

〈論 文〉

# 동축분류 확산화염에서 화염안정화와 연소특성에 관한 연구

유현석\* · 오신규\*\*

(1994년 5월 10일 접수)

## An Experimental Study on Flame Stability and Combustion Characteristics of Coaxial Diffusion Flame

H.S. You and S. K. Oh

**Key Words :** Flame Stability(화염안정성), Blockage Ratio(교축비), Recirculation(재순환), Momentum Ratio(운동량비), Coaxial Diffusion Flame(동축분류 확산화염), Reynolds Stress(레이놀즈 응력)

### Abstract

A study for the flame stability and the combustion characteristics of coaxial diffusion flame was conducted. The fuel employed was natural gas. The experimental variables were rim thickness of fuel tube, blockage ratio of the outer diameter of fuel tube to the inner diameter of air tube, and momentum ratio of fuel to air. It was consequently found that the stability in the neighborhood of the fuel rim depended on the rim thickness, especially in the case of above 3 mm, and that the stable region of the flame extended remarkably due to the formation of recirculation zone above rim. The effect of the blockage ratio on the flame stability was found to be minor in the case of above 3 mm of rim thickness. Between the momentum ratio 2 and 3, the stable flame zone was widely established as well as good combustion. With increasing the fuel-air momentum ratio, axial velocity, turbulence intensity, and Reynolds stress increased.

### 기 호 설 명

- $D_{in}$  : 공기관 내경
- $d_{out}$  : 연료관 외경
- $m_{air}$  : 공기의 운동량
- $m_{fuel}$  : 연료의 운동량
- $r$  : 연료관 내측 반경
- $t$  : 연료관 두께
- $u_a$  : 공기속도
- $Z$  : 연료관 상단부터의 높이
- $\phi$  : 당량비

### 1. 서 론

공업적으로 널리 사용되는 확산화염은 예혼합화염과는 달리 연료와 공기의 상호 운동관계에 의존되기 때문에 안정된 화염을 유지하기 위해서는 연료와 공기의 적절한 혼합이 이루어질 수 있도록 해야 한다. 그러므로 확산화염에서는 주로 연료나 공기에 선회를 주어 버너부 하류에 재순환영역이 형성되게 하거나 연료관을 두껍게 함으로서 화염의 안정화를 시도한다.

선회에 의해 이루어지는 화염안정화에 관한 연구<sup>(1~3)</sup>는 선회도가 클수록 재순환영역이 형성되기 때문에

\*한국가스공사 연구개발원

\*\*정회원, 한국가스공사 연구개발원

화염의 안정성이 커진다고 발표하였으며 선화가 존재하지 않는 경우의 확산화염에서의 화염안정화에 관한 연구는 주로 화염의 lift off 및 blow out에 관한 연구로서 정지공기중에 연료를 분출시켜<sup>(4-7)</sup> 이들의 mechanism에 대해 고찰하였다.

동축분류 확산화염에서도 blow out mechanism에 관한 연구<sup>(8)</sup>와 더불어 연료관 상단부에서의 화염안정화에 관한 연구<sup>(9,10)</sup>가 이루어졌으나 그 수는 상당히 적다. 水谷 등<sup>(10)</sup>은 연료관 상단부의 유동에 대해 메탄과 프로판을 사용하여 비연소반응 유동장의 가시화와 화염사진을 통하여 화염안정성 및 부착성에 대해 고찰하고 동축분류 확산화염에서의 화염안정화는 연료관 상단부의 재순환영역의 존재에 의한 것으로 결론 짓고 재순환영역의 크기를 구하는 식을 유도하였다.

난류확산화염의 특성을 정량적으로 보다 정확히 해석하기 위해서는 공간 및 시간 분해능이 우수한 기기를 사용하여 연소반응 유동장의 유속, 온도, 농도분포 등을 측정해야 한다. 최근에는 레이저관련 광학계측기기의 발달로 전체 연소반응 유동장의 시, 공간 동시 측정이 가능하게 되었다.<sup>(11-14)</sup>

일반적으로 가스를 사용한 확산화염에서는 연료의 종류에 관계없이 확산화염 특유의 연소특성을 나타내게 되나 실제 연소기에 적용하기 위해서는

가스 종류에 따라 발생하는 문제를 해결해야 한다.

따라서 본 연구에서는 천연가스를 연료로 하는 비선화 동축분류 확산화염에서의 화염의 안정성과 연소특성을 고찰하기 위하여 수행되었으며 비연소반응 유동장일때와 연소반응 유동장일때 LDV를 사용하여 연료와 공기의 유동 속도를 측정하고 Schlieren 시스템을 사용하여 연소반응 유동장을 가시화 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위해 사용된 실험 장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 연료 및 공기의 공급부, 연소기부, 온도측정부 및 속도 측정부로 나뉘어진다.

연소용 공기는 공기압축기를 지나 수분증발기를 통과하면서 압축시 발생하는 수분이 제거되고, 전자차단변과 압력조정기들을 지나면서 설정된 압력으로 감압된다. 유량계의 조절변에서 적정의 유량이 조절된 후 속도측정용 입자를 공급해 주는 particle seeder를 지나 연소기부로 공급된다.

연료는 전자차단변, 압력조정기, 유량계를 거쳐 particle seeder를 지나 연소기부로 공급된다.

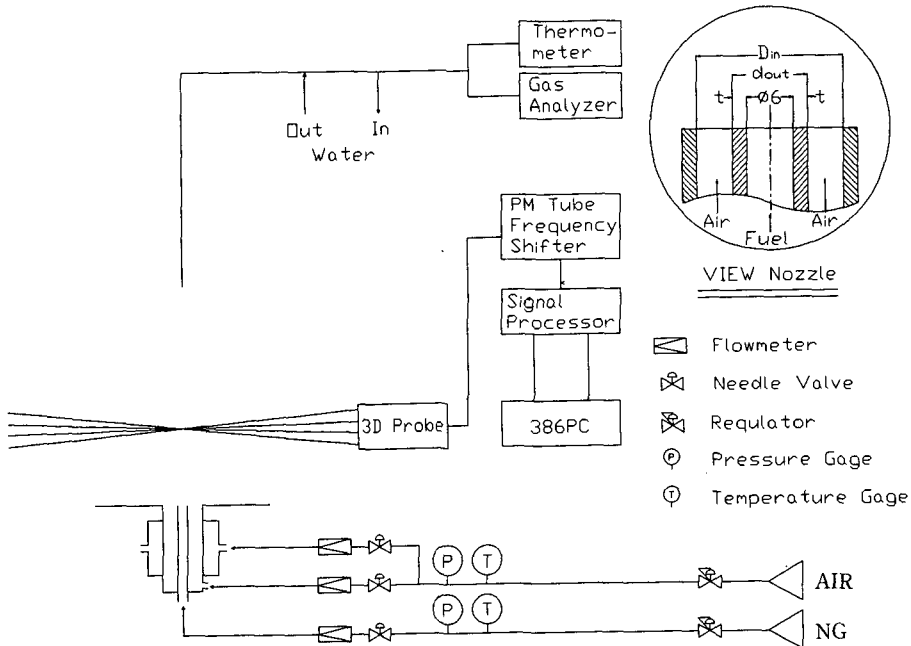


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

연소기부는 연료관 및 공기관으로 구성되며 연료는 내경 6 mm의 연료관을 통해 수직 상방향으로 분출되고 연소용 공기는 연료관 주위에 설치되어 있는 공기관으로부터 연료와 동일한 방향으로 분출된다. 연료관의 두께 및 연료관과 공기관의 교축비에 따른 화염안정 현상을 고찰하기 위해 연료관과 공기관은 교체 가능하도록 제작하였다. Fig. 1의 우측 상단부에 연료관 및 공기관 출구부의 상세도가 나타나있다.

연료관 상단부의 속도를 측정하기 위해서 LDV 시스템(TSI, System 90-6)을 이용하였으며 산란입자로 TiO<sub>2</sub>를 사용하였다.

연소반응 유동장을 가시화하기 위하여 직경 30 cm의 오목거울과, 광원으로서 250 W의 텅스텐 할로젠 램프를 사용하는 Schlieren 시스템을 이용하였다.

연소반응 유동장의 온도를 측정하기 위한 열전대는 직경 0.3 mm의 R-type(Pt/Pt-Rh 13%)이며, 고온에서의 촉매작용을 방지하기 위하여 실리카(Silica) 피막을 입혔고 연소반응 유동장의 고온으로 인한 열전도를 방지하기 위하여 수냉식 지지대를 사용하였다. 측정시, 열전대의 급격한 온도구배로 인한 오차를 줄이고자 지지대를 유동장의 흐름과 평행하게 설치하였다.

또 연소로내에서의 공기와 연료의 운동량비 변화가 온도분포에 미치는 영향을 실험할 때는 내경 100 mm, 두께 3 mm, 길이 1000 mm인 강관으로 제작된 연소로를 사용하였다.

연료는 현재 국내 공급중인 Table 1의 조성을 갖는 천연가스를 사용하였으며 버너의 용량은 14.6

kW이다.

2.2 실험방법

화염의 안정성과 연소특성에 관한 실험에 사용된 변수는 연료관의 두께, 연료관의 외경과 공기관의 내경의 비로 정의 되는 교축비(=d<sub>out</sub>/D<sub>in</sub>) 및 연료와 공기의 분출시의 운동량비(=m<sub>fuel</sub>/m<sub>air</sub>)이며 연료관의 내경은 6 mm로 고정시켰다.

연료관의 두께에 따른 화염 안정화에 관한 실험 시에는 연료관 두께를 1, 2, 3 및 4 mm로 변화시켰고 교축비의 영향을 고찰할 시에는 공기관의 내측 반경 r=10, 13 및 19 mm, 즉 D<sub>in</sub>=20, 26, 38 mm로 변화시켰다.

또 연료관 부근의 유동장은 비연소반응 유동장일 경우 Laser sheet beam을 이용하여 가시화 하였고 연소반응 유동장과 비연소반응 유동장의 연료관 상단부 유속을 LDV를 사용하여 측방향으로는 연료관 상단부를 기준으로 하여 1 mm부터, 반경방향으로는 연료관 내벽을 기준으로 하여 0.2 mm 간격으로 속도를 측정하였다.

또 연료와 공기의 운동량비에 따른 확산화염의 구조를 해석하기 위하여 비선회사의 비연소반응 유동장 및 연소반응 유동장의 유동특성분석, 연소로내의 온도분포 및 Schlieren 시스템을 이용한 화염의 가시화를 시도하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 안정화 선도

Fig. 2는 연료관의 두께를 변화시켰을 때 연료와

Table 1 Composition of fuel

Composition	Rate(Vol%)
CH <sub>4</sub>	88.987
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.829
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.237
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.381
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.537
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.016
N <sub>2</sub>	0.013
Heating value	43.95 MJ/Nm <sup>3</sup>

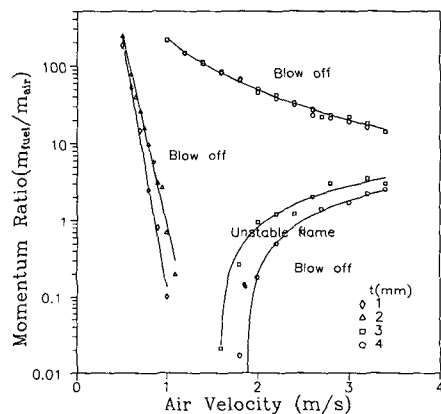


Fig. 2 Flame stability region with thickness of rim

공기의 운동량비와 공기유속에 따른 화염의 안정화 선도이다.

Blow off는 연료관 선단에 형성된 화염이 날려 버리는 현상을, unstable flame은 연료관 선단에 형성된 화염의 상단부가 떨기 시작하는 현상을 나타낸다. 이 unstable flame 상태에서 조건을 조금만 변경시키면 화염은 blow off된다. 연료관 두께  $t=1$  및  $2$  mm일 때는 운동량비가 증가하면 unstable flame 상태없이 즉시 blow off 되고, 연료관 두께  $t=3$  및  $4$  mm일 때는 운동량비가 큰 영역에 존재하는 blow off 영역과 운동량비가 낮은 영역에 존재하는 unstable flame을 거치는 blow off 영역이 존재한다.

연료관 두께가  $t=1$  및  $2$  mm일때의 안정화선도는 연료-공기의 운동량비의 변화에 비해 공기유속의 변화가 작고, 급격하면서 선형적인 변화를 보이고 있으며 공기유속 약  $1$  m/s 이하에서만 화염이 존재함을 알 수 있다. 이 결과는 연료관 두께가 약  $0.2$  mm인 장치에서 실험한 Yuasa<sup>(2)</sup>의 결과와 유사하다.

그러나 연료관의 두께  $t=3$  및  $4$  mm에서는 화염의 안정화 영역이 넓게 확장되고 있음을 알 수 있다. 이것은 연료관의 두께 증가에 따라 연료관 상단부에서의 연료와 공기가 화염을 형성하기에 적합한 상태가 되기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 3은 연료와 공기관의 교축비에 따른 화염안정영역을 나타낸 것이다. 화염안정영역에 미치는 교축비의 영향은 거의 없는 것으로 관찰되었다. 그러나 open flame이 아닌 경우 즉, 연소로가 설치된 경우의 화염의 안정화는 운동량비뿐만 아니라 당량비도 중요한 인자가 되기 때문에 교축비가 화염 안정화의 중요한 인자가 될 것이라 사료된다.

### 3.2 비연소반응 유동장의 유동현상

Fig. 2에서  $t=3$  mm 이상일 경우에 화염의 안정영역이 급격히 확장되는 현상을 규명하기 위해 연료관 상단부의 유동현상을 살펴보았다.

Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)는  $t=4$  mm( $d_{out}=14$  mm),  $D_{in}=38$  mm의 경우, 비연소반응 유동장에서 연료와 공기의 운동량비를 일정하게 하고 공기의 속도를 변화시켜 얻은 속도벡터로서 Fig. 4(a)는  $Ua=0.8$  m/s, Fig. 4(b)는  $Ua=4$  m/s일 때의 결과이다. 연료관 상단부에서 연료측과 공기측 모두 재순환 영역이 존재하고 있음을 알 수 있으며  $Ua$ 가 높은

경우에는 재순환영역의 높이가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 4(c) 및 Fig. 4(d)는  $t=2$  mm( $d_{out}=10$  mm),  $D_{in}=38$  mm의 경우, 비연소반응 유동장에서 연료와 공기의 운동량비를 일정하게 하고 공기의 속도를 변화시켜 얻은 속도벡터로서 Fig. 4(c)는 화염이 존재하는 영역의 속도인  $Ua=0.8$  m/s, Fig. 4(d)는 화염이 존재하지 않는 영역의 속도인  $Ua=4$  m/s일 때의 결과이다.  $t=4$  mm의 결과와 마찬가지로 연료관 상단부에 연료측과 공기측 모두 재순환영역이 존재하고 있음을 알 수 있으며  $Ua$ 가 큰 경우에는 재순환영역의 높이가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 비연소반응 유동장시 연료관 두께 변화에 따른 가시화 사진이다. Fig. 5(a)는  $t=4$  mm, 운동량비 3 및  $Ua=4$  m/s인 경우이고 Fig. 5(b)는  $t=2$  mm, 운동량비 3 및  $Ua=0.8$  m/s인 경우로서 두 경우 모두 화염안정화 영역 내의 조건들로서 연료관 상단부에 뚜렷한 재순환 영역이 형성되고 있음을 보여준다.

### 3.3 연소반응 유동장의 유동현상

Fig. 6(a)과 Fig. 6(b)는 각각 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 대응되는 조건하에서의 연소반응 유동장의 속도벡터이다. Fig. 6(b)에서 연료관 상단부의 인접 영역을 측정하지 못한것은 속도측정용 미립자가 이 영역 내로 잘 유입되지 않았기 때문이다.

실험 결과에서 보여주는 것처럼 화염이 존재할 때에는 비연소반응 유동장과는 달리 공기가 연료측으로 빨려 들어가고 있으며 속도도 다소 증가되고 있음을 알 수 있다. 이것은 화염의 존재에 의해 발

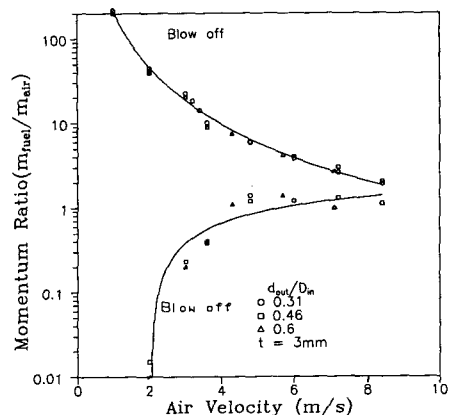


Fig. 3 Flame stability region with blockage ratio

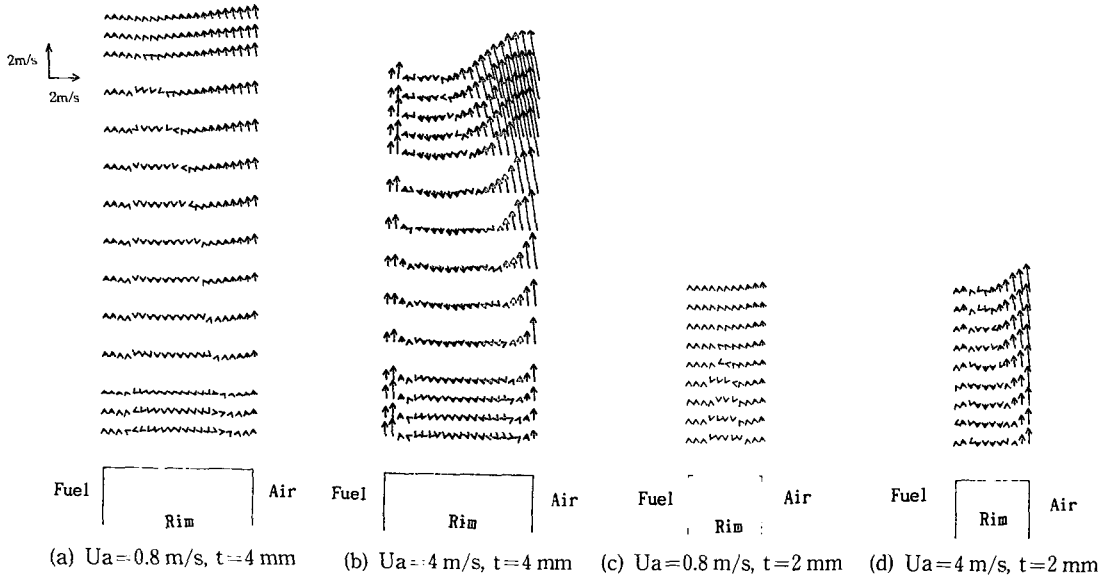


Fig. 4 Velocity vectors without combustion

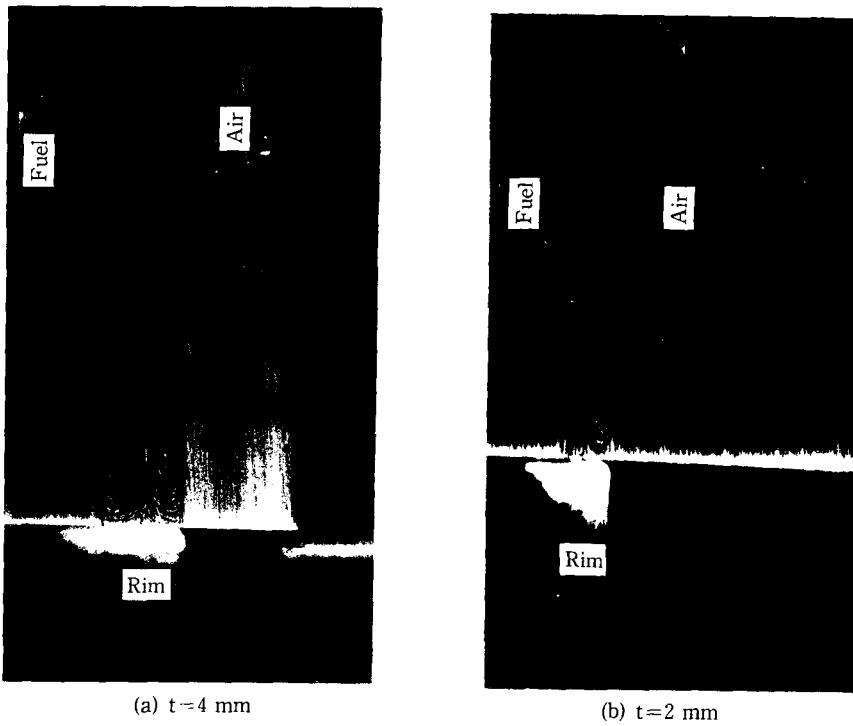


Fig. 5 Flow above rim

생된 밀도차이에 의한 부력의 영향 때문인 것으로 사료된다. 이런 현상은  $t = 2 \text{ mm}$ 인 경우에도 나타났으며 Fig. 6(c)는 그 결과이다.

동일 운동량비나 연료관 두께가 다른 경우인 Fig. 6(a)과 Fig. 6(c)를 비교해 보면 연료관 두께가 커지면 연료쪽으로 향하는 속도벡터의 기울기가 두

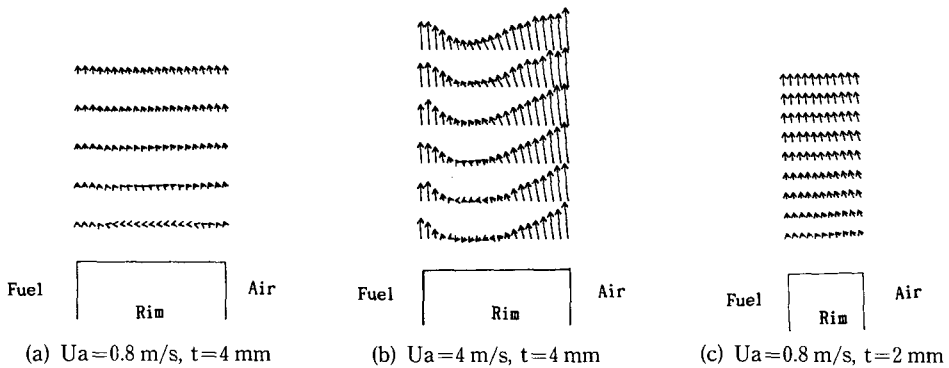


Fig. 6 Velocity vectors with combustion

렷하게 차이가 난다.

본 연구에서는 Laser beam의 연료관과의 간섭으로 인하여 연료관 상단부로 부터 1 mm 이하의 유동장은 측정할 수 없었기 때문에 최소 측정높이인 1 mm에서 측정된 자료를 분석하여 본 결과  $t=4$  mm일때는 연료관 상단부의 공기층 유동이 상류방향으로 향하는 속도성분을 가지고 있었으나  $t=2$  mm의 경우에는 하류방향의 속도 성분만 있었다. 그러므로 연료와 공기의 운동량비가 1 이상이고 연료관 두께가  $t=3$  mm 이상일때는 연료관의 공기층에 재순환영역이 형성되고 이 재순환영역에 의해 화염의 시작부분이 연료관 상단에 부착되며 연료층에는 온도 상승에 의한 부력의 영향으로 공기가 빨리 들어가는 것으로 사료된다. 이 상태에서 연료 속도를 증가시키면 연료쪽으로 빨리 들어가는 공기 속도가 증가되어 연료관 인접영역에는 공기와 연료의 혼합이 원활하게 되고 화염색은 청색을 나타내며 연료분류와 공기가 만나는 상단부에는 전단력 및 난류강도가 커지고 연료 속도를 더 증가시키면 화염이 부상하게 된다. 또 공기 유속이 커지면 충분히 발달하게 되는 재순환영역에 의하여 화염은 안정화되는 것으로 사료된다.

연료관 두께가  $t=2$  mm 이하에서는 연료관 상단부에 화염안정화에 기여하게 되는 재순환영역의 형성이 어렵거나 약하고 오히려 화염에 의한 부력의 영향이 더 커, 공기가 연료쪽으로 빨리 들어가게 되어 이것이 화염을 부상 시키는 작용을 하기 때문에  $t=3$  mm 이상일 때보다 화염안정영역이 더 좁게 되는 것으로 사료된다.

그러므로 본 실험에 의하면 비연소반응 유동장에서는 화염이 존재할 때나 존재하지 않을때나 연료

관의 두께에 관계없이 순환영역이 형성되나 연소반응 유동장에서는 그렇지 아니하기 때문에 연소반응 유동장에서의 재순환영역의 크기를 판단하기 위해 비연소반응 유동장을 사용하는 것은 부적합하다.

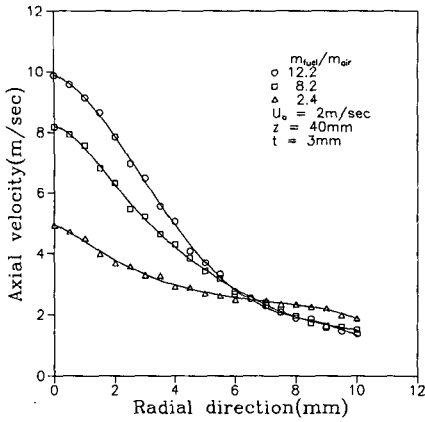
### 3.4 연료-공기 운동량비에 따른 비연소반응 유동장의 유동특성

Fig. 7(a)는 비연소반응 유동장에서 연료분출구로부터의 높이가  $Z=40$  mm 위치에서의 반경방향으로 측정된 축방향 속도분포이다. 공기층으로 갈수록 비교적 선형적으로 감소되며, 운동량비가 커질수록 기울기는 커진다. 공기류의 유동은 연료층과 공기층의 유속차이로 인한 전단응력 때문에 일차원적인 분포를 보이지 않고 연료노즐쪽으로 갈수록 완만한 증가를 보이고 있다.

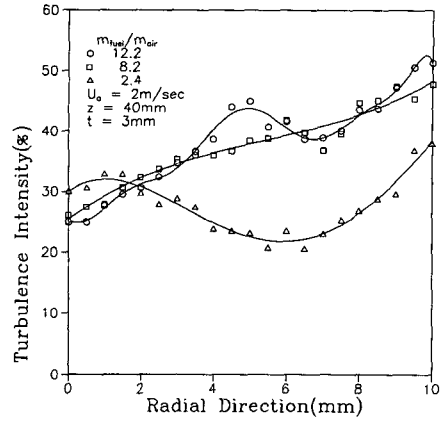
Fig. 7(b)는 난류강도를 나타낸 것이다. 공기류로 갈수록 난류강도가 증가하고 있으며, 운동량비가 작아지면 난류강도는 감소하고 있다. 이는 연료의 난류강도가 공기층에 영향을 주고 있으나 연료의 유동이 층류쪽으로 진행되면 공기류로의 영향이 감소되기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 7(c)는 반경방향 속도분포를 나타낸 것이다. 연료와 공기는 노즐에서 축방향으로, 일차원적으로 분사되고 화학반응에 의한 영향이 없기 때문에 반경방향 속도는 거의 영에 가까운 일정한 분포를 보이고 있다.

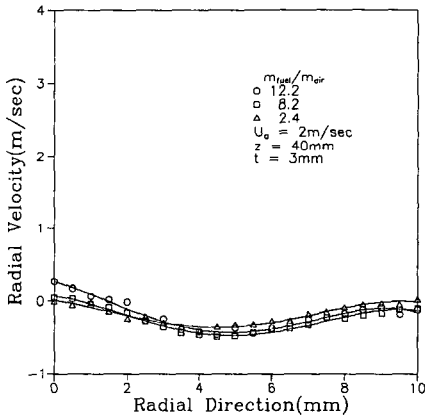
Fig. 7(d)는 Reynolds stress를 나타낸 것이다. 운동량비가 커질수록 Reynolds stress는 증가되며, 연료류와 공기류 사이의 에너지 전달이 활발히 일어나는 영역이 비교적 넓게 분포되어 있다.



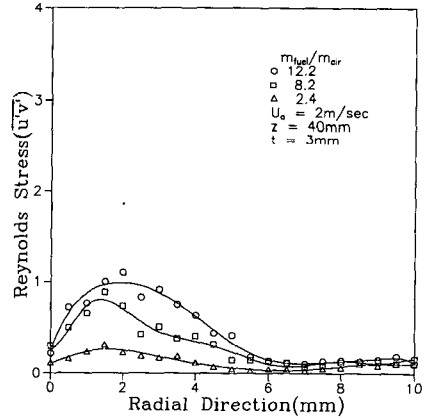
(a) Axial velocity with radial direction



(b) Turbulence intensity with radial direction



(c) Radial velocity with radial direction



(d) Reynolds stress with radial direction

Fig. 7 Without combustion field

3.5 연료-공기 운동량비에 따른 연소반응 유동장의 유동특성

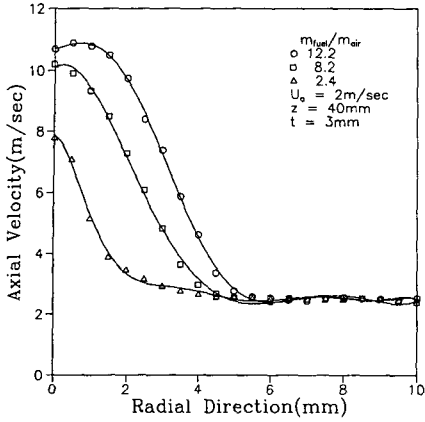
Fig. 8(a)는 연소반응 유동장의  $Z=40\text{mm}$ 에서 반경방향으로 측정된 축방향 속도분포를 나타낸 것으로서, 비연소반응 유동장인 Fig. 7(a)와 비교하여 보면 속도분포 곡선의 기울기가 비연소반응 유동장에 비해 크며 연료류로 부터 공기류로의 일차원적 유동에 미치는 영향은 없다. 가시적으로 정의할 수 있는 화염대를 전후로 유속의 뚜렷한 구분이 나타나는데, 이는 온도상승에 의한 점성효과 등의 영향이라 사료된다.

Fig. 8(b)는 난류강도를 나타낸 것이다. 운동량비 2.4를 제외하고, 화염대 부근에서 난류강도는 크게 증가하여 최대치를 나타내고 있다. 이것은 Fig. 9로부터 운동량비 2.4에서의 eddy들은 운동량비

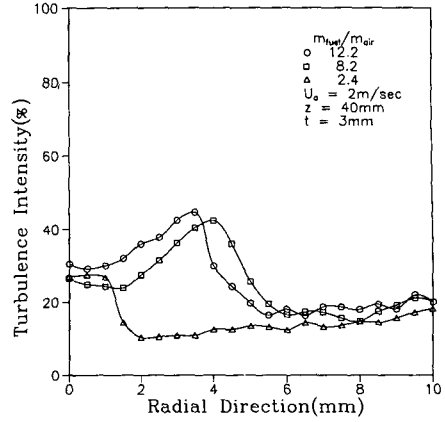
12.2일때의 eddy보다 비교적 크게 관찰되고 레이놀즈수가 2000 이하이기 때문에 운동량비 2.4는 wrinkled laminar flame이라 생각되며 측정부가 화염이 난류로 천이 되는 영역의 상류이기 때문에 난류강도의 최대치는 화염대를 벗어난 영역에 나타나고 있는 것이라 사료된다.

Fig. 8(c)는 반경방향 속도분포를 나타낸 것으로서 운동량비가 증가할수록 반경방향 속도가 증가하고 있다. 이는 연료유속 증가로 인한 난류도의 증가와 화학반응에 의한 급격한 체적팽창으로 중심축상의 연료류가 반경방향으로 이동되도록 영향받기 때문이라 사료되며 연료유동이 층류인 운동량비 2.4에서는 반경방향 속도성분은 나타나지 않고 있다.

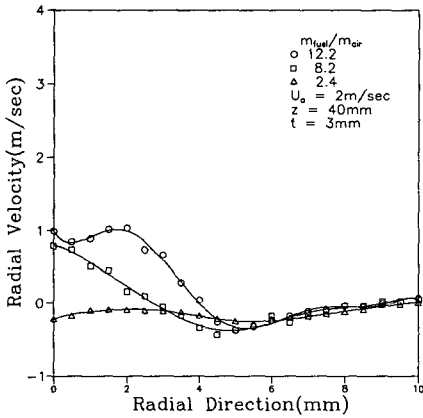
Fig. 8(d)는 반경방향으로의 Reynolds stress 분



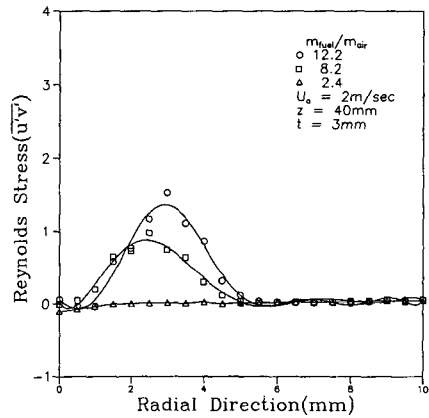
(a) Axial velocity with radial direction



(b) Turbulence intensity with radial direction



(c) Radial velocity with radial direction



(d) Reynolds stress with radial direction

Fig. 8 With combustion field

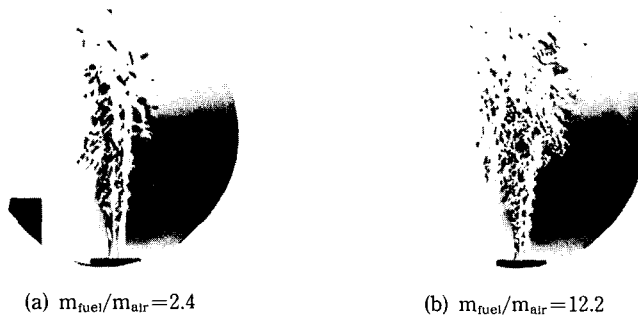


Fig. 9 Schlieren photographs of diffusion flame

포를 나타낸 것이다. 운동량비가 증가할수록 Reynolds stress는 커지고 화염대 부근에서 최대치를 나타내며 비연소반응 유동장에 비해 폭은 좁다.

3.6 연료-공기 운동량비에 따른 연소반응 유동장의 온도분포  
당량비가 일정( $\phi=0.8$ )할때 공기와 연료의 운동



량비 변화가 온도분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 연소로를 설치하여 실험을 수행하였다.

Fig. 10은 운동량비 0.9일때 연소로 내의 온도분포를 나타낸 것이다.  $Z=100\text{ mm}$ 에서는 온도가 화염대에서 최대치를 보이고 중심부의 연료 Core에서는 다소 낮으나  $Z=300\text{ mm}$ 에서는 중심부의 온도가 가장 높게 나타나고 연소로 벽으로 갈수록 감소하며, 연료 Core는 나타나지 않고 있다.  $Z=500\text{ mm}$ 에서는 전체적 경향은  $Z=300\text{ mm}$ 와 유사하나  $Z=300\text{ mm}$ 보다 다소 낮아 연소가 거의 종료 되어 가고 있음을 알 수 있다.  $Z=100\text{ mm}$ 에서의 온도가 낮게 측정된 것은 연소로내의 화염이 연료관 외부로 공급되는 연소용 공기의 영향만 받기 때문에 커다란 요동없이 하류 방향으로 길게 형성되어 측

정점에서의 화염대는 얇고 사용된 열전대의 접점은 화염대에 비하여 상대적으로 커서 수냉 지지대의 온도 영향을 받은 것으로 사료된다.

Fig. 11은 운동량비 4일 때의 온도분포를 나타낸 것으로서  $Z=100\text{ mm}$ 에서는 운동량비 0.9와 경향은 같으나 주위류의 온도가 낮게 나타나고 있는데, 이는 운동량비 0.9일때는 공기류의 운동량 증가로 인하여 연소로 내의 재순환영역이 커져 화염 하류의 고온의 가스가 상류로 유입되기 때문이라 사료된다.  $Z=300\text{ mm}$ 와  $Z=500\text{ mm}$ 에서는 운동량비 0.9에 비하여 전체적으로 낮은 온도분포를 나타내고 있는데, 이는 공기류의 운동량 감소로 인하여 연소반응을 원활하게 하는데 필요한 연료와 공기의 충분한 혼합이 이루어지지 못하기 때문이라 사료된다.

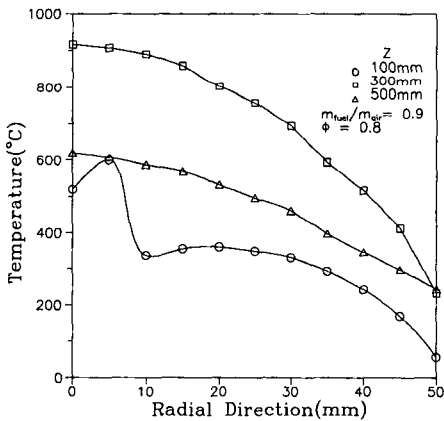


Fig. 10 Temperature distribution in combustor ( $m_{fuel}/m_{air}=0.9$ )

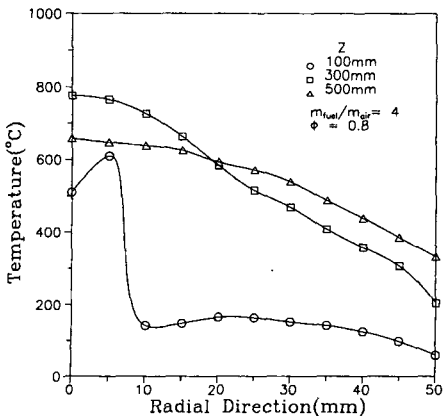


Fig. 11 Temperature distribution in combustor ( $m_{fuel}/m_{air}=4$ )

#### 4. 결론

천연가스를 연료로하는 동축분류 확산화염에서 연료관의 두께, 연료관 외경대 공기관 내경과의 비인 교축비 및 연료와 공기의 운동량비에 따른 화염안정성 및 연소특성에 관한 일련의 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 확산화염 안정영역의 확대를 위해서는 연료관 두께를 3mm 이상으로 하여야 한다.
- (2) 넓은 부하 범위의 양호한 연소를 위해서는 연료와 공기의 운동량비를 2~3에 맞추어야 한다.
- (3) 연료관 두께가 2mm 이하일 때 화염안정영역이 확대되지 못하는 것은 연료관 상단부에 화염안정화에 기여하게 되는 재순환영역의 형성이 어렵거나 약하기 때문이다.

#### 참고문헌

- (1) Rawe, R. and Kremer, H., 1981, "Stability Limits of Natural Gas Diffusion Flames with Swirl," *Eighteenth Symposium(international) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 667 ~677.
- (2) Yuasa, S., 1986, "Effects of Swirl on the Stability of Jet Diffusion Flames," *Combustion & Flame*, 66, pp. 181~192.
- (3) Feikema, D., et al., 1990, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl,"

- Combustion & Flame*, 80, pp. 183~195.
- (4) Vanquickenborne, L., and Van Tiggelen, A., 1966, "The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames," *Combustion & Flame*, 10, pp. 55~69.
- (5) Kalghatgi, Gautam T., 1981, "Blow-out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames, Part 1: In Still Air," *Combustion Science and Technology*, Vol 26, pp. 233~239.
- (6) Broadwell, James E., et al., 1984, "Blowout of Turbulent Diffusion Flames," *Twenties Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 303~310.
- (7) Kalghatgi, Gautam T., 1984, "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combustion Science and Technology*, Vol 41, pp. 17~29.
- (8) Dahm, W. J. A. and Dibble, R. W., 1988, "Co-flowing Turbulent Jet Diffusion Flame Blowout," *Twenty-Second Symposium (international) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 801~808.
- (9)鈴木健二郎 等, 1974, "擴散炎の安定性に関する研究," 日本機械學會論文集(第2部), 40券, 336號, pp. 2262~2270.
- (10) 水谷幸夫, 矢野和明, 1978, "同軸流擴散火焰の安定條件と付着機構," 日本機械學會論文集, 44券, 379號, pp. 1036~1052.
- (11) Ballantyne, A. and Bray, K. N. C., 1976, "Investigations into the Structure of Jet Diffusion Flames Using Time-Resolved Optical Measuring Techniques," *Sixteenth Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 777~787.
- (12) Guenther, R. and Wittmer, V., 1981, "The Turbulent Reaction Field in A Concentric Diffusion Flame," *Eighteenth Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 961~967.
- (13) Bilger, R. W., et al., 1990, "Some Raman/Rayleigh/LIF Measurements in Turbulent Propane Flames," *Twenty-Third Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 645~651.
- (14) Takahashi, F. and Goss, L. P., 1992, "Near-Field Turbulent Structures and The Local Extinction of Jet Diffusion Flames," *Twenty-Fourth Symp. (Int) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 351~359.