

連續 燃燒裝置에 있어서 火焰의 安定性에
關한 實驗的 研究

**李謹悟, *金龍洙, **梁玉龍

*京畿工業開放大學 産業安全工學科
**仁荷大學校 機械工學科

**Experimental Investigation of Flame Stability
in Continuous Flow Type Combustion Equipment**

Keun-Oh Lee,** Yong-Soo Kim,* Ok-Yong Yang,**

* *Dept. of Industrial Safety Engineering, Kyung Gi
Open University, Seoul*
** *Dept. of Mechanical Engineering,
In Ha University, Incheon*

ABSTRACT

An experimental study was made of flame stabilization in unconfined turbulent swirling propane gas flames using various degrees of swirl and equivalence ratios.

This study was carried out to investigate the effects of swirl number and equivalence ratio on the flow characteristics and the combustion characteristics in both nonreacting and reacting flow field of the model combustor which simulates the continuous type combustor for the practical use.

1. 緒 論

모든 産業에 燃燒設備은 必要不可缺한 것이라 할 수 있다. 가스터어빈 燃燒器, 보일러 및 工業用 加熱爐와 같은 實用 燃燒裝置의 大部分은 空氣의 흐름에 旋回를 加하여 燃料과 混合시켜 燃燒시키는 旋回擴散火焰의 形態를 갖는다. 擴散火焰은 燃料과 空氣가 燃燒器에 別途로 導入되고 이들의 擴散, 混合過程과 並行하여 燃燒가 일어나는 火焰으로서, 反應體가 反應帶에 들어가기 前에 豫混合되는 豫混合火焰과 對比되는 典型的인 火焰形態이다. 旋回流에 있어서 旋回度가 臨界值 以上이 되면 燃料噴出口 近處의 噴流中心 部近에 torroidal vortex type의 再循環領域¹⁾²⁾이 形成된다. 이 再循環領域은 火焰길이를 縮少시키며, 特히 熱과 化學活性種을 저장하고 있기 때문에 火焰의 安定性³⁾에 크게 寄與함으로써 高負荷 燃燒를 可能하게 한다는 등의 利點이 있어서 旋回亂流擴散火焰은 實用 連續流型 燃燒器에 널리 利用되고 있는 매우 重要한 燃燒形態라 하겠다.

近年에는 에너지 節約과 大氣汚染⁴⁾ 및 燃燒騒音⁵⁾ 등에 의한 公害問題가 臺頭됨에 따라 보다 合理的인 燃燒方式의 改善이 要求되고 있으며, 따라서 旋回亂流擴散火焰에 關한 研究에 있어서, 火焰의 安定性, 燃燒特性 및 NOx와 未燃成分의 排出特性 등을 把握하고 이를 改善하기 위해서는 旋回流과 그것에 의하여 誘起되는 再循環領域의 形成狀況 등의 流動狀態 및 燃料과 空氣의 混合과 燃燒過程을 調査함으로써 火焰의 構造를 明確히 究明할 必要가 있다.

本 研究에 있어서는 實用連續流型燃燒器를 對象으로 하고 있으며, 自作한 單純모델燃燒器를 使用하여 旋回도와 當量비가 旋回亂流擴散火焰에 있어서 未燃燒流動場의 流動特性과 燃燒特性에 미치는 影響에 對하여 實驗的인 研究를 遂行하였으며, 特히 旋回擴散火焰에 있어서 再循環領域이 火焰의 構造와 安定性에 미치는 影響이

至大하므로 再循環領域의 位置와 크기에 對하여 調査하였다.

本 實驗에서는 旋回亂流擴散火焰에 對하여 tuft法에 의해서 未燃燒 時의 흐름모양을 觀察하여 再循環領域의 位置와 크기를 調査하고, 火焰의 直接寫眞攝影과 肉眼觀察에 의해서 火焰狀態를 觀察하는 등의 定性的인 考察을 하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗條件

2-1 實驗裝置

本 實驗에 使用한 燃燒裝置는 燃燒形態가 實用的 燃燒器의 경우와 類似하게 모델化한 것이다. Fig.1에 本 研究를 위하여 製作한 燃燒裝置의 概要圖를 圖示하였다. 燃燒器의 下端 中心軸上에 位置한 燃料管①을 通하여 燃料가 流入되고, 이 燃料管和 同心이 되도록 設置된 8 個의 空氣流入口②으로 부터 燃燒用空氣가 流入

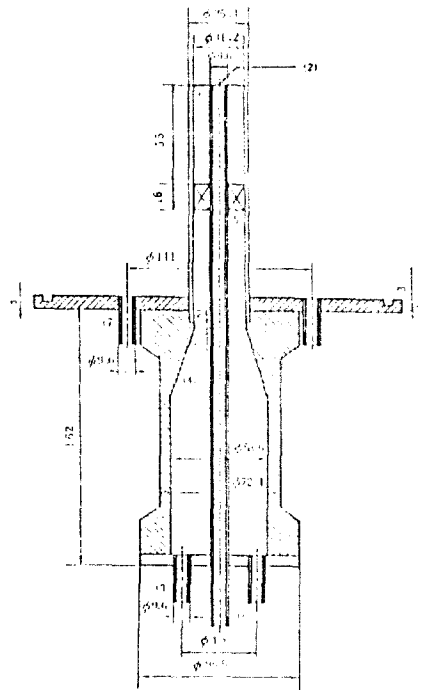


Fig. 1. Scheme of Vane-type Swirl Burner

된다. 이 空氣는 送風機의 振動을 排除할 수 있도록 送風 duct의 끝에서 同一圓周上에 等間隔으로 配列된 8個의 空氣供給口와 燃燒裝置下端의 8個의 空氣流入口를 連結하는 호스를 통하여 燃燒裝置에 供給된다. 流入된 空氣는 縮流部 ④를 거치는 동안 均一한 斷面速度分布로 된後, 旋回翼⑤를 經由, 旋回翼에 의하여 接線方向의 成分이 加해져 旋回流가 된다. 이 旋回流는 空氣噴出口⑥에서 地面에 對하여 垂直上方으로 噴出된다. 한편 旋回翼이 軸方向과 이루는角을 30°, 45°, 60°로 變化시킴으로써 旋回度를 實驗變數로 取한다.

이 旋回翼材는 두께 0.25 mm의 銅板을 使用하였으며, 6個의 旋回翼을 外徑 9.6 mm, 두께 0.85 mm인 銅管製 燃料管의 同心圓周上에 Helical gear를 製作하는 要領으로 홈을 파서 裝置하였다.

2-2. 實驗變數 및 實驗條件

燃燒에 있어서 旋回流는 高負荷安定燃燒를 위해서 主로 利用하여 왔다. 이 경우 旋回의 主要한 效果로서는 迅速한 混合과 周圍流體의 entrainment 率을 높임으로써 火焰길이를 줄이고, 強旋回의 경우는 再循環領域을 形成시킴으로써 火焰의 安定性을 向上시키는 效果를 준다. 旋回度는 旋回流의 特性을 나타내는 無次元數이며, 本 研究에서는 旋回度를 旋回發生裝置의 幾何學的 形狀으로부터 求하였다.²⁾ 表 1은 旋回翼 θ 에 對한 旋回度의 計算值를 나타낸 것이다.

Table 1. Relations of Swirl Number to Swirl Vane Angle

Swirl Vane Angle (θ)	30°	45°	60°
Swirl Number (S)	0.413	0.715	1.239

旋回도가 약 0.6 보다 작을 때는 再循環領域이 存在하지 않으며 弱旋回라 하고, 旋回度

S = 0.6인 값을 臨界旋回度라 한다. 또 旋回度 S가 0.6보다 큰 경우를 強旋回라 하며 再循環領域이 存在한다.

Table 2. Relations of Flow Rate to Equivalence Ratio

ϕ	Air Flow Rate Q_a (ℓ/min)	Mean Air Velocity in Pipe, (m/s)
1.2	99.4	2.40
1.0	119.3	2.88
0.8	149.2	3.60

또한, 當量比 ϕ 는 實際燃空比와 理論燃空比의 比로써 燃料流量을 一定하게 놓으면 $\phi = (Q_a)_{st.} / Q_a$ 와 같이 된다. 여기서 $(Q_a)_{st.}$ 는 理論空氣量, Q_a 는 實際空氣量을 나타낸다. 本 實驗에서 使用한 燃料인 工業用 propane 가스의 組成은 C_3H_8 , C_2H_6 , C_4H_{10} 이며, 이들의 體積分率은 各各 93.7%, 1.6%, 4.7%이다. 本 研究의 경우 燃料流量 $Q_f = 5 \ell/\text{min}$ 로 一定한 경우에 있어서 各 當量比에 對應하는 實際空氣量과 環狀管에서의 空氣의 平均速度를 計算하여 表 2에 表示하였다. 한편, 未燃燒實驗時에는 危險性을 피하기 위하여 空氣로 代用하였다.

3. 實驗方法

3-1. Tuft 法에 의한 流動의 可視化

燃燒場内の 가스흐름을 正確히 把握하는 것은 燃燒를 解析하는데 매우 重要하다. 그러나 再循環領域을 包含하는 燃燒器内の 流動場에 있어서, 流動現象을 正確히 把握하는 데는 많은 難點이 따름으로 一般의 未燃燒狀態의 流動現象을 把握함으로써 燃燒時의 流動特性을 推測하는 方法을 適用하고 있다. 한편 旋回擴散火焰에 있어서는 再循環領域의 位置와 크기가 燃燒狀態와 火焰의 形狀에 미치는 影響이 큼으로

흐름의 방향과 再循環領域의 位置를 測定하기 위하여 tuft 法을 多用하고 있다.

本 研究에서는 各種의 tuft 法⁶⁾ 中에서 tuft stick 法을 使用하였으며, 이것에 依해서 tuft 의 毛糸가 向하는 空氣의 流動方向과 毛糸의 振動幅을 sketch 함으로써 旋回도와 當量比의 變化에 따른 흐름의 形態를 求하였다.

3-2. 直接寫眞 撮影

亂流擴散火焰에 있어서 火焰길이는 火焰構造를 解析하기 위한 매우 重要한 因子이다. 따라서 亂流擴散火焰길이 測定에 關한 많은 理論的 및 實驗的 研究⁷⁾ 가 이루어지고 있다. 火焰은 空間에서 움직이고 있으므로 그 火焰길이를 直接測定하는 것은 매우 困難하다. 火焰길이 測定에는 一般的으로 火焰中心線上에서 最高溫度로 結定하는 熱的火焰길이, 最大CO₂ 濃도에 의한 化學的火焰길이 그리고 直接寫眞 撮影에 의한 可視火焰길이가 있으며 이들 사이의 誤差는 約 10%以內인 것으로 알려져 있다.⁷⁾

本 實驗에서는 直接寫眞에 의해서 火焰의 길이를 測定하였다. 이때 camera 露出時間이 길면 火焰길이의 peak 만을 測定하는 것이 되기 때문에, 露出時間을 1/250 sec., 조리개開度 f 1.4로 撮影한 火焰寫眞 15枚의 平均値를 取하여 火焰길이로 했다. 火焰이 途中에서 끊어지는 火焰이나, 심하게 잘룩한 火焰에 對해서는 不連續點, 또는 잘룩한 部分까지의 길이를 取했다.

4. 實驗結果 및 檢討

4-1. 未燃燒流動場의 흐름모양

各各의 實驗條件의 變化에 對한 燃燒狀態와 火焰의 安定性과의 關係를 알기 위해서는 燃燒流動場에서의 流動現象을 把握할 必要가 있다. 그러므로 燃燒時에 있어서 흐름의 測定이 바람직하나, 實測에는 많은 難點이 따른다. 따라서 燃燒에 의한 速度增加를 考慮한다면 燃燒時의

流動現象과 未燃燒時의 流動現象이 定性的으로 對應된다고 생각되며 따라서 未燃燒時의 流動現象을 tuft 法에 의해 測定하였다. tuft 에 의한 測定位置는 jet 中心으로 부터, 半徑方向距離 2mm 間隔으로 $r/R = 1.13$ 인 位置까지, 軸方向距離는 노즐出口로 부터 5mm 間隔으로 $L/D = 2.26$ 까지 測定하였다. 여기서 D는 空氣 噴出管의 外徑, R는 半徑, 그리고 L은 軸方向 距離를 나타낸다.

Fig. 2는 當量比 $\phi = 0.8$ 인 경우에 있어서 旋回翼角이 (a) $\theta = 30^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$ 로 變化하는 경우의 未燃燒流動場에 있어서 tuft 에 의한 肉眼觀察의 結果를 sketch 한 것이다. 그림에서 旋回空氣의 影響으로 因한 旋回

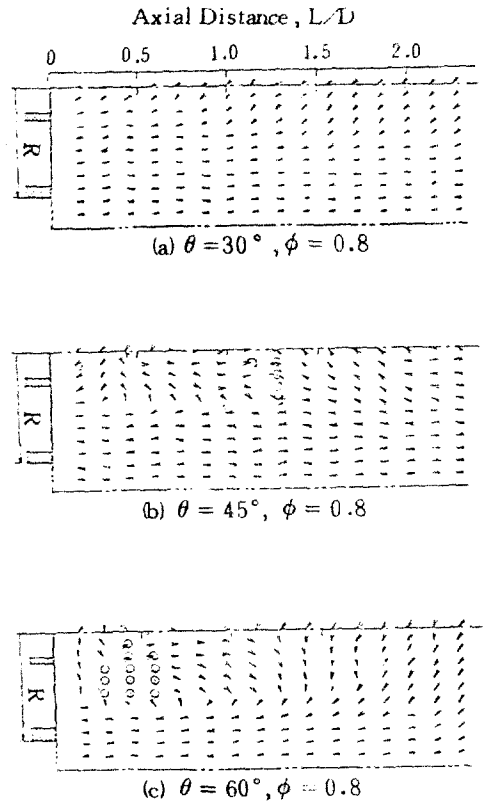


Fig. 2. Flow Visualization Sketch of Tufts

流動場의 形成이 나타나고 있으며 旋回翼角 $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ 의 強旋回에서는 再循環領域이 나타나고 있다. Fig. 2(b)의 $\theta = 45^\circ, \phi = 0.8$ 인 경우에는 軸方向距離 $L/D = 0.30$ 에서 $L/D = 1.41$ 까지, 半徑方向距離 $r/R = 0.56$ 인 위치에 걸쳐서 中央部再循環領域이 存在하며, 그 形狀은 橢圓形態를 이루고 있다. 그리고 再循環領域의 下流側 끝領域에서는 흐름의 衝突現象이 나타나고 있으며, 이 現象은 再循環領域으로 流入되는 流體와 再循環領域을 벗어나는 旋回流體 사이의 衝突現象이라고 생각된다.

Fig. 2(c)의 $\theta = 60^\circ, \phi = 0.8$ 인 경우에 있어서는 中心軸上的 再循環領域의 位置는 노즐 上端으로부터 $L/D = 0.08$ 에서부터 約 $L/D = 1.7$ 까지, 半徑方向으로 $r/R = 0.73$ 까지이며 그 形狀은 圓錐形을 하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3은 旋回翼角이 $\theta = 60^\circ$ 의 強旋回인 경우에 있어서 當量비가 (a) $\phi = 1.2$, (b) $\phi = 1.0$,

(c) $\phi = 0.8$ 로 變化한 경우의 流動形態를 圖示한 것이다. (a) $\theta = 60^\circ, \phi = 1.2$ 인 경우, 中心軸上的 再循環領域의 位置는 노즐 上端으로부터 $L/D = 0.35$ 인 位置에서 始作하여, $L/D = 1.55$ 까지 存在하고 있고, 半徑方向으로 $L/D = 0.68$ 인 位置까지 걸쳐있다. Fig. 3(b)는 旋回空氣量이 增加한 $\phi = 1.0$ 인 경우의 流動形態이다. $\phi = 1.2$ 인 경우에 比하여 再循環領域이 形成되기 始作하는 軸方向位置가 노즐 上端쪽으로 多少 移動하고 있으며 全般的으로 再循環領域의 長이가 增加되고 있다. 또 半徑方向 幅은 約 $r/R = 0.73$ 으로서 $\phi = 1.2$ 에 比하여 少幅으로 增加하고 있다. 再循環領域의 形狀은 $\phi = 1.2$ 인 경우와 매우 恰似함을 볼 수 있다. Fig. 3(c)는 $\theta = 60^\circ, \phi = 0.8$ 의 경우로써 旋回空氣量의 增加로 因하여 再循環領域의 位置가 노즐 바로 上端, 即 $L/D = 0.08$ 의 流動場까지 移動하여, 再循環領域의 크기가 $\phi = 1.0$ 인 경우에 比하여 增加되었다.

Fig. 4는 再循環領域이 存在하는 $\theta = 45^\circ$ 와

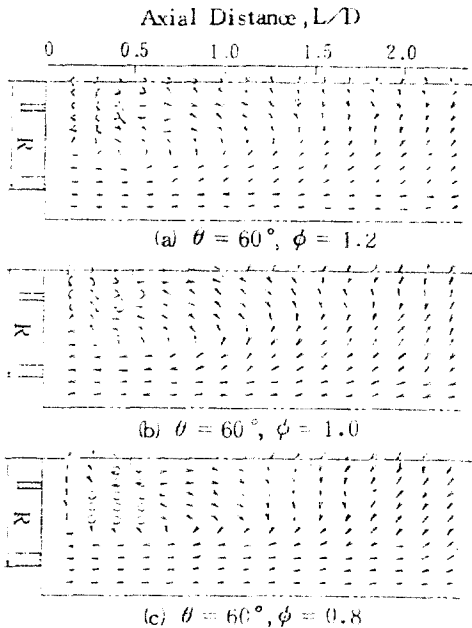


Fig. 3. Flow Visualization Sketch of Tufts

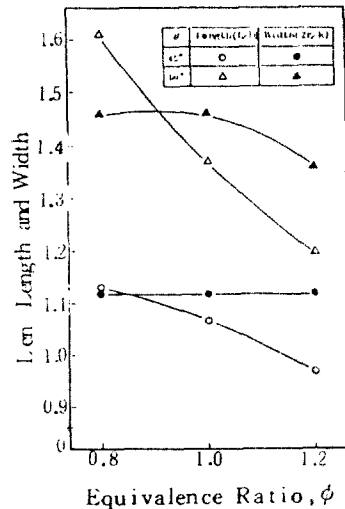


Fig. 4. Effect of Swirl Vane Angles on Central Recirculation Zone Length and Width

$\theta = 60^\circ$ 의 強旋回의 경우에 있어서 旋回翼角 θ 와 當量比 ϕ 가 再循環領域의 길이와 幅에 미치는 影響에 對한 tuft 實驗의 結果를 나타낸 것이다.

그림으로부터 當量比가 一定할때 旋回度가 增加할수록 再循環領域의 길이와 幅이 增加하며, 旋回度가 一定한 경우, 當量比가 增加하여 旋回空氣量이 減少할수록 再循環領域의 길이는 減少하고 있으나 幅에는 큰 變化가 없다.

4-2. 火焰의 肉眼觀察

Fig.5는 旋回翼角에 따른 火焰의 安定性을 나타낸다. 自由噴流火焰인 $\theta = 0^\circ$ 인 경우 當量比 $\phi = 1.5$ 附近에서 노즐에 附着한 火焰이 觀察되나 當量比의 微小한 減少에도 浮上焰으로

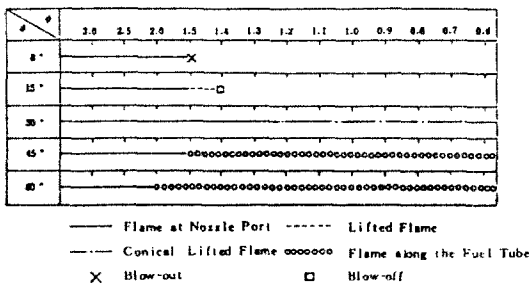


Fig. 5. Effect of Swirl Vane Angles Flame Stability

變함과 同時에 blow-out 된다. 旋回翼角 $\theta = 15^\circ$ 인 경우 當量比 $\phi = 1.5$ 까지 노즐에 附着한 火焰이 觀察되고 한 순간에 浮上焰으로 變한다. 旋回翼角 $\theta = 30^\circ$ 의 경우, 當量比가 約 $\phi = 1.22$ 보다 큰 값을 가질때 燃料노즐에 附着된 火焰이 形成되나, 작을때는 火焰길이 가 급격히 짧아지는 浮上焰이 形成된다. 이때의 浮上焰과 $\theta = 15^\circ$ 때의 浮上焰을 比較하여 보면 $\theta = 15^\circ$ 일때보다 燃料噴出口에 가까운 곳에서 火焰이 形成되며 $\theta = 15^\circ$ 일때의 浮上焰은 火焰面이 圓形이고 不安定한 火焰인데 比較하여, $\theta = 30^\circ$ 일때의 浮上

焰은 流量의 增加에 따라서도 blow-off가 되지 않는다. 旋回翼角 $\theta = 45^\circ$ 의 경우, $\phi = 1.5$ 일때 燃料노즐出口 보다도 上流에서 燃料管外壁을 따라 火焰이 形成되고 空氣流量을 增加시킬수록 더욱 上流쪽으로 移動하여 노즐 附着火焰이 形成됨을 볼 수 있다. 또 $\theta = 60^\circ$ 의 경우, $\phi = 2.0$ 에서 始作되어 같은 傾向을 나타내었다. 이 現象은 燃燒用 空氣에 強旋回가 걸림으로 말미암아 생긴 vortex core가 노즐出口보다 上流에 까지 影響을 미치기 때문에 燃料가 再循環되어 노즐 附着火焰의 安定된 火焰이 形成된다고 思料된다.

4.3. 火焰길이의 測定

火焰길이는 火焰構造를 研究하는데 매우 重要な 因子이다. Fig.6은 旋回翼角 θ 와 當量比 ϕ 의 變化에 對한 火焰길이의 直接寫眞攝影에 의한 測定結果를 圖示한 것이다. 各各의 旋回翼角에 對하여 當量比 ϕ 가 增加할수록 火焰길이 가 增加하고 있음을 볼 수 있다. $\theta = 30^\circ$

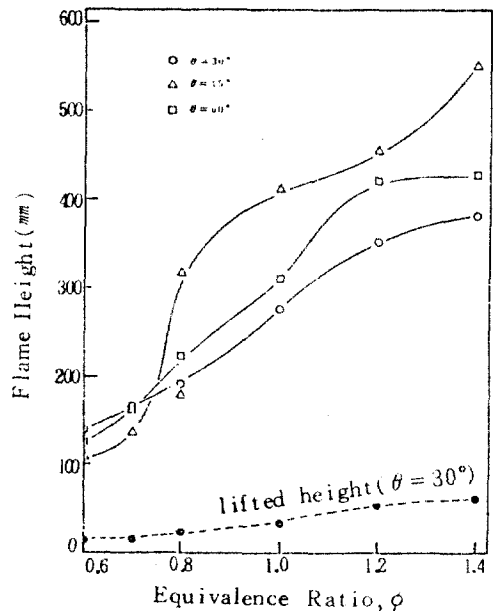


Fig. 6. Effect of Swirl Vane Angles and Equivalence Ratio on Flame Height

의 弱旋回인 경우, 各 當量比에 있어서 火焰의 길이는 $\theta = 45^\circ$, $\theta = 60^\circ$ 에 比하여 짧다. 그러나, 이 경우의 火焰은 浮上焰이므로 强旋回인 경우의 火焰과 同一條件으로 比較될 수 없다. 한편, 火焰浮上 높이는 當量比가 增加할수록 높아져 火焰의 不安定狀態를 高調시키고 있다. $\theta = 45^\circ$ 와 $\theta = 60^\circ$ 인 强旋回인 경우의 火焰을 比較하면 旋回度가 增加된 $\theta = 60^\circ$ 인 경우가 일반적으로 $\theta = 45^\circ$ 에 比하여 火焰길이 짧아지고 있다. $\theta = 60^\circ$ 인 경우에 있어서는 $\phi = 0.6$ 에서 $\phi = 1.2$ 까지는 火焰길이 거의 直線的으로 增加하며 $\phi = 1.2$ 以上에서는 거의 一定하게 나타나고 있다. $\theta = 45^\circ$ 인 경우에 있어서는 當量比가 $\phi = 0.6$ 에서 $\phi = 0.8$ 로 變化할 때 火焰길이 급激히 길어지고 있어서 把握하지 못하다.

5. 結 論

1) $\theta = 30^\circ$ 의 弱旋回인 경우는 再循環領域이 存在하지 않으나, $\theta = 45^\circ$ 와 $\theta = 60^\circ$ 의 强旋回인 경우는 流體의 遠心力에 의한 逆流로 因하여 再循環領域이 存在한다.

2) 再循環領域의 形態는 $\theta = 45^\circ$ 인 경우는 橢圓形, $\theta = 60^\circ$ 인 경우는 圓錐形으로 나타나며 當量比 ϕ 가 減少할수록 再循環領域이 形成되기 始作하는 位置는 노즐上端 近處로 移動하고 있다.

3) 一定當量比의 경우, 旋回度가 增加할수록 再循環領域의 길이와 幅은 增加하며, 旋回翼角이 一定한 경우, 當量比가 增加하면 再循環領域의 길이는 減少하나 그 幅은 거의 一定하다.

4) 旋回翼角 $\theta = 30^\circ$ 인 弱旋回인 경우의 火焰에서는 圓錐形의 浮上火焰으로써 매우 不安定한 火焰形狀을 하고 있으며, 當量比 ϕ 가 增加할수록 노즐로부터의 火焰의 浮上높이가 높아지

고 있다.

5) 旋回翼角 $\theta = 45^\circ$, $\theta = 60^\circ$ 인 强旋回인 경우의 火焰에서는 再循環領域의 存在로 因하여 노즐附着火焰이 形成되며, 旋回翼角이 增加하고 當量比가 減少할수록 火焰은 노즐에서의 附着길이 길어짐과 더불어 더욱 安定된 火焰構造를 얻을 수 있다.

6) 火焰의 길이는 旋回翼角이 큰 $\theta = 60^\circ$ 인 경우가 $\theta = 45^\circ$ 인 경우에 比하여 짧으며, 兩者 共히 當量比가 增加함에 따라 길어지고 있다.

參 考 文 獻

1. Syred, N. and Beer, J.M., "Combustion in Swirling Flows: A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, 1974, pp. 143-201.
2. Beer, J.M. and Chigier, N.A., "Combustion Aerodynamics," John Wiley and Sons, 1972, pp. 100-146.
3. Syred, N., Chigier, N.A., and Beer, J.M., "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets with Swirl," *Thirteenth Symposium (Int'l) on Combustion*, 1971, pp. 617-624.
4. Niedzwiecki, R.W. and Jones, R.E., "Pollution Measurements of a Swirl-can Combustor," *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 6, June 1974, pp. 844-849.
5. Gupta, A.K., Syred, N., and Beer, J.M., "Fluctuating Temperature and Pressure Effects on The Noise Output of Swirl Burners," *Fifteenth Symposium (Int'l) on Combustion*, 1974, pp. 1367-1377.
6. 淺沼強, "流れの可視化パドブツゲ, 朝倉書店, 1981, pp.143-168.
7. Ibrahim, Said M.A., "The Structure of Turbulent Free Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 60, 1985, pp. 141-155.