

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

甲烷與丙烷噴流火焰互換性之基礎分析及實際應用

## Fundamental Analyses on Interchangeability of Methane and Propane Jet Flames and Real Applications

計畫編號：NSC 90-2212-E-168-001

執行時間：90年8月01日至91年07月31日

計畫主持人：侯順雄副教授 崑山科技大學機械系

共同主持人：林大惠教授 國立成功大學大機械系

### 一、中文摘要

本研究利用本生燈火焰燃燒器來模擬瓦斯爐單一爐火，探討不同加熱間距下，甲烷與丙烷兩種燃料之互換性。實驗中吾人定義一與擴張閥出口面積( $A_p$ )和噴嘴出口面積( $A_j$ )之比值有關的參數  $K$  ( $K = \sqrt{A_p / A_j} - 1$ )，進行  $K=6.75, 8, 9$  和  $10$  四種不同  $K$  值在等發熱量及等火焰高度下的加熱效率分析。結果得到：除了  $K=9$  之甲烷與丙烷火焰有較佳之加熱效率互換性外，其餘  $K$  值皆不佳。在  $K=9$  時，根據溫度場分析，可知在中心軸附近，甲烷火焰之溫度因預混火焰距加熱面較近的關係較丙烷火焰之溫度高，而在擴散火焰處，溫度以丙烷火焰較高，在此互補的效應下，可解釋兩者加熱效率相符之原因。此外，根據濃度場分析得到  $CO_2$ 、 $CO$  和  $O_2$  濃度分佈具有相似的變化趨勢，可見其濃度分佈亦具有良好的互換性。由本研究得到一重要結論：使用不同燃料欲具有較佳的燃料互換性，燃燒器的設計需針對擴張閥出口面積與噴嘴出口面積的比例做適當的考量。此一重大發現可實際應用在瓦斯爐具的設計上作為重要參考。

**關鍵詞：**互換性、瓦斯爐、熱值

### Abstract

The heating value of fuel, which depends on its composition, strongly affects burner performance including the combustion characteristics, thermal

efficiency and emissions. Using the same gas stove for burning fuel with various heating values is inappropriate and hazardous due to the possible occurrence of incomplete combustion (i.e., a great increase of CO emissions and/or formation of soot), liftoff and flashback. Therefore, a new design of domestic gas stove for burning gaseous fuel with various heating values is of great significance. The objective of this proposal is to experimentally study the Interchangeability of methane and propane jet flames with same heating values and flame heights for different values of  $K$  by using a conventional axial jet burner.  $K$  is define as  $K = \sqrt{A_p / A_j} - 1$  and denotes the important factor of injector outer /diffuser exit area ratio ( $A_p / A_j$ ). It is of great importance to provide optimum design concepts and real application for manufacturing domestic gas stove for burning gaseous fuel with various heating values.

**Keywords:** Interchangeability, Domestic Gas Stove, Heating Value

### 二、計畫緣由與目的

日常生活中常用的瓦斯爐燃燒係利用瓦斯自噴嘴噴出時，瓦斯與外界的壓力差將空氣吸

入瓦斯流中產生預混效果，而在瓦斯爐口處產生多管多環之噴流部份預混火焰，將燃料的化學能轉換成熱能以進行加热的目的。

在瓦斯爐的設計方面，吸入空氣與瓦斯的混合比例、瓦斯爐噴嘴口徑的大小、瓦斯爐爐頭焰孔孔徑大小、瓦斯供應壓力、爐頭焰孔出口流速、焰孔間距、瓦斯噴口和加熱面之間距以及多管噴流部份預混火焰間的相互作用，對整體火焰的燃燒特性皆有顯著的影響，也直接關係著熱效率的高低[1-3]。值得注意的是，瓦斯爐或瓦斯熱水器因在家中使用，須更進一部考量安全性，諸如火焰的穩定性(火焰浮火、回火和吹熄等)以及燃燒污染物的適當控制等，尤其CO和NO<sub>x</sub>的排放率。

由空氣吸入機構的實驗研究和理論分析得知空氣吸入量對燃燒器出口設計、火焰穩定性、形狀與溫度，甚至對燃燒室的設計皆息息相關[4-8]。瓦斯爐使用不同氣體組成的瓦斯時，不僅熱值會隨之改變，對火焰燃燒結構、良好的燃燒範圍、整體火焰的燃燒特性、熱效率的高低、火焰的穩定性以及污染物等都會有重要影響。選取不同熱值的甲烷與丙烷進行互換性研究將有助於瞭解與解決瓦斯爐使用不同氣體組成的瓦斯時所遭遇的問題。

由於互換性的基礎研究相當匱乏，一般著重於實際瓦斯爐的測試分析。吾人深知瓦斯爐具上的多管噴流火焰或多環噴流火焰，其最基本的火焰結構為雙層噴流火焰，亦即由內層的富油預混火焰和外層的擴散火焰所組成。本研究計畫之目的係希望在不改變瓦斯爐設計的前提下，針對燃料進行互換性之研究。研究中將利用本生燈火焰燃燒器(圖 1)來模擬瓦斯爐(圖 2)單一爐火，探討在不同加熱間距下，甲烷與丙烷兩種燃料之互換性。主要探討相等入熱量情形下的加熱效率、火焰燃燒結構、溫度場分佈和濃度場分佈等燃燒特性的分析。

### 三、研究方法及步驟

本實驗所使用的實驗設備(圖1)及量測儀器，包括本生燈噴流燃燒器系統、停滯面系統、循環水溫度控制系統、影像處理系統、溫度量測系統和氣體濃度量測系統。噴流燃燒器為本生燈火焰燃燒器，噴流管內徑為9mm，在整流段中裝有三層蜂巢網與細目鐵絲網來整流，使噴流出口速度均勻一致。

實驗時所使用的燃料為進口之高純度甲烷與丙烷(純度皆為99.9%)，空氣則由空氣壓縮機提供。燃料和空氣分別由各自的調壓閥控制壓力，使壓力固定在1.5atm，然後經已校正過的浮子式氣體流量計來控制其所需的流量，最後經過混合管路充分混合後，進入噴流燃燒器中，以進行實驗。燃燒所產生的廢氣則由抽氣系統經抽氣罩抽出。實驗中噴流燃燒器出口與停滯面的間距可利用升降平台來調整。停滯面板係採用不鏽鋼製的水冷式加熱盤。在冷卻水的進、排水歧管處，則安置K型熱電偶，用以量測冷卻循環水的進、出口溫度，並可計算循環冷卻水實際帶走的熱量。

CCD影像處理系統所採用的攝影機是SONY公司出品之TR805型機種，並配合一部電腦和兩個顯示螢幕來處理影像。由攝影機拍攝所需火焰畫面，利用影像擷取卡和影像擷取軟體，將欲分析之火焰影像轉成TIF格式的圖檔，最後使用影像分析軟體對火焰圖檔進行分析。溫度量測系統包括熱電偶和數位式多功能溫度量測器。實驗中所使用的熱電偶為R型。多功能溫度量測器為日本Yokogawa公司生產型號HR-1300的產品。此外，本實驗採用SHIMADZU公司所生產之GC-14B型氣體層析儀來進行濃度場分析。

等熱值之甲烷與丙烷噴流火焰調整分析的實驗進行步驟如下所述：

1. 首先 K 值決定後，甲烷與丙烷個別的燃氣濃度便隨之確定。
2. 接著以丙烷燃燒器出口流速為基準，分別算出甲烷與丙烷相同熱值時的出口流速、燃料與空氣量。此時丙烷火焰高度皆高於甲烷。
3. 記錄甲烷與丙烷火焰高度，然後以甲烷火焰為準，增加丙烷的空氣量，使丙烷火焰與甲烷等高，此時兩火焰之熱值仍保持相等。

4. 最後記錄丙烷的空氣量，算出相對應的丙烷濃度與出口流速，並量測其加熱效率、灰階值、溫度場及濃度場分析。

### 三、結果與討論

依照上述 1~4 的實驗進行步驟，先針對  $K=9$  (即  $A_p/A_j=100$ ) (如圖 3 所示) 之情形分析，圖中橫軸表示燃料之燃料體積流率，上方為甲烷、下方為丙烷體積流率，兩者之尺寸比例不同，甲烷流率一單位之比例為丙烷之 0.393，因為甲烷單位流率之熱值為丙烷的 0.393 倍，故橫軸上每一相對應之位置代表其熱值相等；而縱軸分別為左方之空氣流率，與右方之噴流出口速率，而右方之噴流出口流速又可分為甲烷和丙烷噴流出口流速。圖中之實線與虛線分別代表甲烷與丙烷在  $K$  值為 9 時，依 Prigg 之公式所求得之理論值，此時之甲烷濃度為 13.1%，丙烷濃度為 8.3%，對照左方縱軸，可得知其在各個燃料流率下對應之空氣流率，且由於其燃氣濃度為定值，因此可對照右方縱軸得知其噴流出口流速。圖中黑色圓點則代表丙烷火焰在調整空氣量至與甲烷火焰等長後之情形，對照左方縱軸可得丙烷火焰之空氣流率，但由於其濃度在調整過後已經改變，故無法對照右方縱軸得知其出口流速，因此圖上標明了每一點之丙烷體積濃度與混合氣出口流速。圖中之各詳細數值，如出口流速 ( $U_i$ )、混合氣濃度 ( $\Omega\%$ )、燃料流率 ( $\dot{V}_{Fuel}$ )、空氣流率 ( $\dot{V}_{Air}$ )、擴散火焰 ( $h_{DF}$ ) 高度與預混火焰 ( $h_{PF}$ ) 高度，可對照表 1 中  $K=9$  之項目一一得知，表中各  $K$  值之前兩列為未調整前之火焰數據，而第三列之 Modified 項為丙烷火焰調整空氣流率後之數據。

圖 4 為  $K=9$  ( $A_p/A_j=100$ )，甲烷與丙烷火焰等發熱量且相同火焰長度，不同混合氣出口流速之加熱效率圖，圖中之橫軸  $H$  為加熱間距，縱軸  $\eta$  為加熱效率，實線與空心符號代表甲烷之實驗數據，虛線與實心符號代表丙烷之實驗數據，而相同圖形符號之實心與空心則分別表示具有等發熱量及等火焰長度的甲烷與丙烷之實驗條

件，圖中亦標示了火焰之燃料體積濃度與出口流速。因為實驗中以甲烷火焰為基準，對丙烷火焰做調整，故甲烷火焰之濃度為一固定值，而丙烷火焰由於經過空氣流率之調整，使其與甲烷火焰等長，依其調節空氣量之多寡決定不同丙烷火焰之濃度。可對照表 1 與圖 3 進行分析。首先比較甲烷濃度 13.1%，出口流速 0.81m/s (如符號○所示) 與丙烷濃度 6.1%，出口流速 0.69m/s (如符號●所示) 之火焰加熱效率。雖然丙烷之出口流速較小，但此時兩者之擴散火焰長度 ( $h_{DF}$ ) 相等，而甲烷之預混火焰長度 ( $h_{PF}$ ) 較丙烷長，甲烷之  $h_{PF}$  為 14mm，丙烷之  $h_{PF}$  為 13mm，此組火焰之加熱間距在 15~50mm 之間，兩者之加熱效率相當接近，而當加熱間距縮小至 5~10mm 時，甲烷火焰之熱效率高出丙烷約 3~4%，就整體而言，其熱效率相當接近。接著比較甲烷濃度 13.1%，出口流速 0.89m/s (如符號△所示) 與丙烷濃度 5.7%，出口流速 0.80m/s (如符號▲所示) 之火焰加熱效率，此時甲烷與丙烷之預混火焰高度相差更大，分別為 17mm 與 11mm (如表 1 所示)，但其加熱效率除了在加熱間距 5mm 和 50mm 兩處不太相同外，其餘的加熱間距，加熱效率皆相當接近。最後比較速度最高的一組，甲烷濃度 13.1%，出口流速 0.97m/s (如符號□所示) 與丙烷濃度 5.3%，出口流速 0.94m/s (如符號■所示) 之火焰加熱效率。此時兩者之預混火焰高度相差最大，分別為 19mm 與 10mm。雖然其出口流速為三組之中最接近，但其加熱效率卻為三組之中相差最大，且丙烷加熱效率始終高於甲烷。雖然如此，但其差異仍不多，在加熱間距 10~25mm 之間，加熱效率幾乎相同。綜觀  $K$  值為 9 之三組等入熱量且火焰等長之甲烷與丙烷火焰加熱效率，發現此狀況之甲烷與丙烷火焰在加熱效率的要求上，只要調節適量之空氣流率，便能良好之燃料互換性。

對於甲烷與丙烷火焰在  $K=9$ ，等火焰長度之灰階值與溫度之分析結果得到，雖甲烷與丙烷火焰在  $K=9$  時有良好之加熱效率互換性，其火焰結構還是有所不同，

但變化趨勢大致相同。首先丙烷火焰在上游處，其寬度大於甲烷火焰，愈往下游，丙烷外層擴散火焰輪廓以較甲烷擴散火焰大之曲率向中心聚合，顯示其基本火焰形態之不同。而根據甲烷與丙烷火焰的溫度場分析(圖 5 和 6)，可知在中心軸附近，甲烷火焰之溫度因預混火焰距加熱面較近的關係較丙烷火焰之溫度高，而在擴散火焰處，溫度以丙烷火焰較高，在此互補的效應下，可解釋兩者加熱效率相符之原因。

圖 7 為  $K=9$ ，甲烷火焰在  $[\Omega, U_i]=[13.1\%, 0.81\text{m/s}]$  與丙烷火焰在  $[\Omega, U_i]=[6.1\%, 0.69\text{m/s}]$  具等發熱量且相同火焰高度，自由噴流下，距燃燒器出口上方 15mm 處之濃度分佈圖。空心符號代表甲烷氣體濃度，而實心符號代表丙烷氣體濃度。此時甲烷與丙烷火焰量測的位置皆高於圓錐形預混火焰面尖端，其  $\text{CO}_2$  分別在預混火焰與擴散火焰反應區生成，之後由於交互擴散的關係，達成如圖之平衡狀態，隨著  $r$  值的增加， $\text{CO}_2$  逐漸增加，到擴散火焰面處( $r=5、6\text{mm}$ )達到最高值，之後再向外擴散至周圍環境，直到濃度為零。而  $\text{CO}$  生成在預混火焰反應區，其代表了燃燒的不完全性， $\text{CO}$  量愈多，代表沒有足夠的氧能與碳原子完全反應生成  $\text{CO}_2$ ，故只能形成  $\text{CO}$ ，隨著  $r$  值由中心往擴散火焰面， $\text{CO}$  濃度逐漸降低，直到擴散火焰反應區時再度與  $\text{O}_2$  反應燃燒，未完全反應之  $\text{CO}$  則往周圍環境擴散。觀察  $\text{O}_2$  的濃度分佈，在預混火焰與擴散火焰面間，理論上是不應有  $\text{O}_2$  的存在，但是由於洩漏(leakage)的關係，在  $r=0\sim 5\text{mm}$  之間還是有少量的  $\text{O}_2$  存在，而超出擴散火焰面後，因為燃燒反應結束，不再消耗  $\text{O}_2$ ，故隨  $r$  值增加， $\text{O}_2$  濃度逐漸回復至空氣中濃度。

比較甲烷與丙烷火焰的氣體濃度分析，在  $r=0$ ，甲烷火焰由於稍受預混火焰內甲烷未完全燃燒之洩漏影響，故還可稍微量到甲烷氣體，其餘徑向位置均量測不到甲烷濃度。比較  $\text{CO}$  與  $\text{CO}_2$  在甲烷與丙烷火焰內的分佈，甲烷與丙烷火焰欲達到相同之發熱量，由於鍵能的關係，甲烷之

碳原子總數較少，而丙烷較多，故在燃燒時，丙烷火焰內之  $\text{CO}$  與  $\text{CO}_2$  量均多於甲烷火焰，但兩者濃度變化趨勢則十分相近。

圖 8 為  $K=9$ ，甲烷火焰在  $[\Omega, U_i]=[13.1\%, 0.81\text{m/s}]$  與丙烷火焰在  $[\Omega, U_i]=[6.1\%, 0.69\text{m/s}]$ ，在自由噴流下， $Z=20\text{mm}$  之濃度分佈圖。由圖中  $\text{CO}_2$  濃度最高處，可大致判斷其擴散火焰面位置，比較甲烷與丙烷火焰濃度， $\text{CO}_2$  之值仍然以丙烷火焰較高，但因丙烷擴散火焰面位置較靠近中心，故超出擴散火焰面後，由於濃度梯度相同，丙烷火焰之  $\text{CO}_2$  值會稍低於甲烷火焰。且  $\text{O}_2$  值濃度亦因擴散火焰面的位置，隨著  $r$  增加，較快恢復至空氣濃度。而對  $\text{CO}$  而言，由於丙烷火焰在  $Z=20\text{mm}$  處，其距預混火焰錐頂較遠，故經擴散後，兩者濃度幾乎相近。

綜合言之，在  $K=9$  時三組不同燃料流率的噴流火焰具有良好的加熱效率互換性，其  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_2$  濃度分佈具有相似的變化趨勢，可見其濃度分佈亦具有良好的互換性。在等發熱量且等火焰高度之要求，高熱值的丙烷因含碳原子數較多，其  $\text{CO}_2$  與  $\text{CO}$  的生成量均較低熱值的甲烷稍微偏多，此點乃是瓦斯爐具由低熱值燃料更換為高熱值燃料時需特別注意的問題。

#### 四、參考文獻

- [1] Jones, H. R. N. *The Application of Combustion Principles to Domestic Gas Burner Design*. British Gas (1989).
- [2] 賴耿陽譯著, “瓦斯燃燒裝置實務,” 復漢出版社(1986)。
- [3] Junus, R., Stubington, J. F., and Sergeant, G. D., *Inter. J. Environmental Studies* Vol.45, pp.101-121 (1994).
- [4] Silver, R. S., *Inst. Gas Eng. Gas Res. Board Comm. GRB 39/23* (1948).
- [5] Waight, J. F., *Trans. Inst. Gas Eng.* 100, 684 (1950/1).
- [6] Von Elbe, G. and Grumer, J., *Indust. Eng. Chem.* 40, 1123 (1948).
- [7] Simmonds, W.A., *Trans. Inst. Gas. Eng.* 104, 557 (1954/5).
- [8] Prigg, J. A., *Br. Jun. Gas Assoc. Joint Proceed.* 38, 165 (1954/5).

表1 K值=9之出口流速、濃度、燃料與空氣流率、擴散火焰與預混火焰長度之對應數據表

K	Fuel	$U_i$ (m/s)	$\Omega$ (%)	$\dot{V}_{Fuel}$ (cc/s)	$\dot{V}_{Air}$ (cc/s)	$h_{DF}$ (mm)	$h_{PF}$ (mm)
9	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.50	8.3	2.6	29.2	70	*
	CH <sub>4</sub>	0.81	13.1	6.7	44.6	50	14
Modified	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.69	6.1	2.6	40.6	50	13
9	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.55	8.3	2.9	32.1	79	*
	CH <sub>4</sub>	0.89	13.1	7.4	48.9	55	17
Modified	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.80	5.7	2.9	47.8	55	11
9	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.60	8.3	3.2	35	90	*
	CH <sub>4</sub>	0.97	13.1	8.1	53.5	60	19
Modified	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.94	5.3	3.2	56.8	60	10

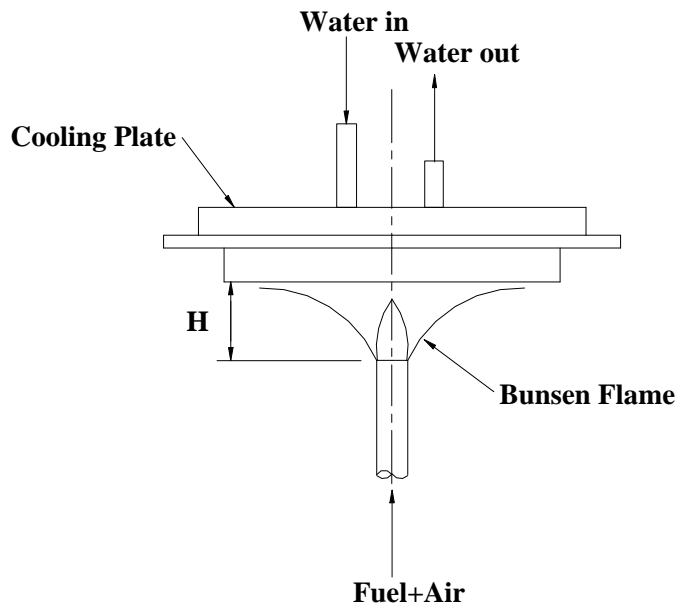


圖1 實驗設備示意圖

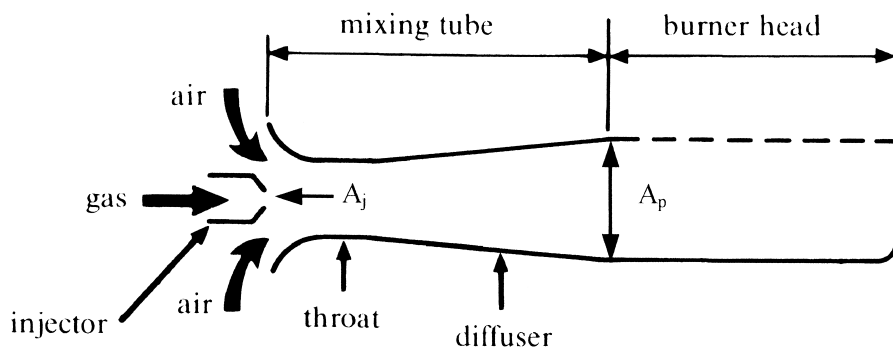


圖2 本生式燃燒器示意圖

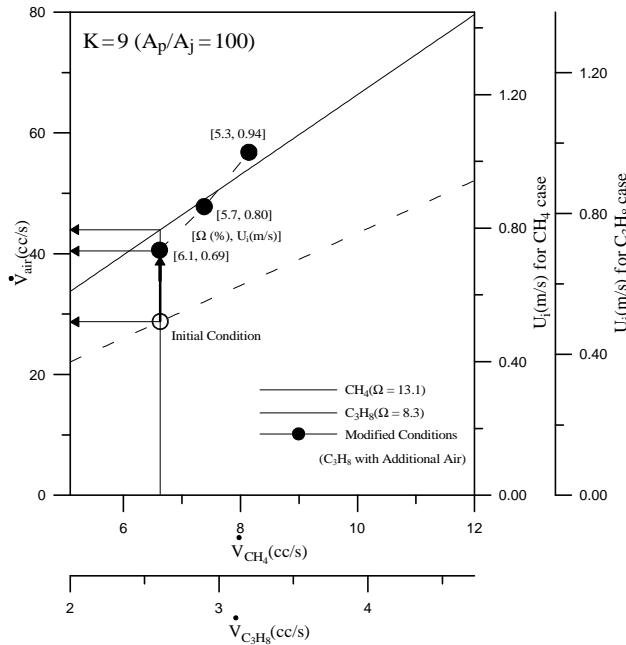


圖 3 K=9，甲烷與丙烷火焰等發熱量之計算空氣流率與速度圖及調整後空氣流率圖

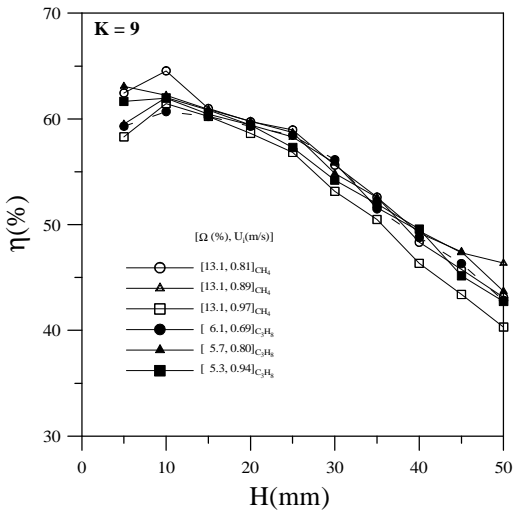


圖 4 K=9，甲烷與丙烷火焰之加熱效率圖

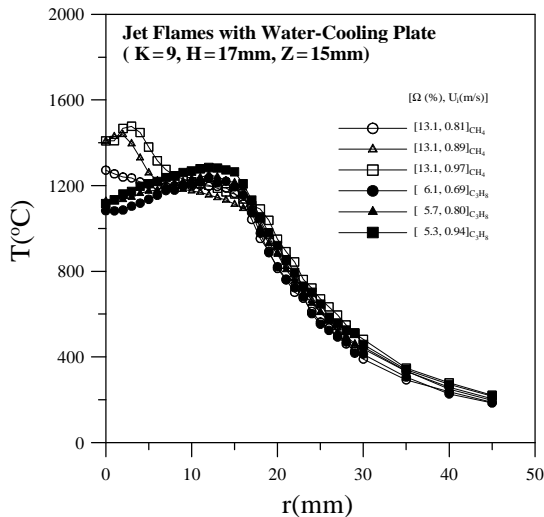


圖 5 甲烷與丙烷停滯面火焰(H=17mm)，在 Z=15mm，不同混合氣出口流速之溫度分佈圖

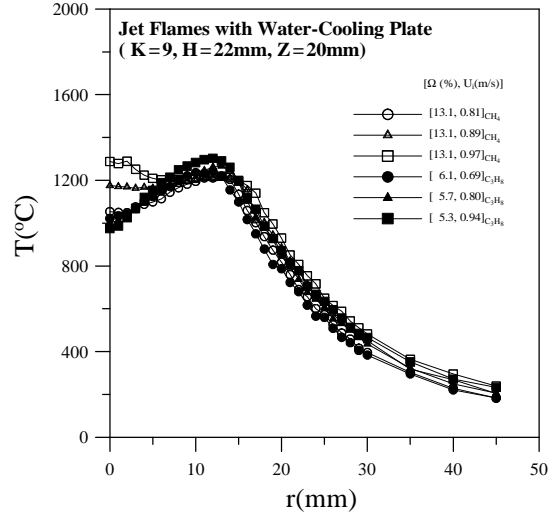


圖 6 甲烷與丙烷停滯面火焰(H=22mm)，在 Z=20mm，不同混合氣出口流速之溫度分佈圖

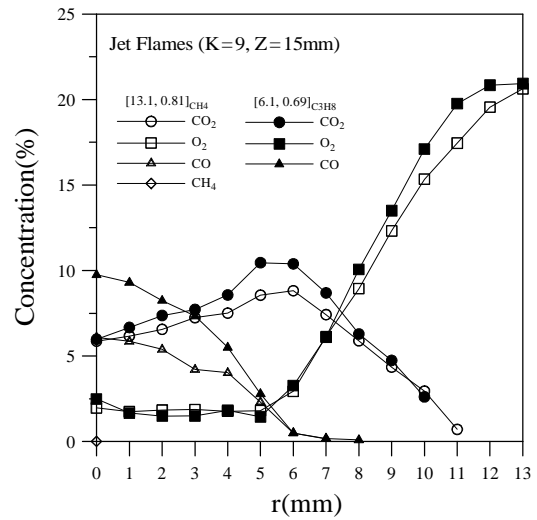


圖 7 自由噴流下，距燃燒器出口上方 15mm 處之濃度分佈圖

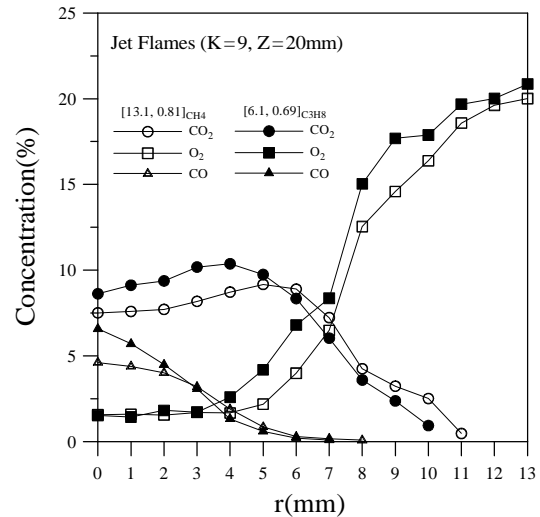


圖 8 自由噴流下，距燃燒器出口上方 20mm 處之濃度分佈圖