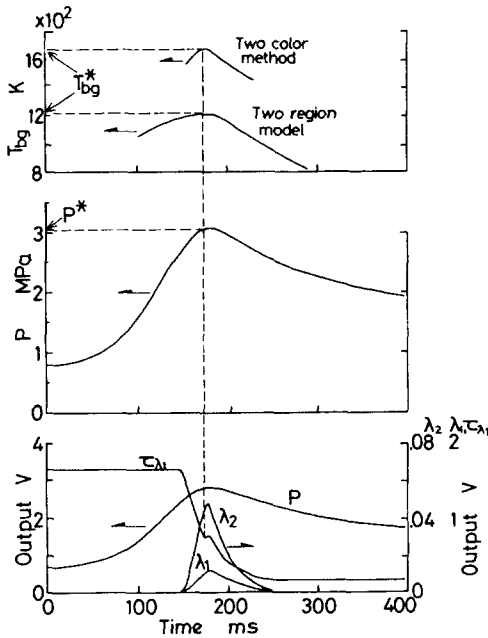


Fig. 4 Typical data of emissions, emitted + transmitted light, pressure P, and burnt gas temperature T_{bg} as a function of time. Conditions : laminar combustion, 8 points ignition, equivalence ratio 2.2 and initial pressure $P_1 = 0.81$ MPa

구할 수 있다. 이境遇, 火炎는 觀測領域을 채울 必要가 있는데, 이것은 高速度 寫眞에 의해 確認되었다.¹⁶⁾

透過率은 時間履歷에 따라 다르기 때문에, 本研究에서는 壓力에 대한 燃燒가스溫度를 整理하기 위하여 燃燒前後 透過率差의 1/2이 되는 時刻의 壓力과 溫度를 代表값으로서 採用하여 P^* , T_{bg}^* 로서 表示하였다.

4.2 燃燒가스溫도의 比較

Fig. 5에는 不活性가스中の Ar 體積比率을 파라미터로 한 當量比 2.2인 境遇, 2色法에 의한 測定溫度(TCM)와 2領域 모델에 의한 計算溫度(TRM)와의 比較를 나타내고 있다. 同條件의 豫混合氣中 不活性가스 (N_2+Ar)의 體積比率을 72.4%로 固定해서 Ar의 體積比率을 變化시켜 燃燒가스溫度를 變化시켰다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 壓力이 높을수록 燃燒가스의 單位面積當 熱損失 比率이

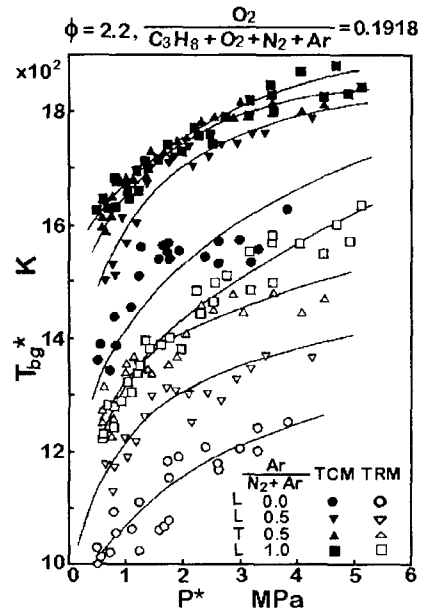


Fig. 5 Comparisons between burnt gas temperatures measured by two-color method and calculated by two-region model for changing Ar/(N_2+Ar) ratio to pressure P^* at equivalence ratio 2.2

減少하기 때문에, 燃燒가스溫度는 높아지고 있다. 또한 Ar의 體積比率을 增加시키면, 가스의 熱容量이 低下하여 燃燒가스溫度는 增加한다. 이러한 定性的인 傾向은 두方法에 의해 구한 어느 溫度의 境遇에도 같지만, 2色法에 의한 測定溫度가 大略 300 K 程度 높다. 이것은 2色法에 의한 方法이 光路中에 溫度分布가 存在하는 境遇, 比較의 最高溫度에 가까운 값이 測定되고 있기 때문이다.¹⁷⁾ 또한 熱力學的 모델에 있어서는 燃燒領域의 溫度分布가 均一하다고 假定해서 溫度를 구했는데, 實際는 燃燒終了時에 燃燒室中心에서 周邊方向으로 負의 溫度勾配가 存在하기 때문에, 實際보다 낮은 溫度로 計算되었다. 實際의 燃燒가스溫度는 2色法에 의한 溫度와 熱力學的 모델에 의해 구한 溫度의 中間에 있다고 생각된다.

Fig. 5에서 不活性가스中の Ar 體積比率을 나타내는 값앞에 L, T의 記號가 表示되어 있는데, 前者는 層流燃燒, 後者는 亂流燃燒를 意味한다. 本實驗은 주로 層流燃燒에 대해서 이루어졌지만, 亂流

燃燒의 境遇, 溫度境界層의 두께가 얇아지리라 생각되므로, 燃燒器 內壁附近의 溫度境界層에 의한 影響을 알아보기 위하여, 直徑 50 mm, 높이 14 mm, 두께 2 mm의 圓筒에 대하여 直徑 4 mm의 구멍이 27個 뚫린 亂流發生器(구멍의 總面積比 15.4%)를 燃燒室內에 中心을 一致시켜 設置했다. 8個의 點火플러그에서 傳播해 온 層流火炎은 이 多孔圓筒의 內側으로 通過할 때 亂流火炎이 된다. 그 結果, 亂流火炎은 燃燒期間이 짧아진 만큼 燃燒 가스溫度가 層流燃燒에 比해 50~100 K 程度 增加하고 있다.

Fig. 6은 當量比 2.3일 境遇에 대하여 當量比 2.2 일 境遇와 같은 方法으로 나타낸 것이다. 定性的인 傾向은 Fig. 5의 境遇와 같지만, 當量比 2.2일 境遇보다 同條件에서 溫度가 낮아지고, 2色法에 의한 測定溫度와 2領域 모델에 의한 計算溫度의 差가 더 큰을 알 수 있다.

當量비가 높은 境遇에는 煤煙이 많이 生成되어

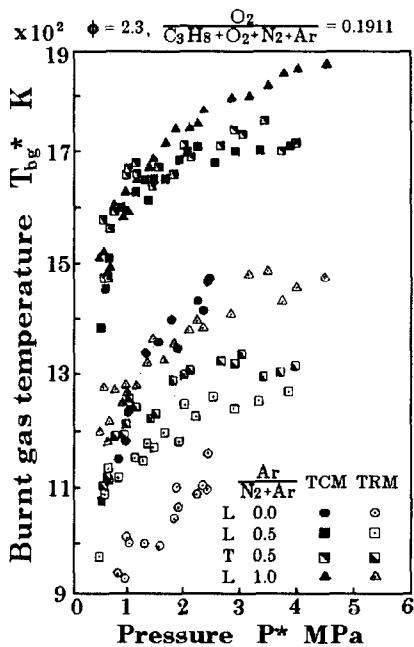


Fig. 6 Comparisons between burnt gas temperatures measured by two-color method and calculated by two-region model for changing Ar/(N₂+Ar) ratio to pressure P* at equivalence ratio 2.3

煤煙粒子的 輻射에 注目한 2色法의 境遇 溫度測定이 可能하지만, 燃料量이 너무 많으면 可燃 限界性 때 문에, 燃燒가 일어나지 않는 境遇도 豫測된다. Fig. 7의 當量比 2.5 및 2.7일 境遇, 空氣의 體積比率을 基準으로 하여 混合氣를 만들면 燃燒가 일어나지 않는 境遇가 發生하므로, Table 1에서 알 수 있는 것처럼 本 研究에서는 空氣의 境遇보다 酸素의 體積比率을 增加시키고 混合氣중의 不活性가스의 體積比率을 낮추어 實驗을 했다. 當量比 2.5와 2.7의 境遇, 兩方法에 의해 求한 어느 溫度도 앞에서 境遇와 定性的으로 一致하고 있는데, 當量비가 큰에도 불구하고 不活性가스중의 窒素 體積比率 減少와 酸素體積比率의 相對的인 增加로 인해 溫度가 增加하고 있음을 그림에서 알 수 있다.

當量비가 1.9 以下인 境遇, 空氣의 境遇와 같은

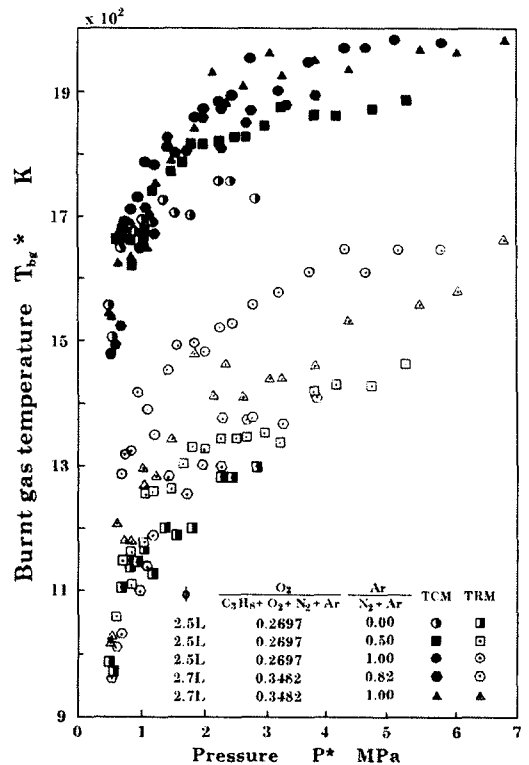


Fig. 7 Comparisons between burnt gas temperatures measured by two-color method and calculated by two-region model for changing Ar/(N₂+Ar) ratio to pressure P* at equivalence ratios 2.5 and 2.7

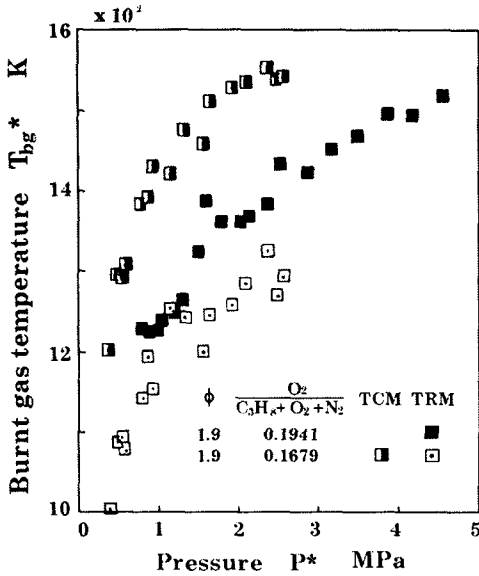


Fig. 8 Comparisons between burnt gas temperatures measured by two-color method and calculated by two-region model for changing Ar/(N₂+Ar) ratio to pressure P* at equivalence ratio 1.9

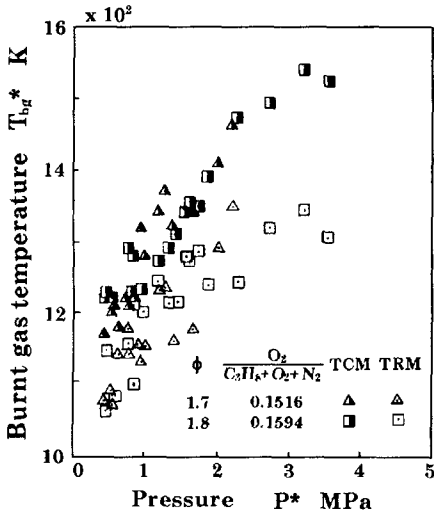


Fig. 9 Comparisons between burnt gas temperatures measured by two-color method and calculated by two-region model for changing Ar/(N₂+Ar) ratio to pressure P* at equivalence ratios 1.7 and 1.8

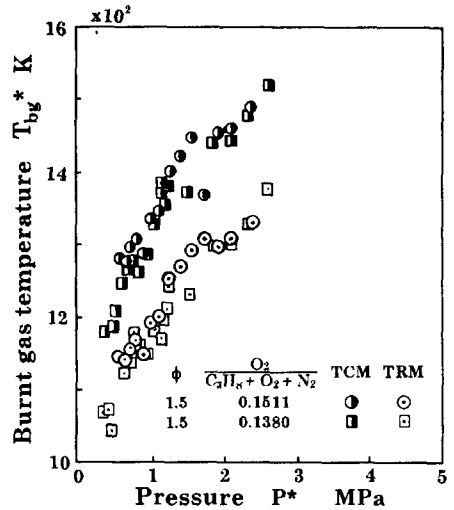


Fig. 10 Comparisons between burnt gas temperatures measured by two-color method and calculated by two-region model for changing Ar/(N₂+Ar) ratio to pressure P* at equivalence ratio 1.5

酸素의 體積比率에서는 煤煙이 거의 生成되지 않아 2色法에 의해 溫度를 測定할 수 없으므로, 이러한 境遇에 대해서는 空氣의 境遇보다 窒素의 體積比率를 增加시켜서 煤煙生成 霧圍氣를 造成하여 燃燒가스溫度를 測定했다. 當量比의 範圍가 1.5 ~ 1.9인 境遇, 各 當量比에 있어서 窒素의 體積比率는 斷熱火炎溫度가 거의 같은 값을 基準으로 해서 구했다. 그러나 Fig. 8, 9 및 10에서는 煤煙生成이 同溫度域일지라도 當量比 2.2나 2.3의 1/10 程度¹⁸⁾밖에 生成되지 않기 때문에, 2色法の 溫度測定の 精度가 相當히 떨어져 지라 생각되고, 境遇에 따라서는 測定溫度를 求할 수가 없었다. 實驗結果에 따르면 當量比 範圍가 1.5~1.9인 境遇, 壓力에 따른 2色法の 測定溫度는 當量比에 關係없이 大略 1170~1550 K 程度가 되고, 또한 2領域 모델에 의한 計算溫度는 2色法에 의한 測定溫度보다 50~100 K 程度 낮아짐을 알 수 있다.

5. 結 論

定積 燃燒器內 煤煙生成 霧圍氣의 프로판-酸素-不活性가스 豫混合氣에 있어서 當量比 1.5~2.7,

壓力 0.1~6 MPa의 넓은 範圍에 걸쳐서 2色法에 의해 測定한 燃燒가스溫도와 既存의 2領域 모델을 利用한 計算溫도를 比較하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 2領域 모델에 의해 구한 溫度는 2色法에 의한 測定溫度보다 300 K 程度 낮았다. 이것은 2領域 모델에 의한 計算溫도의 境遇, 燃燒終了時에 燃燒室 中心에서 周邊方向으로 負의 溫度勾配가 存在하여 實際 燃燒가스溫度보다 낮게 나타나고, 2色法에 의한 測定溫度는 光路중에 溫度分布가 存在하여 比較的 最高溫度에 가까운 값이 測定되어 實際 溫度보다 높게 나타나고 있기 때문이다.
- 2) 當量비에 關係없이 同當量比에서는 壓力이 높을수록 燃燒ガスの 單位面積當 熱損失 比率이 減少하기 때문에 燃燒가스溫度가 높게 나타났고, Ar의 體積比率을 增加시키면 가스의 熱容量이 低下하기 때문에 燃燒가스溫度는 높게 나타났다.
- 3) 當量比 2.2와 2.3에서 亂流燃燒는 層流燃燒에 비하여 燃燒速度가 增加하여 熱損失이 적기 때문에, 燃燒가스溫度가 50~100 K 程度 높게 나타났다.
- 4) 當量比 1.9 以下인 境遇 및 當量比 2.5 以上인 境遇는 窒素 혹은 아르곤의 體積比率을 變化시켜 煤煙生成 霧圍氣를 造成하여 當量比의 影響에 따른 燃燒가스溫度를 測定할 수 있었다.

後 記

本 研究는 東京工業大學 制御시스템工學科 에 너지變換研究室의 實驗裝置를 利用하여 遂行하였고, 研究結果의 考察에는 同大學 工學部長 神本教授의 助言이 많았음을 밝혀두며, 도움을 주신 關係者 여러분께 感謝드립니다.

參考文獻

- 1) 和田 佳之, 內海 正文, 河野 通方, 飯沼 一男, “火花 點火機關における 燃燒制御に關する 基礎研究-第1

報 點火源의 數とその 配置による 效果-”, 自動車技術會論文集 No. 23, pp. 12 ~ 19, 1981.

- 2) 浜本 嘉輔, 大川 尚男, 山本 弘明, 菅原 良輔, “密閉容器內燃料-空氣均一混合氣의 燃燒に及ぼす亂れの 效果”, 日本機械學會論文集(B編), 49卷, 444, pp. 1791 ~ 1798, 1985.
- 3) Kamimito, T., Bae, M. W. and Kobayashi H., “A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion”, Combustion and Flame, Vol. 75, pp. 221~228, 1989.
- 4) 藤本 昌彦, 西田 惠哉, 廣安 博之, 田端 道彦, “層狀混合氣의 燃燒特性に關する 研究(第2報, 定容燃燒器內의 混合氣濃度分布가 燃燒排氣特性におよぼす影響)”, 日本機械學會論文集(B編), 62卷, 599, pp. 2879~2886, 1996.
- 5) 城戶 裕之, 中原 眞也, 井上 貴芳, “水素混合氣의 亂流燃燒時における 選擇擴散의 效果”, 日本機械學會論文集(B編), 62卷, 600, pp. 3198~3204, 1996.
- 6) 城戶 裕之, 和栗 雄太郎, 中島 健四郎, “亂流燃燒速度의 實驗と整理”, 日本機械學會論文集(B編), 51卷, 466, pp. 1899 ~ 1907, 1985.
- 7) 浜本 嘉輔, 富田 榮二, 泉 政明, “密閉容器內燃料-空氣均一混合氣의 燃燒に及ぼす旋回亂流의 影響”, 日本機械學會論文集(B編), 53卷, 488, pp. 1395 ~ 1402, 1987.
- 8) 浜本 嘉輔, 泉 政明, 富田 榮二, 宮本 修秀, “密閉容器內燃料-空氣均一混合氣의 燃燒速度의 直接測定”, 日本機械學會論文集(B編), 55卷, 518, pp. 3224 ~ 3227, 1989.
- 9) 城戶 裕之, 黃 樹偉, 中島 健四郎, “火炎面プラズマ 電位信號による 豫混合亂流傳播火災構造의 考察”, 日本機械學會論文集(B編), 56卷, 521, pp. 175 ~ 181, 1990.
- 10) Bae, M. W. and Kim, K. S., “A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion(Effects of pressure, Temperature and Equivalence Ratio)”, KSME Journal, Vol. 8, No. 8, pp. 175~182, 1994.
- 11) 권세진, “定積 燃燒室內 亂流 豫混合火災 傳播의 시뮬레이션”, 大韓機械學會論文集, 第 19卷, 第 6號, pp. 1510 ~ 1517, 1995.
- 12) 김문헌, 김영효, 이종태, “初期燃燒過程에 미치는 亂流強度 및 點火에너지의 影響”, 韓國自動車工學會論文集, 第 3卷, 第 6號, pp. 274~284, 1995.

- 13) 김준효, 안수길, "정전탐침법에 의한 豫混合 亂流 傳播火炎의 構造에 관한 研究", 韓國自動車工學會 論文集, 第3卷, 第6號, pp. 78~86, 1995.
- 14) 윤수한, 이중순, 김현지, 박춘근, 하중률, "IDI型 定積 燃燒器에서 點火時期 및 連絡孔의 形象이 燃燒特性에 미치는 影響", 韓國自動車工學會論文集, 第4卷, 第3號, pp. 220 ~ 231, 1996.
- 15) 裴明煥, 李昇揆, "燃燒機關의 煤煙生成過程 모델링 用 高溫·高壓 定積 燃燒裝置의 性能에 관한 研究", 韓國自動車工學會論文集, 第7卷, 第1號, pp. 20~30, 1999.
- 16) 田坂 英紀, 松岡 信, 高野 正美, "定容容器內 豫混合 氣燃燒의 基本的熱力學的 모델", 日本機械學會論文集(B編), 48卷, 435, pp. 2355~2363, 1982.
- 17) 松井 幸雄, 神本 武征, 松岡 信, 小栗 彰, "ディーゼル 機關의 火炎溫度의 測定에 關する 研究", 日本機械學會論文集(第2部), 44卷, 337, pp. 228~238, 1978.
- 18) 裴明煥, "高壓下의 豫混合氣燃燒에 於ける すす生成에 關する 研究", 東京工業大學大學院 博士學位論文, 1989.
- 19) Olson, D. B. and Pickens, J. C., "The Effects of Molecular Structure on Soot Formation, I. Soot Thresholds in Premixed Flames", Combustion and Flame, Vol. 57, pp. 199~208, 1984.
- 20) Sivathanu, Y. R., Gore, J. P., Janssen, J. M. and Senger, D. W., "A Study of In Situ Specific Absorption Coefficients of Soot Particles in Laminar Flat Flames", Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 653~658, 1993.

저 자 소 개



裴明煥(裴明煥)

1954年 10月 24日生, 1977年 韓國海洋大學校 機關工學科 卒業, 1989年 日本東京工業大學大學院 機械工學科 博士課程 修了(工學博士), 現在 慶尙大學校 工科學 機械設計學科 教授



이승균(李昇揆)

1944年 11月 19日生, 1971年 서울大學校 農科大學 農工學科 卒業, 1975年 서울大學校 大學院 農業機械工學科 卒業(碩士), 1981年 日本 京都大學 大學院 農業工學科 卒業(博士), 1974年~現在 慶尙大學校 農科大學 農業機械工學科 教授



김성태(金成泰)

1946年 9月 26日生, 1971年 서울大學校 農科大學 農工學科 卒業, 1974年 忠北大學校 大學院 農業機械工學科 卒業(碩士), 1986年 建國大學校 大學院 農業工學科 卒業(博士), 1979年~現在 慶尙大學校 農科大學 農業機械工學科 教授