

旋回 同軸 噴流의 亂流特性에 關한 研究

A Study on Turbulent Characteristics in Swirling Coaxial Jets

이 근 오* · 김 중 현**
Keun-Oh Lee · Jong-Hyeon Kim

ABSTRACT

This paper deals with the experimental study of the turbulent characteristics in the swirling coaxial jets.

In this research, the experimental study has been carried out to investigate the effects of swirl number and equivalence ratio on the flow characteristics in nonreacting flow field of the model combustor which simplifys the continuous type combustor for the practical use.

Author particularly intends to find out the fuel-air mixing in the recirculation zone in order to make sure the effects of swirl number and equivalence ratio on the stabilization of flame.

1. 서 론

亂流擴散火焰은 安定性이 좋고 逆火의 위험성이 없기 때문에 廣範圍한 연소의 제어가 가능하며 따라서 보일러, 가스터어빈연소기 및 公業용 加熱爐와 같은 대부분의 實用 燃燒器에 사용되고 있다.

또한 기체연료뿐만 아니라 액체연료를 사용하는 분무화염도 일종의 확산화염으로 볼 수 있기 때문에 이 화염은 학문적 입장에서도 중요한 화염형태^{1),2),3)}라고 말할 수 있다.

난류확산화염에서는 대부분 공기나 연료에 선회

효과를 부과하는데, 이는 넓은 범위의 燃空比에 대하여 流動場이 선회효과로 인하여 再循環 領域을 형성함으로써 국부적으로 양호한 가연혼합비의 영역이 존재하고, 난류효과의 증대로 인하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜서 高負荷燃燒를 가능하게 함과 동시에 안정된 화염⁴⁾을 형성할 수 있다.

연소의 1단계는 연료와 공기의 혼합과정으로서, 이는 화염의 안정성, 연소특성 및 NO_x 등의 미연성분의 배출특성⁵⁾에 직접적인 영향을 주고 있으므로 본 연구에 있어서는 실용연속류형 연소기를 대상으로 하여, 자체 제작한 단순모델 연소기를 사용하여 旋回度⁶⁾와 당량비가 旋回 同軸 噴流의 亂流

* 서울산업대학교 산업안전공학과
** 서울산업대학교 산업안전공학과 대학원

特性에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험변수

2.1 실험장치

연구대상으로 하고 있는 화염은 軸對稱인 燃料噴流과 旋回空氣와의 混合에 의하여 형성되는 전형적인 선회난류확산화염이다.

Fig. 1에 본 연구를 위하여 製作한 燃燒裝置의 概要圖를 圖示하였다. 연소기의 下端 中心軸上에 위치한 연료관을 통하여 연료가 유입되고, 연소용 공기는 송풍기 ①로부터 공급되어 main valve⑦을 조절하여 manometer⑧에서 계량된 후 이 연료관과 同心이 되도록 설치된 8개의 공기유입기로부터 모델연소기 ⑩에 유입된다. 이 공기는 송풍기의 진동을 排除할 수 있도록 송풍duct의 끝에서 동일 원주상에 等間隔으로 배열된 8개의 空氣供給口와 연소기하단의 8개의 공기유입구를 연결하는 호스를 통하여 연소기에 供給된다. 유입된 공기는 縮流部를 거치는 동안 균일한 단면속도분포로 된 후, 旋回翼을 경유, 旋回翼에 의하여 접선방향의 성분이 加해져 旋回流가 된다. 이 선회류는 공기분출구에서 지면에 대하여 수직상방으로 분출된다.

한편, 유동장의 난류특성을 규명하기 위한 실험은 미연소 실험으로 하였으며, 이때 위험성을 피하기 위하여 연료대신에 송풍기 ②에서 공기를 공급하였다.

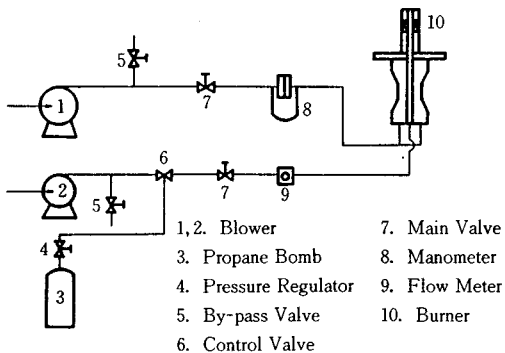


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 旋回翼의 상세도를 나타낸 것이며, 선회익이 축방향과 이루는 각 θ 를 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시키므로써 선회도를 실험변수로 취한다. 선회익은 연료노즐에서부터 하방 55mm되는 위치에 장치한다.

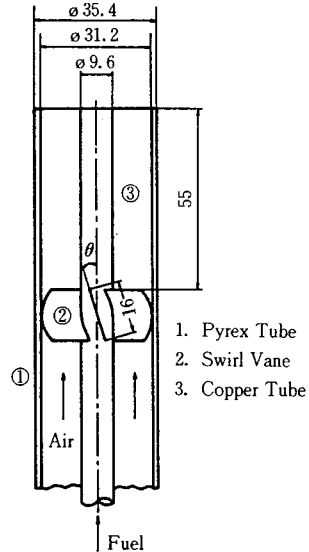


Fig. 2 Detail drawing of swirl vane

2.2 실험변수 및 실험조건

1) 旋回도의 정의⁸⁾

선회의 주요한 효과로서는 신속한 혼합과 주위유체의 entrainment 率을 높임으로서 화염길이를 줄이고, 强旋回의 경우는 재순환 영역을 형성시킴으로써 화염의 안정성을 향상시키는 효과를 준다.

선회도는 선회류의 특성을 나타내는 無次元數이며 다음과 같이 정의된다.

$$G_\theta = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr \quad (2-1)$$

$$G_x = \int_0^R U_\rho U 2\pi r dr + \int_0^R P 2\pi r dr \quad (2-2)$$

이들의 식을 근거로하여 선회강도의 指標值인 선회도는

$$S = G_\theta / G_x \cdot R_a \quad (2-3)$$

이다. 여기서 G_θ 는 角運動量의 軸方向 flux, G_x 는 線形運動量의 軸방향 flux, 그리고 U, W는 噴流

의 임의 단면에 있어서의 축방향 및 접선방향의 속도 성분이며, P는 정압입니다.

선회도를 선회분류 단면내의 속도 및 정압분포를 이용하여 구하는 것은 복잡하므로 선회발생장치내의 入力速度分布로부터 계산하여도 큰 오차가 없다고 알려져 있다⁸⁾.

따라서 식(2-2)의 靜壓項은 무시할 수 있으며 선회도는 $S' = G_w/G_x \cdot R_a$ 로 정의된다.

여기서 $G_x' = 2\pi \int_0^R \rho U^2 r dr$ 이고,

U 및 W는 선회발생장치내의 축방향과 접선방향 속도 성분을 나타낸다.

Fig. 2에 도시한 바와 같이 선회익이 유동방향과 이루는 각을 θ 라 하고, tube 단면에 걸쳐 속도 분포가 균일하다고 가정하면

$$U = U_0, W = U_0 \tan \theta \text{ 이므로}$$

선회도

$$S' = \frac{2}{3} [1 - (R_t/R_a)^3 / 1 - (R_t/R_a)^2] \tan \theta$$

가 된다.

본 연구에 사용된 선회익 θ 에 대한 선회도의 계산치를 표1에 나타내었다.

Table 1 Relation between swirlnumber and swirler vaneangle

swirler vaneangle (θ)	30°	45°	60°
swirlnumber(S)	0.413	0.715	1.239

선회도가 약 0.6보다 작을 때는 재순환영역이 존재하지 않으며 弱旋回(weak swirl)라 하고, 旋回度 $S = 0.6$ 인 값을 臨界旋回度(critical swirl number)라 한다. 또 旋回度 S가 0.6보다 큰 경우를 强旋回(strong swirl)라 하며 再循環領域이 존재한다. 본 연구에서는 旋回翼角 30°이하인 경우는 약선회, 45°이상인 경우는 强旋回가 된다.

2) 當量比

당량비 ϕ 는 실제연공비와 이론연공비의 비로써 $\phi = (m_f/m_a)/(m_f/m_a)_{st}$ 와 같이 정의되며 空氣過剩率의 역수와 같다.

연료유량을 일정하게 놓으면 이 경우의 당량비는 $\phi = (Q_a)_{st}/Q_a$ 와 같이 된다.

본 실험에서 사용한 연료인 공업용 Propane가스의 조성은 $C_3H_8, C_2H_6, C_4H_{10}$ 이며, 이들의 체적분

율은 각각 93.7%, 1.6%, 4.7%이다.

본 연구의 경우 연료유량 $Q_f = 5l/min$ 에 대한 이론 공기량 $(Q_a)_{st}$ 는 연료 1 mol의 完全燃焼에 필요한 이론산소량과 공기중 산소의 체적분률로부터 $(Q_a)_{st} = 119.3(l/min)$ 를 구하였으며, 따라서 당량비가 주어졌을 때의 실제공기량 Q_a 는 $Q_a = (Q_a)_{st}/\phi$ 로부터 얻어진다.

표2.는 각 당량비에 대응하는 실제 공기량과 環狀管에서의 공기의 평균속도를 계산하여 표시한 것이다.

Table 2 Relation between air flow rate and equivalence ratio

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

3) 實驗條件

본 연구는 未燃焼時의 난류특성을 조사하는 실험이므로 위험성을 피하기 위하여 연료인 프로판 대신에 공기를 사용하여 유량을 5l/min으로 일정하게 연료노즐에 공급하였다.

측정위치는 연료노즐 중심으로부터 半徑방향으로 2mm간격으로, 반경방향거리 r과 공기용 環狀管의 반경 R과의 비가 $r/R = 2$ 까지, 또 鉛直上向距離는 노즐상단으로부터 20mm간격으로 축방향거리 L과 공기용환상관 외경 D와 비가 $L/D = 2.82$ 까지로 하였다.

3. 실험방법

난류확산화염의 구조를 정확히 把握하기 위해서는 燃料噴霧가 주위공기류와 확산, 혼합되는 과정을 명확히 할 필요가 있다.

그러나, 난류장에 있어서의 燃料噴流와 주위공기와의 혼합에 있어서의 분자확산과정보다 난류확산과정이 지배적이다. 따라서 속도변동이 燃料噴流가 주위공기 중으로의 확산, 혼합에 미치는 영향을 파악하기 위해서 우선 미연소유동의 난류특성을 측정하였다.

난류특성은 국부적으로 정밀도가 높고 더우기 應答性이 좋은 선형화된 定溫型 熱線風速計(KANO-

MMAX製, System 7221型)를 사용하여 측정하였다.

유속계의 Sensor는 직경 0.00015", 길이 0.05"의 텅스텐線을 사용하였으며, Sensor를 過熱比(Overheat ratio) 1.5로 가열하였다. Sensor의 補正은 DISA Type 55D 44 Pressure Control Unit, Type 55D 45 Nozzle Unit, Type 55D 46 Pressure Converter로 구성된 DISA Calibration Set를 사용하여 브릿지 전압(Bridge voltage) E와 유속 U의 관계를 Linearizer를 통하여 線形化시켜 $U = K \cdot E$ 가 되도록 하였다. K는 상수이다.

Probe는 X형 Probe를 사용하였고 보정하여 전압 E와 유속 U의 관계를 선형화하였다. 또한 Probe의 위치선정은 3次元 이송장치에 의해서 조절하였다.

4. 실험결과

난류확산화염에 있어서의 연소는 혼합과정이 그 반응을 좌우하며, 또 난류장 공간에 있어서의 유

속, 온도 및 농도특성은 공기와 연료의 혼합과 연소반응과정에 영향을 미친다. 따라서 난류확산화염의 구성 및 그의 안정성을 究明하기 위하여서는 미연소유동장 및 연소유동장에 있어서의 유속, 온도 및 각종화학농도의 시간 평균적 공간분포를 측정함과 동시에 이들의 변동특성을 파악할 필요가 있다.

본 실험에 있어서는 열선풍속계를 사용하여 미연소유동장의 각 단면에 있어서의 난류강도 즉, 축방향 난류강도 u' 및 접선방향 난류강도 w' 를 측정하였다.

1) 軸方向 亂流強度分布

Fig. 3(a), (b)는 축방향거리가 각각 (a) $L/D = 0.56$ 과 (b) $L/D = 1.13$ 인 단면에서 당량비가 $\phi = 1.0$ 으로 일정한 경우, 旋回翼角을 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켰을 경우의 축방향난류강도분포의 一例를 比較한 것이다.

Fig. 3(a)로부터 $L/D = 0.56$ 인 유동장의 동일 단면에 있어서는 당량비가 일정한 경우, 선회익각 θ 가 클수록 축방향난류강도가 증가하고, 또 난류

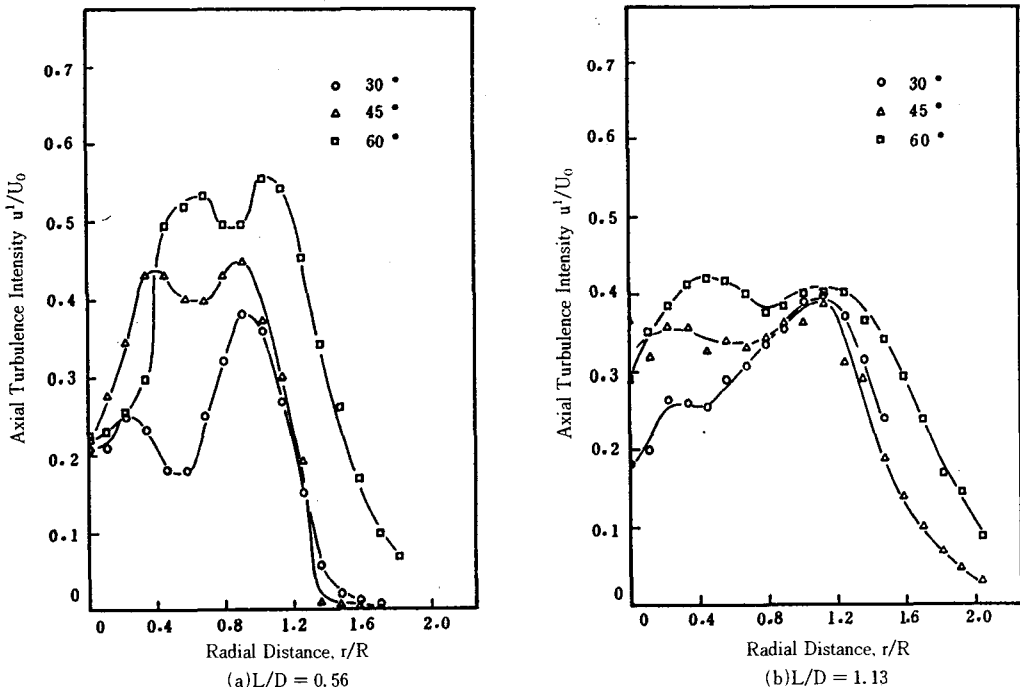


Fig. 3 Radial Distributions of Axial Turbulence Intensity with $\phi = 1.0$ at axial Distance (a) $L/D = 0.56$ and (b) $L/D = 1.13$ for Swirl Vane Angles

강도의 제1, 제2극대점이 θ 가 클수록 반경거리 r/R 이 큰 외측방향으로 이동하면서 유동장의 혼합 영역의 幅이 서서히 넓어지고 있음을 알 수 있다.

또 $\theta = 45^\circ$, $\theta = 60^\circ$ 인 경우에서는 제1극대점과 제2극대점의 크기가 거의 같으나, $\theta = 30^\circ$ 에서는 제1극대점이 제2극대점보다 상당히 낮게 나타나고 있으며, 이것은 약선회로 인하여 재순환영역이 존재하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 3(b)의 축방향거리 $L/D = 1.13$ 인 단면에서는 극대점의 존재가 소멸되면서 유동장이 전체에 걸쳐 폭 넓게, 비교적 약한 난류강도를 나타내고 있다. 따라서 유동장에서의 연료와 공기혼합이 $L/D = 0.56$ 인 단면에서보다 한층 균일하게 이루어졌다고 생각된다.

Fig. 4(a)(b)는 축방향거리가 (a) $L/d = 0.56$, (b) $L/D = 1.13$ 인 단면에서, 선회익각이 $\theta = 45^\circ$ 로 일정한 경우, 당량비를 0.8, 1.0, 1.2로 변화시켰을 경우의 축방향난류강도분포를 圖示한 것이다.

Fig. 4(a)의 $L/d = 0.56$ 인 단면에서는 旋回翼角이 일정한 경우, 당량비가 증가할수록 축방향난류강도는 減少하고 있으며, 각 당량비에 대한 제1 및 제2극대점의 반경방향의 위치는 거의 같은 半徑方向距離에서 나타나고 있다.

따라서 혼합영역에 미치는 당량비의 영향은 거의 없다고 생각된다.

Fig. 4(b)는 축방향거리 $L/d = 1.13$ 인 단면에서 선회익각이 $\theta = 45^\circ$ 로 일정한 경우, 당량비 ϕ

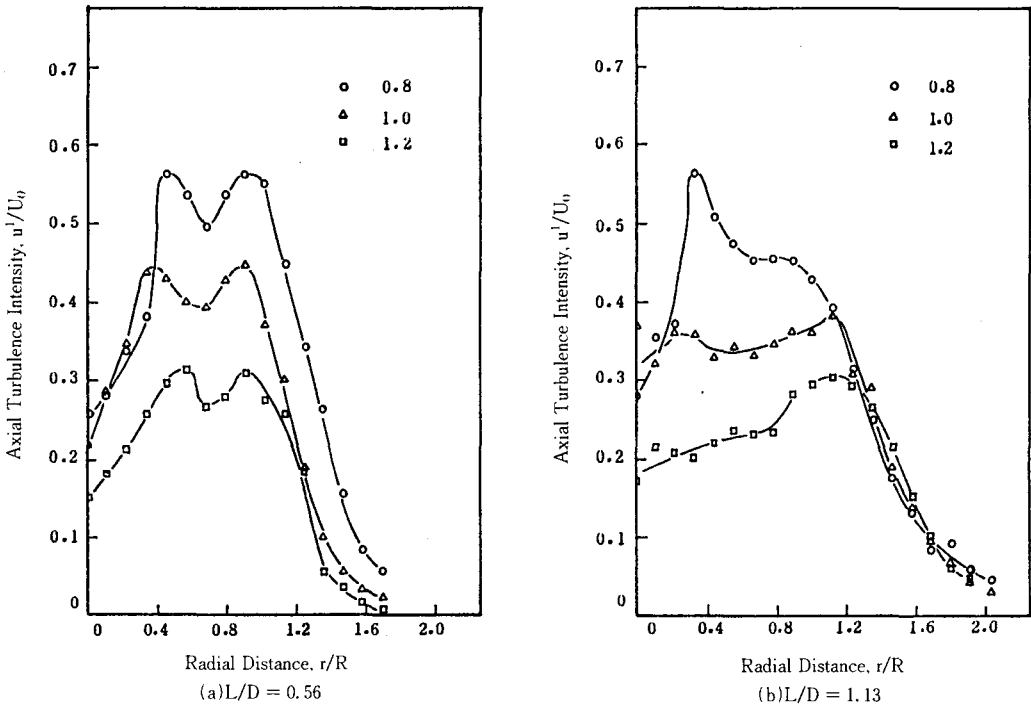


Fig. 4 Radial distributions of axial turbulence intensity with $\phi = 1.0$ at axial distance (a) $L/D = 0.56$ and (b) $L/D = 1.13$ for equivalence ratio

가 증가할수록 축방향난류강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. $\phi = 0.8$ 인 경우에서는 재순환영역의 경계에서 제1극대점이 크며 $\phi = 1.0$ 과 $\phi = 1.2$

인 경우에는 漸次 제1극대점이 소멸하면서 평탄한 난류강도분포를 나타내고 있다.

2) 接線方向 亂流強度分布

Fig. 5(a)(b)는 당량비 $\phi = 1.0$ 로 일정한 경우 선회각을 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켰을 때의 축방향거리가 (a) $L/D = 1.13$ 인 단면에서의 접선

방향 난류강도분포를 도시한 것이다. 그림으로부터 선회각이 커질수록 접선방향난류강도가 증가하고 있음을 볼 수 있으며, 그의 최대치는 $r/R = 0.7-1.0$ 인 環狀管內壁近處에서 나타나고 있다.

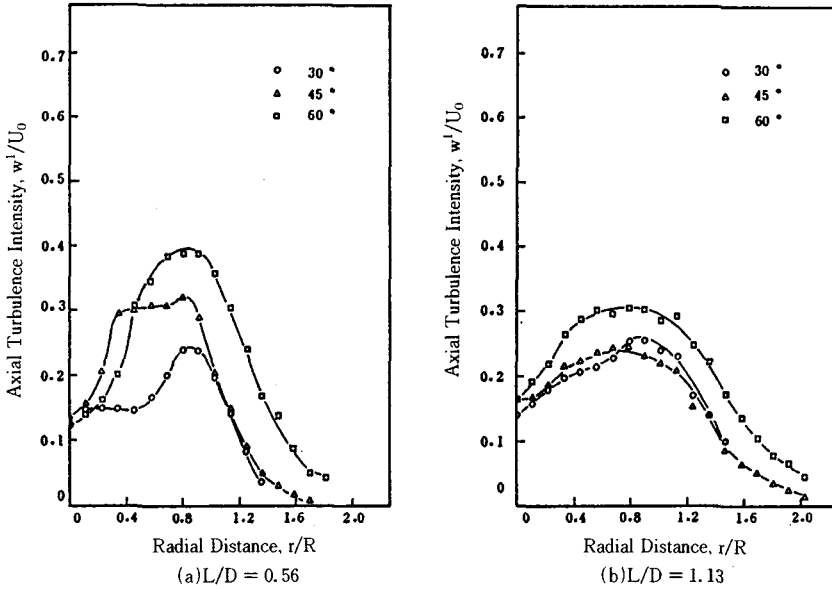


Fig. 5 Radial distributions of axial turbulence intensity with $\phi = 1.0$ at axial distance (a) $L/D = 0.56$ and (b) $L/D = 1.13$ for swirl vane angles

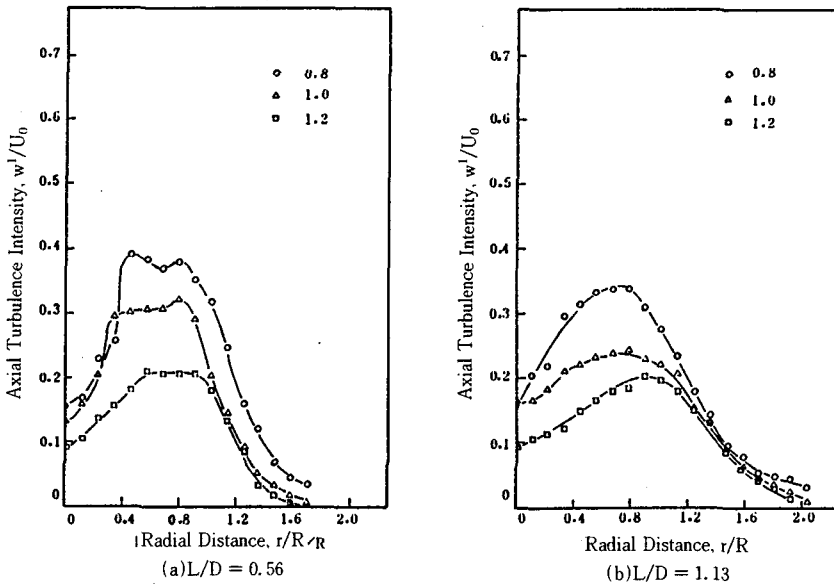


Fig. 6 Radial distributions of axial turbulence intensity with $\phi = 1.0$ at axial distance (a) $L/D = 0.56$ and (b) $L/D = 1.13$ for equivalence ratio

Fig.6(a)(b)는 선회각 $\theta = 45^\circ$ 이고, 당량비 $\theta = 0.8, 1.0, 1.2$ 인 경우의 축방향거리가 (a) $L/D = 0.56$, (b) $L/D = 1.13$ 인 단면에서의 접선방향 난류강도분포를 圖示한 것이다. 그림으로부터 당량비가 증가할수록 난류강도가 감소하고 있으며, 축방향거리가 증가하면 전반적으로 접선방향 난류강도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

5. 결 론

1) $\theta = 30^\circ$ 인 弱旋回인 경우, 중심축상에서는 연료 Core의 영향으로 인하여 축방향난류강도가 작게 나타나고 있으며, 旋回에 의해 속도가 낮아진 유동장의 중심축부근을 속도가 빠른 연료 Core가 통과함으로써 두 유체의 속도차에 의한 전단력의 증가로 인하여, 축방향난류강도의 제1극대치가 존재하고 또 주위 공기의 Entrainment에 기인한 亂流強度의 增加로 제2극대치가 存在하고 있다.

2) $\theta = 45^\circ$ 와 $\theta = 60^\circ$ 인 强旋回인 境遇는 재순환영역의 중심부에서는 축방향난류강도가 작으나, 재순환영역의 경계에서는 전단력이 증가하므로 축방향난류강도의 제1 극대치가 증가하여 제2극대치와 그 값이 거의 같아지고 있다. 따라서 재순환영역의 경계에서는 연료와 공기의 혼합이 촉진된다고 생각된다.

3) 선회각이 증가할수록, 당량비가 감소할수록 축방향난류강도는 증가하는 경향을 갖는다.

4) 접선방향난류강도는 축방향난류강도에 비하여 작게 나타나고 있으며 그 분포傾向은 축방향난류강

도분포와 相似하다.

참 고 문 헌

- 1) Takage, K. et., "Similarity of gas fired combustor," gas turbine papers presented at tokyo joint international gas turbine conference and products show, pp. 113-120, 1971.
- 2) Masia, T. et al., "combustion characteristics on the gas turbine Combustor," Gas Turbine Papers presented at Tokoy Joint International Gas Turbine Conference and Product show, pp. 121-127, 1971.
- 3) Ramos, J.I. and Sommer, H. T., "swirling Flow in a Reserch Combustor," AIAA paper No. 83-0313 which was presented at the AIAA 21st Aerospace Science Meeting, Jan. 1983.
- 4) Syred, N., chigier, N.A., and Beer, J.M., "flame stabilization in recirculation zones of jets with swirl," thirteenth symposium(int'l)on combustion, pp. 617-624, 1971.
- 5) Claypole, T.C. and Syred, N., "the effect of swirl burner areodynamics on No_x formation," eighteenth symposium(Int'l) on combustion, pp. 81-90, 1981.
- 6) Beer, J. M. and Chigier, N. A., "combustion aerodynamics," John wiley and sons, pp. 100-146, 1972.