

<論 文>

環狀旋回噴流의 燃燒特性에 관한 研究

李 昌 植*

(1983年 6月 30日 接受)

A Study on the Combustion Characteristics of Annular Swirl Jet

Chang Sik Lee

Abstract

This study presents the combustion characteristics and flame structure of annular swirling flow when there were changes the equivalence ratio and swirl number of swirling jet of fuel-air mixture.

The conclusions of this study are as follows;

During the investigations in which the change of equivalence ratio and swirl number were studied, three basic shapes of flame were observed in this study.

Visible flame lengths of swirling jet results in the decrease with increasing of swirl number and air-fuel ratio of mixture. Radial distribution of flame temperature with strong swirl is higher than that of weak swirl at the same equivalence ratio of mixture.

The angle of spread of the annular jet increases with the increase of swirl number.

When the swirl intensity is increased in a jet, the decay of concentration of carbon dioxide is decreased with the distance from nozzle exit of burner.

記 號 說 明

- (CO₂) : CO₂ 가스濃度の 噴流길이 方向의 값
- (CO₂)_{max} : CO₂ 가스濃度の 노즐出口부근의 最大値
- d : 노즐 지름(mm)
- L : 可視火炎길이(mm)
- G_z : 噴流內의 軸方向運動量(kg·m)
- G_φ : 噴流內의 角運動量(kg·m)
- Q_A : 空氣流量(m³/s)
- Q_F : 燃料流量(m³/s)
- R : 旋回器의 반지름(m) 또는 반지름方向의 거리(mm)
- r : 旋回器 반지름(mm)
- v_z : 噴流의 軸方向速度成分(m/s)
- v_r : 噴流의 반지름方向速度成分(m/s)

- Z : 軸方向의 거리(mm)
- ρ : 空氣密度(kg·s²/m⁴)
- φ : 當量比
- θ : 旋回器메인의 軸方向에 대한 설치 각도(deg)

1. 序 論

일반으로 燃燒器 內의 연소 상태는 그 내부의 混合 氣流 또는 旋回流의 流動狀態에 따라서 달라지며 특히 연소기 內의 연료와 공기의 混合特性은 연소를 지배하는 인자가 되고 있다.

각종 加熱爐의 燃燒器, 가스 터빈의 燃燒器 등에 이용되는 旋回噴流는 燃燒室 內의 火炎을 제어하는 수단으로 이용될 뿐만 아니라 燃燒生成物중의 未燃 및 有害成分의 低減을 目的으로 널리 응용되고 있다.

연소기 內의 유동장에 旋回가 주어지면 연소기 內의

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

흐름은 반지름 방향과 축방향의 압력 구배가 생겨서 이것이 흐름의 場에 영향을 미치게 되며 旋回噴流버너의 경우에는 旋回流에 의한 연료와 공기의 混合狀態가 변화하므로 火炎의 安定性, 燃燒狀態 등에 중대한 영향을 미치게 된다. 그러므로 旋回噴流와 旋回噴流의 燃燒에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다.

旋回噴流에 관한 주요 연구의 내용을 살펴보면 주로 실험적인 문헌이 많고 일부 수치 계산에 관한 연구가 있다.

Chigier 와 Beér⁽¹⁾는 旋回器 내로 軸方向의 공기와 接線方向의 공기를 유입시켜 旋回流의 壓力分布와 速度分布를 구하였으며, Kerr 와 Fraser^{(2),(3)}는 가이드 베인을 이용한 선회기를 제작하여 난류 분류에 미치는 선회기류에 관한 영향을 연구하여 선회수가 $0.1 < S < 0.3$ 일 때 노즐 기류의 최적 혼합 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Liversey 와 Wilcox⁽⁴⁾는 화염 레지스터에 관한 공기역학적 연구에서 선회기 위치와 quarl 각과의 관계를 구하였다. 이 연구에서 最適 quarl 角은 선회기 지름에 따라 변화하는 것을 지적한 바 있다.

Mathur 와 Maccallum⁽⁵⁾은 旋回噴流가 노즐로부터 분출된 후 곧 팽창하며 $(2\sim 4)d$ 이후의 膨脹은 相似擴散角에 따라 거의 선형적으로 변화함을 지적하였다.

한편 旋回噴流 또는 旋回噴流의 燃燒에 관한 연구로는 拋物型微分方程式을 풀어서 흐름의 場에 대한 狀態를 구한 Patanker⁽⁶⁾의 연구와 循環流를 고려한 일반 橢圓型偏微分方程式을 數值計算한 Gosman⁽⁷⁾의 方法 등이 있다. 그러나 이들 방법도 단순한 점성 계수식을 사용하고 또 유입 속도 분포가 일정하다고 생각하고 있으므로 아직 많은 문제점이 제기되고 있다. 그러나 旋回燃燒器 내의 흐름은 亂流旋回噴流이며 이는 또한 복잡한 物理的 化學的 變化를 수반하는 燃燒過程을 內包하고 있으므로 旋回噴流에 관한 解析的 研究는 극히 制限된 실정이며 연소기의 性能向上과 設計 등은 주로 실험적인 연구에 바탕을 두고 있다^{(8)~(18)}. 이와 같이 旋回噴流의 燃燒는 燃燒現象 그 자체의 복잡성과 선회기류의 특성으로 인하여 선회 공기류와 연료의 혼합, 선회기류와 화염 사이의 관계, 화염의 성질, 화염의 연소 특성 등 아직 밝혀지지 않은 점이 많이 있다.

본 연구에서는 環狀放射噴流를 갖는 燃料噴射노즐과 環狀旋回를 일으키는 旋回器로 구성된 燃燒버너를 제작하고, 연료의 當量比와 旋回數를 변화시켰을 경우 火炎의 形狀과 火炎의 可視길이의 變化, 火炎의 平均가스溫度分布와 燃燒가스濃度 등의 旋回火炎의 燃燒特性

과 巨視的 構造에 중점을 두어 연구한 것이다.

2. 旋回噴流의 旋回度

버너에서 空氣와 燃料의 混合을 促進하고 火炎을 安定化하기 위하여 旋回를 부여하며 旋回流의 영향을 定量的으로 표시하기 위하여 旋回數(swirl number) S 를 使用한다⁽¹⁾.

旋回數 S 는

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (1)$$

로 표시 된다. 여기서

$$G_\phi = 2\pi\rho \int_0^R v_x v_r R^2 dR \quad (2)$$

$$G_x = 2\pi\rho \int_0^R v_x^2 R dR \quad (3)$$

이다.

軸方向의 管內流중에 반지름 r 인 허브에 고정된 안내 베인을 갖는 경우 선회수 S 는 다음 식으로 주어진다⁽²⁾.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (\frac{r}{R})^3}{1 - (\frac{r}{R})^2} \right] \tan\theta \quad (4)$$

$\sigma = \frac{r}{R}$ 이라 하면

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \sigma^3}{1 - \sigma^2} \right] \tan\theta \quad (5)$$

로 표시된다.

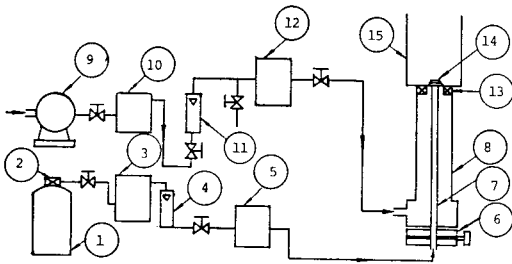
3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1. 實驗裝置

Fig. 1은 본 실험에 사용한 實驗裝置의 概略圖를 나타낸 것이다. 實驗裝置는 燃料供給裝置와 旋回空氣流供給裝置로 大別된다. 本 實驗에서 使用燃料로는 프로판 가스를 사용하였으며 燃料供給系統은 燃料탱크 ①로부터 流量計 ④와 서어지 탱크 ⑤를 거쳐 노즐로부터 噴出된다. 한편 旋回空氣流의 供給系統은 원심 송풍기로부터 서어지 탱크 ⑩를 거쳐 流量計 ⑪에서 計量되어 연료 노즐 ⑬와 同軸으로 設置되어 있는 旋回器에 의하여 旋回噴出되도록 하였다.

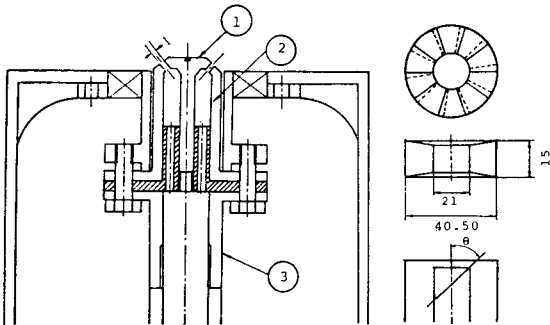
Fig. 2는 버너의 구조 개요를 나타낸 것이고, Fig. 3은 베인 선회기를 나타낸 것이다.

연료 노즐은 가스 터빈 燃燒器를 참고로 하여 연료의 분출 각도가 축방향에 대하여 45° 인 圓環모양의 슬릿으로 하였다. 또 環狀노즐의 폭은 1mm로 하였다.



- ① Fuel (C₃H₈) bomb
- ② Regulator
- ③ Surge chamber
- ④ Fuel flow meter
- ⑤ Surge chamber
- ⑥ Transverse system
- ⑦ Fuel line
- ⑧ Burner body
- ⑨ Centrifugal compressor
- ⑩ Surge chamber
- ⑪ Air flow meter
- ⑫ Surge chamber
- ⑬ Swirler
- ⑭ Fuel nozzle
- ⑮ Cylinder

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



- ① Annular slit adjuster
- ② Nozzle body
- ③ Fuel pipe

Fig. 3 Vane swirler

Fig. 2 Experimental burner

며 旋回器는 8枚의 베인으로 구성되며 베인의 설치 각도 θ 는 30° , 45° 와 60° 의 3종으로 하였다.

3.2. 實驗方法

實驗은 Fig. 1 과 같은 旋回噴流 버어너 실험 장치를 사용하여 주어진 混合비에 대하여 火炎의 形狀 및 길이의 변화, 火炎의 平均溫度分布와 가스濃度分布를 구하였다.

선회 분류의 當量比는 0.8~4.9의 범위에서 실험하였고, 火炎의 形狀과 可視길이는 직접 사진에 의하여 비교하였고, 가스의 平均溫度分布는 Pt/Pt-Rh 13% 열전대(지름 0.3mm)를 사용하여 측정하였다. 이 때 當量比는 연료 유량을 일정하게 놓고 공기 유량을 변화

시켜서 실험하였다.

선회 공기의 선회수는 $S=0.453$, $S=0.785$, $S=1.359$ 의 3가지 경우에 대하여 실험하였다.

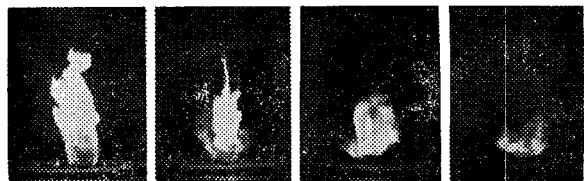
4. 實驗結果 및 考察

4.1. 旋回噴流火炎의 形狀

Fig. 4 는 선회 분류의 선회 각도를 $\theta=30^\circ$, 45° , 60° 의 3가지 경우에 대한 火炎 형태의 직접 사진을 나타낸 것이다.

선회 각도 θ 가 작은 선회수 $S=0.453$ ($\theta=30^\circ$)에서 火炎 형상은 當量比 $\phi=1.234$ 까지는 선회 공기량의 증가와 더불어 火炎의 길이는 조금씩 감소하나 火炎의 형상은 거의 변화하지 않았다. 이것은 $\phi=1.234$ 까지는 분류의 축방향의 운동량이 크므로 火炎의 형상은 비교적 가늘고 길게 나타나며 火炎의 안정성도 나쁜 것으로 나타났다. 이와 같은 형태의 火炎을 A형 火炎이라 하기로 한다. 그러나 $\phi=1.139$ 부근에서부터는 火炎의 길이는 급격히 저하하고 또 火炎의 모양도 점차 A형 火炎의 선단부가 남아 있는 형태로써 존재하였으며, 같은 當量비에서 $S=0.785$ ($\theta=45^\circ$)일 때에는 火炎 길이는 더욱 짧아지면서 그 형태는 Fig. 4(c)의 모양에 접근하게 되며 더욱 선회수가 증가하여 $S=1.359$ 부근에서는 火炎의 길이는 짧아지면서 A형 火炎의 선단부가 약간 남아 있는 구형에 가까운 B형 火炎이 되었다. 이 경우에는 A형 火炎에 비하여 축방향 및 반지름 방향으로 충분한 순환류 영역을 가지므로 火炎의 길이도 짧아지고 火炎의 선단부가 돌출된 모양으로 된다고 생각된다. $S=0.453$ 일 경우 더욱 공기 유량을 증가시켜 $\phi=1.058$ 이상이 되면 火炎의 형상과 길이는 거의 변화하지 않고 일정한 모양의 火炎이 형성되는데 이 때의 火炎은 중심부가 움푹들어간 역반구형인 C형 火炎 (Fig. 4 (d))이 된다.

$S=0.785$ 일 경우에는 $\phi=1.346$ 까지는 火炎의 형상은 거의 변화하지 않고 단지 火炎의 길이만이 공기량



$\phi=1.234$ $\phi=1.234$ $\phi=1.234$ $\phi=1.139$
 $S=0.453$ $S=0.785$ $S=1.359$ $S=1.359$
 (a) (b) (c) (d)

Fig. 4 Flame shapes of swirl jet

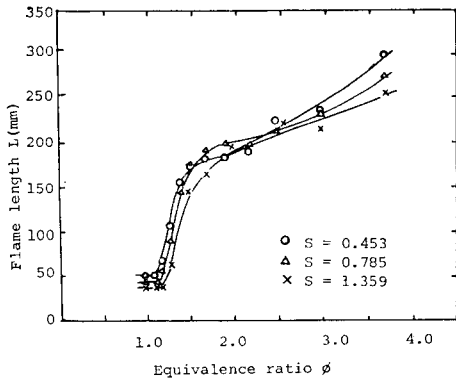


Fig. 5 Effect of swirl number on flame length

의 증가에 따라 감소하는 A형 화염을 나타내고 있으나 $\phi=1.234$ 에서부터 화염의 형상은 점차 B형 화염에 접근한다. $\phi=1.058$ 이하에서는 공기량의 증대에 따라 화염의 형상과 길이가 거의 변화하지 않는 역반구형의 C형 화염으로 되었다.

$S=1.359(\theta=60^\circ)$ 에서는 $\phi=1.346$ 까지는 A형, $\phi=1.234$ 에서 B형, $\phi=1.139$ 이하에서는 C형 화염으로 되었다.

4.2. 旋回噴流火炎의 길이

Fig. 5는 선회 분류 화염의 可視길이 $L(\text{mm})$ 과 당량비 ϕ 와의 관계를 도시한 것이다. 선회 분류 화염의 가시길이는 선회기 배인 각도가 일정할 경우, 즉 선회수가 일정할 때 선회 분류 공기량이 증가함에 따라 당량비 $\phi=1.139$ 까지는 점차로 감소하는 경향을 나타내었다. 선회 분류 화염의 길이는 $S=0.453$ 인 약선회일 때에는 공기량의 증가에 따라 점차 감소를 보이다가 당량비 $\phi=1.48$ 에 달하면서 급격한 감소를 보였으며, $\phi=1.139$ 에서부터는 공기량이 증가하여도 거의 변화하지 않고 일정한 형상을 나타내었다.

선회수 $S=0.785$ 인 경우에도 대체로 화염 길이의 변화 경향은 유사하였으며 $S=1.359$ 에서는 $S=0.453$, $S=0.785$ 의 경우보다 화염 길이의 감소 폭이 크며 $\phi=1.234$ 에서부터 화염의 길이는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 선회 분류 화염의 길이는 연료와 공기의 이론 혼합비에 해당하는 理論比 즉, $\phi=1$ 보다 조금 농후한 혼합비에서부터 거의 일정한 것으로 나타났으며 선회수의 영향을 비교하여 보면 $S=1.359$ 일 때가 약선회일 때보다 농후한 혼합비에서도 화염의 길이가 짧아지는 것으로 나타났다. 이러한

경향은 선회 분류의 축방향의 운동량보다 반지름 방향의 운동량이 커서 연료와 공기의 혼합이 약선회일 경우보다 촉진되기 때문인 것으로 생각된다.

4.3. 旋回噴流火炎의 溫度分布

Fig. 6은 당량비 $\phi=1.48$ 이고 流旋數 $S=0.453$ 일 때의 분류 축방향의 거리 $Z=10, 30, 50, 70\text{mm}$ 인 곳에

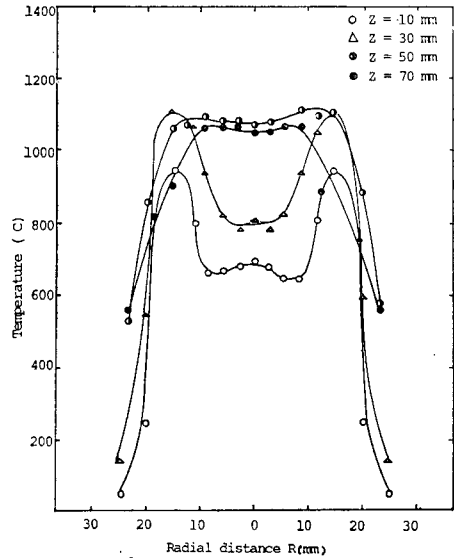


Fig. 6 Radial distribution of gas temperature at $S=0.453$

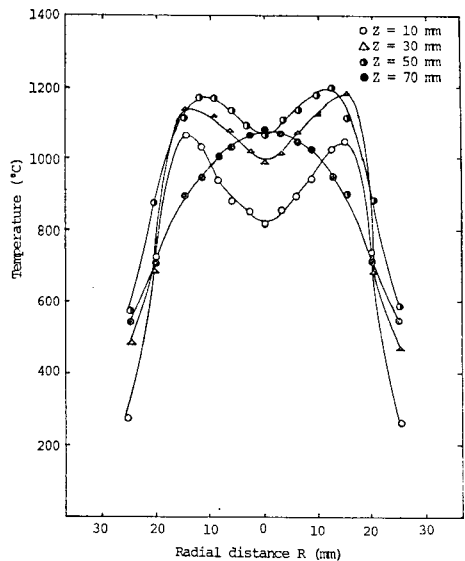


Fig. 7 Radial distribution of gas temperature at $S=1.359$

서 화염의 반지름 방향의 온도 분포를 나타낸 것이다. 이 선도에서 알 수 있는 바와 같이 화염의 반지름 방향의 온도 분포는 축방향의 거리 $Z=10\text{mm}$ 일 때가 대체로 가장 낮고, $Z=30\text{mm}$ 에서는 축 중심 주위에서는 낮으나 $R=15\text{mm}$ 부근에서 최대치를 나타내었다가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 축방향의 거리가 점차로 증가함에 따라 $Z=50, 70\text{mm}$ 에서는 $Z=10, 30\text{mm}$ 일 경우보다 중심부와 반지름 방향의 온도 분포는 높고 완만한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 선회수 $S=1.359$ 인 경우의 반지름 방향의 가스 온도 분포를 나타낸 것이다. 이 때에 고 온도 분포는 $S=0.453$ 일 때와 유사하지만 막선회일 때보다 높은 온도 분포를 보이고 있으며 같은 축방향의 거리라 하더라도 그 온도 분포가 높은 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 동일한 당량비에 대하여 연료와 공기의 혼합이 촉진되기 때문인 것으로 생각된다. 이 Fig. 7에서 보는 바와 같이 화염 내의 온도 분포는 $Z=50\text{mm}$ 일 때가 가장 높고, $Z=10, 30\text{mm}$ 일 때도 Fig. 6과 비교하여 보면 $S=1.359$ 일 때가 전체적인 온도 분포는 높았다. 한편 $Z=70\text{mm}$ 일 경우에는 노즐 중심부의 도가 가장 높고 噴流의 중심에서 반지름 방향의 거리가 멀어질수록 온도가 낮아졌다. 이러한 경향은 축방향의 운동량에 비하여 반지름 방향의 운동량이 커지기 때문에 화염의 길이는 짧아지고 온도 분포도 $S=1.359$ 일 경우가 $Z=10\sim 50\text{mm}$ 영역에서 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한 噴流가 반지름 방향으로 거리 $R=15\text{mm}$ 인 부분에서 돌출된 모양을 갖는 것은 環狀噴流의 특징으로 지적할 수 있다. $Z=70\text{mm}$ 에서는 環狀噴流가 合流하여 마치 圓形噴流와 같은 효과를 가짐을 뜻하게 된다. 이러한 현상은 多賀⁽¹⁵⁾의 環狀噴流에 대한 기본적인 특성에 관한 연구에서도 지적된 바 있다.

Fig. 8은 $S=0.453, \phi=1.48$ 일 경우의 가스 온도 분포를 표시한 것이고, Fig. 9는 $S=1.359, \phi=1.48$ 일 경우의 온도 분포를 나타낸 것이다.

$S=0.453$ 일 때 等溫線의 분포를 살펴보면 高溫域의 等溫線의 모양이 축방향으로 길고 반지름 방향의 크기가 작으며 등온선 간격도 $S=1.359$ 일 경우에 비하여 좁은 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 9에서 보는 바와 같이 $S=0.453$ 일 때보다 等溫線의 온도도 높으며 또 반지름 방향의 等溫線의 간격도 크고 온도도 높았다. 이러한 경향은 선회수가 증가함에 따라 선회도가 증가하게 되고 이에 따라 燃料과 空氣의 混合도 증진되기 때문인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 10은 $\phi=1.48$ 이고 반지름 방향의 거리 $R=6$

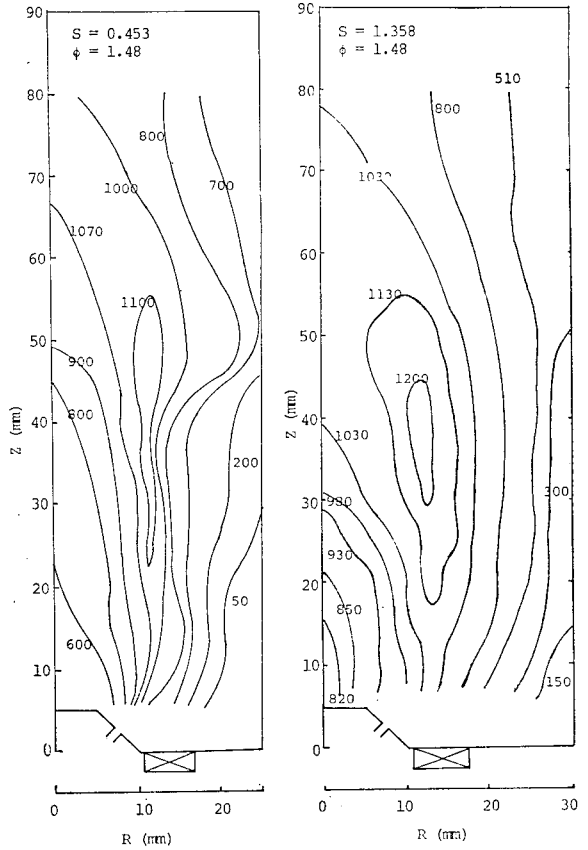


Fig. 8 Isothermal lines of gas temperature at $S=0.453$

Fig. 9 Isothermal lines of gas temperature at $S=1.359$

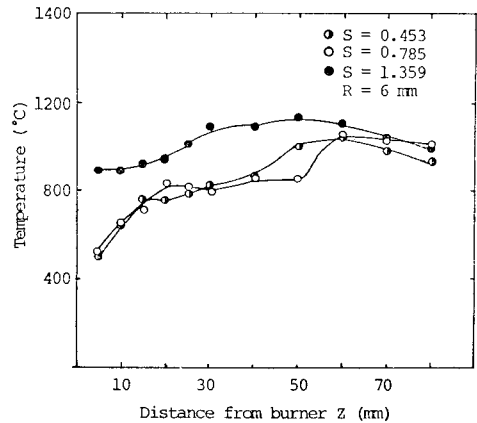


Fig. 10 Axial distribution of gas temperature

mm인 경우 선회수에 따른 축방향의 온도 분포를 나타낸 것이다.

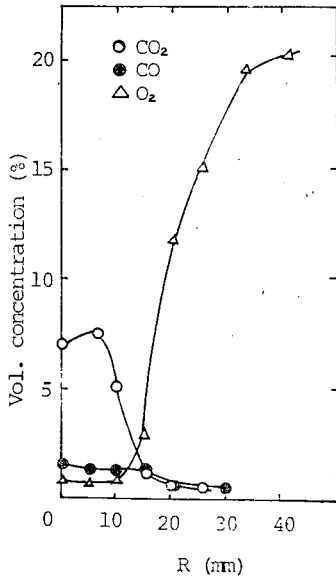


Fig. 11 Radial distribution of combustion gas concentration at $\phi=1.48$, $S=0.453$

Fig. 10에서 보는 바와 같이 화염의 온도 분포는 $S=0.453$ 인 약선회일 때보다 $S=1.359$ 인 강선회일 때가 높은 것으로 측정되었다.

4.4. 燃燒가스의 濃度分布

Fig. 11은 $Z=20\text{mm}$ 이고 $S=0.453$, $\phi=1.48$ 일 때의 CO_2 , CO , O_2 가스 濃度分布를 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 CO_2 가스의 濃度는 $R=6\sim 7\text{mm}$ 에 상당하는 노즐噴出口 부근에서 가장 높고 반지름 방향의 거리가 증가함에 따라 점차 급격히 감소하였다. 한편 O_2 濃度는 $R=10\text{mm}$ 인 지점으로부터 급격히 증가하여 공기 중의 酸素濃度로 접근하는 경향을 보였다.

일반로 噴流에 旋回를 부여하면 旋回噴流의 擴散角이 증가하여 吸引空氣量도 증가하며, 연료와 공기의 혼합이 促進된다. 따라서 CO_2 量의 최대치와 噴流의 軸方向의 CO_2 量의 比는 약선회일 때보다 강선회일 때가 작아진다. Fig. 12는 $(\text{CO}_2)/(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ 의 값을 噴流의 軸방향의 길이에 대하여 정리한 것이다. 이 線圖에서 알 수 있는 바와 같이 旋回數가 클수록 CO_2 가스濃度의 減衰가 촉진되고 있음을 볼 수 있는데 이러한 경향은 같은 당량비라 하더라도 旋回數가 증가하면 噴流의 擴散角이 커짐과 동시에 周圍流의 吸引이 촉진되므로 2次空氣의 혼합이 많아지고 또 공기 유량의 증가에 따

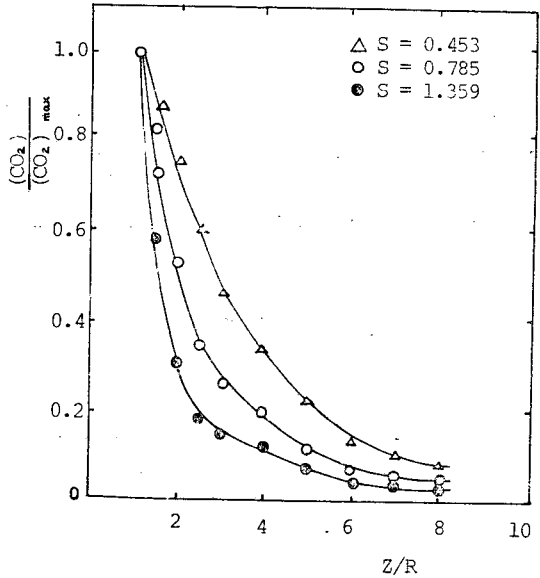


Fig. 12 Effect of swirl number on the decay of carbon dioxide

른 CO_2 의 혼합이 빨라지게 됨을 의미한다.

5. 結 論

環狀放射形으로 분출되는 燃料의 유량을 일정하게 유지하고, 旋回噴流의 空氣量과 旋回強度를 변화시켜서 旋回噴流火炎을 형성하고, 旋回噴流가 연소할 때의 火炎形態 및 火炎의 可視길이, 火炎의 平均溫度分布特性과 燃燒가스의 主要成分濃度를 구한 본 연구의 결과로부터 얻은 結論은 다음과 같다.

(1) 旋回空氣流量을 변화시킨 경우와 旋回器의 旋回數를 변화시킨 경우 噴流火炎의 形態는 3種으로 구분할 수 있었다.

(2) 旋回數가 일정할 때 火炎의 길이는 弱旋回일 때보다 強旋回일 때가 짧으며 旋回數가 일정할 경우라도 當量比 1.139 이하에서 火炎의 길이는 거의 변화하지 않고 일정하다.

(3) 旋回噴流의 燃燒場에 대한 반지름 방향의 平均 가스溫度分布는 強旋回일 경우가 最高溫度 및 高溫部의 溫度가 弱旋回일 때보다 높으며, 軸方向의 溫度分布도 強旋回일 때가 높고, 반지름 방향의 크기도 크다

(4) 旋回器의 旋回數가 클수록 주위 공기의 吸引量이 증가하여 노즐로부터 분출되는 연료와 공기의 혼합이 促進되며, 軸方向의 CO_2 가스溫度는 軸方向의 길이

가 증가함에 따라 현저하게 減衰하는 경향을 갖는다.

後 記

본 연구는 “韓國科學財團”의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로서 연구비를 지원하여 주신 韓國科學財團에 깊이 감사를 드리는 바입니다. 본 연구에 많은 도움을 주신 神戶大學의 松本隆一교수께 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

- (1) Chigier, N.A. and Beér, J.M., “Velocity and Static-Pressure Distributions in Swirling Air Jets Issuing From Annular and Divergent Nozzles” Trans. ASME, pp. 788-796, Dec. 1964.
- (2) Kerr, N.M., and Fraser, D., “Swirl. Part I : Effect on Axisymmetrical Turbulent Jet” J. Inst. Fuel, Vol. 38, pp. 519-526, 1965.
- (3) Kerr, N.M., “Swirl. Part II : “Effect on Flame Performance and the Modelling of Swirling Flames” J. Inst. Fuel, Vol. 38, pp. 527-538, 1965.
- (4) Livesey, J.L. and Wilcox, P.L., “Isothermal Aerodynamic Investigation of a Suspended Flame Register” J. Inst. Fuel, Vol. 41, pp. 169-186, 1968.
- (5) Mathur, M.L. and Maccallum, N.L., “Swirling Air Jets Issuing from Vane Swirlers Part I : Free Jets” J. Inst. Fuel, Vol. 40, pp. 214-225, 1967.
- (6) Patanker, S.V. and Spalding, D.B. “Heat and Mass Transfer in Boundary Layers” Int. Text-Book, 1970.
- (7) Gosman, A.D., Pun, W.M., Runchal, A.K., and Spalding, D.B., “Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows” Academic Press, 1969.
- (8) Rose, W.G., “A Swirling Round Turbulent Jet 1-Mean Flow Measurements”. ASME Trans., J. Appl. Mech., pp. 615-625, 1962.
- (9) Chigier, N.A., Chervinsky, A., “Experimental Investigation of Swirling Vortex Motion in Jets”, J. Appl. Mech pp. 443-451 June, 1967.
- (10) Chigier, N.A., Gilbert, J.L., “Recirculating Edies in the Wake of Flame holder” J. Inst. Fuel. Vol. 41, pp. 105-112, 1968.
- (11) Hakluytt, J.P.D., North, B.C., “Aerodynamic Criteria for the Design of Air-Registers for Oil-fired Naval Boiler”, J. Inst. Fuel. Vol. 41, pp. 195-201, 1968.
- (12) Chigier, N.A., Beer, J.M., “Stability and Combustion Intensity of Pulverized Coal Flames-Effect of Swirl and Impingement”, J. Inst. Fuel. Vol. 42, pp. 443-450, 1969.
- (13) Kawaguchi, O., Sato, T., “Experimental Investigation of Premixed Swirling Jet Flames”, Bulletin of JSME, Vol. 16, No. 95, pp. 851-861, 1973.
- (14) Chigier, N.A., Apak, G., “Interaction of Multiple Turbulent Diffusion Flames”, Combustion Science and Technology, Vol. 10, pp. 219-231, 1975.
- (15) 赤川, 多賀, “環狀噴流に關する研究” 日本機械學會論文集 31卷 221號 pp. 105~112, 1965.
- (16) El-Mahallawy, F.M., Habib, N.A., “Study of Two Coaxial Swirling Jets in a Cold Model” Flow Mixing and Heat Transfer in Furnaces, pp. 3~47, Pergamon Press, 1978.
- (17) Gupta, A.K., Beér, J.M., “On Operational Characteristics of Multiannular Swirl Burner”, Combustion Science and Technology, Vol. 17, pp. 197~214, 1978.
- (18) Lockwood, F.C., El-Mahallawy, F.M., Spalding, D.B., “An experimental and Theoretical Investigation of Turblent Mixing in a Cylindrical Furnace” Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 283~293, 1974.