

# 유선형스텝에 의해 안정화된 예혼합 화염의 구조와 연소특성에 관한 연구(I)

(접근류의 압력맥동의 영향에 대하여)

A Study of Flame Structure and Combustion Characteristics in a Premixed Flame Stabilized by a Streamlined Step(I)

(On a Pressure Pulsation Effect of Approaching Flow)

이 재 득\* 최 병 린\*\*  
J. D. Lee, B. R. Choi

## ABSTRACT

In a premixed flame stabilized by a streamlined step, the flame structure and combustion characteristics were investigated to identify the effect of the pressure pulsation in a combustion air. A flame stabilizing limits, visualization, mean temperature, ion current and gas concentration ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ , UHC) were measured. With the combustion air of higher pressure pulsation, the development of the mixing layer was fast and wide, the temperature and combustion intensity were higher at arbitrary section. But, the effect was notably decreased with  $X=150$  mm downstream. And a first eddy formation from step edge was earlier. Thus, with the combustion air of higher pressure pulsation, high rate of heat generation was expected.

Key Word : approaching flow (접근류), pressure pulsation (압력맥동), coherent eddy (대규모 조직적 구조의 와(渦)), flash back(역화), blow-off (소화), recirculation-zone (재순환영역), mixing layer (혼합층), shear layer (전단층)

$X$  : 유동방향좌표 (mm)  
 $Y, Z$  : 유동직각방향좌표 (mm)

## 1. 서 론

난류 유동은 혼합을 촉진하여 연소 강도를 증가시키기 때문에 난류 연소는 거의 모든 고 부하 연소 버어너에서 적용된다. 일반적인 가스 터빈에서는 확산 연소를 행하고 있으나 Jones<sup>1)</sup>는  $NO_x$ ,  $CO$ , 미연HC, 매연 감소를 위해서는 예혼합 연소방식이 유리하다고 했다. Sawyer 등<sup>2)</sup>도 희박 예혼합 연소는 최고 온도가 확산 연소시보다 낮기 때문에  $NO_x$  저감과

## 기 호 설 명

$T$  : 온도 (K)  
 $U$  : 유동방향속도 (m/s)  
 $\phi$  : 당 량 비

\* 정회원, 부산대학교 대학원  
\*\* 부산대학교 공대 기계공학과

1차 연소영역의 균일 연소를 행할 수 있음을 밝혔다. 그러나 예혼합 연소법의 단점은 안정성, 즉 역화(flash back)와 소화(blow-off)의 문제가 있다. 이 역화 현상은 Plee 등<sup>3)</sup>이 그 기구를 밝히려고 했지만 여러 변수에 관계되어 확실하게 규명하지 못했다.

본 연구에서는 예혼합화염을 안정화시키기 위해 유선형 스텝 배후에 형성되는 재순환영역을 이용하였다. 본 연구의 범위내에서 이러한 화염구조는 대규모 조직적 구조의 와(coherent eddy)에 의해 지배된다. 이와같은 화염에 대한 연구로는 가스분석,<sup>4)</sup> 대규모 조직적 구조의 와의 거동,<sup>5)</sup> 안정성,<sup>6)</sup> 와의 주파수 분석,<sup>7)</sup> 연소가 와(渦)의 거동에 미치는 영향,<sup>8)</sup> 스텝높이 변화에 따른 연소특성<sup>9)</sup> 등이 있다. 한편 본 연구에서는 연소기 상류에 설치한 서어지탱크(surge tank)의 사용 유무에 따른 연소기 입구에서의 거시적인 압력맥동의 변화가 화염구조와 연소특성에 미치는 영향을 조사할 목적으로 화염안정범위, 가시화관찰, 가스분석, 평균온도, 이온농도를 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 연소기는 Fig.1과 같으며, 관측부의 크기는 50×219 mm인 광학유리로 되어있고, 폭은 97 mm이다. 연료는 상용 프로판을 사용하였다. 한편, 유로계는 Fig. 2와 같으며, 스텝 선단으로부터 1.230 mm 상류에서 연료와 공기가 혼합된 후, 길이가 1.100 mm이고 단면이 97×50 mm인 직사각형 유로를 통해 연소실로 유입된다. 스텝의 유선형은 Libby 등<sup>10)</sup>의 식에서  $\varphi = (2/3)\pi$ ,  $\alpha/\beta = 4$ 인 경우의 형상을 NC 밀링머신에서 가공하였으며, 스텝선단의 높이는 연소실 높

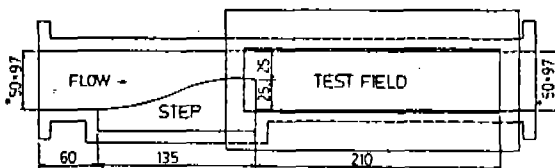


Fig. 1 Combustion Chamber

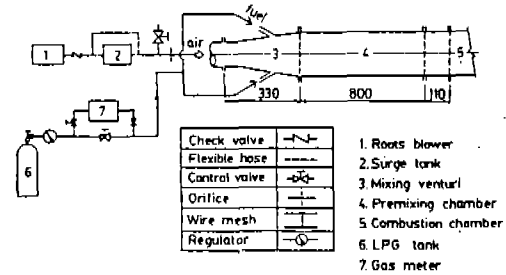


Fig. 2 Flow Diagram of Experiment

이의 절반인 25 mm이다. 화염안정 범위의 측정에서는 공기량을 일정하게 유지한 후, 연료량을 서서히 감소시켜 가면서, 연소실내의 화염이 연소실 밖으로 밀려나가 소화될때를 blow off limit로 하였으며, 본 실험장치의 연구범위내에서는 역화는 일어나지 않았다.

시간평균온도의 측정에는 직경 0.2 mm인 Pt/Pt-Ph 13%의 열전대를 사용하였고, 이온측정은 소선경이 0.1 mm, 재질이 Pt-Rh 13%, 돌출길이가 0.5 mm인 탐침에 -18V를 가하여 양이온을 검출하였다. 가스분석에는 CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>를 측정하였으며 HC는 3,000 ppm이하인 위치에서만 측정하였다.

가스분석의 검출기로는 CO, HC, CO<sub>2</sub>는 Non-Dispersive Infrared Detector이고, O<sub>2</sub>는 Electro-chemical sensor이며, 가스채취 구경이 2 mm인 수냉 프로브(probe)를 이용하였다.

유동장의 가시화에는 직경 300 mm의 오픈 거울을 사용한 솔리이렌(Schlieren)법에 의하였다. 측정좌표는 스텝선단을 원점으로 상방향을 +Y, 하방향을 -Y, 유동방향을 X, 유동의 직각방향을 Z 축으로 설정하였다.

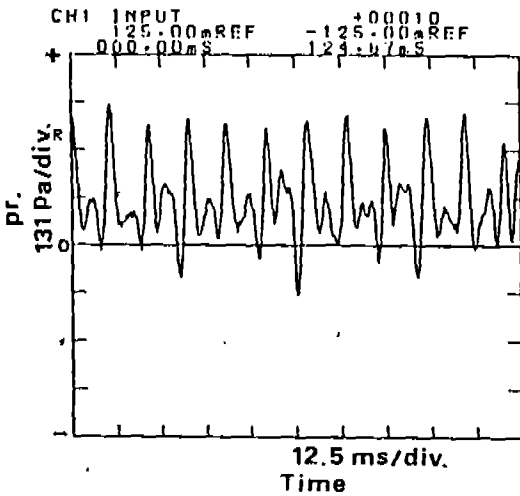
실험조건은 Table 1과 같으며, 입구난류 강도는 스텝선단의 X=0, Y=12.5 mm, Z 방향 중앙에서 측정한 값이다. 유로계는 스텝선단으로부터 상류 3.5m 위치에 설치한 서어지탱크의 경우 여하에 따라 연소기 입구 유동조건이 다른 경우를 나타낸다. 속도(U)는 스텝선단 입구에서 체적유량을 단면적으로 나눈 값이다. Fig. 3에는 비연소시에 스텝선단에서의 압력맥동 특성을 나타낸다.

재순환영역의 길이는 Na 염색 반응에 의해 측정된 결과 약 70 mm 전후였다.

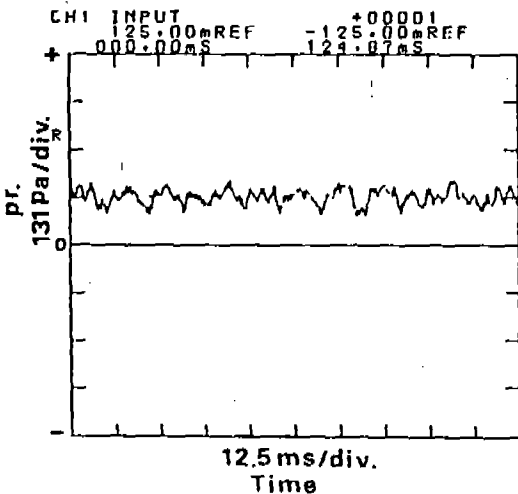
Table 1 flow conditions

No.	U(m/s)	$\phi$	u'(%)	유로계#
1	5	0.9	5	R-T
2	10	0.9	3.1	R-T
3	5	0.9	1.3	R-S-T
4	5	1.0	5	R-T

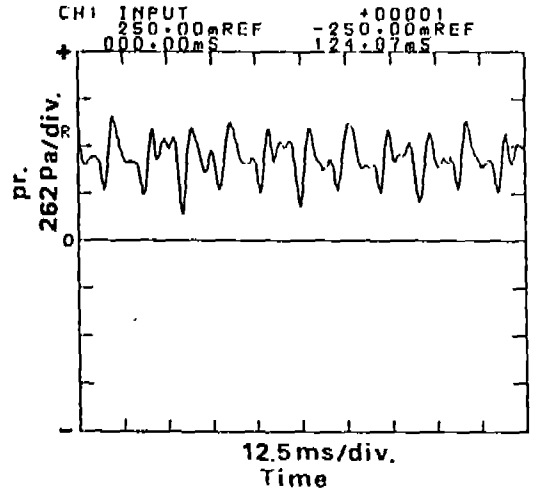
\* R:Roots Blower  
S:Surge Tank(0.3m<sup>3</sup>)  
T:Test Field



(a) 5m/s, R-T,  $\sqrt{p'^2}$  : 108 Pa.



(b) 5m/s, R-S-T,  $\sqrt{p'^2}$  : 22 Pa.



(c) 10m/s, R-T,  $\sqrt{p'^2}$  : 108 Pa.

Fig. 3 pressure signals of non-reacting flow at step edge

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화염의 안정범위

본 실험장치의 화염안정범위를 측정한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Blow-off는 접근류의 압력 맥동강도에 관계없이 당량비 0.6 부근에서 거의 일정하게 발생하지만 역화는 당량비의 증가(속도 3.7m/s에서  $\phi=1.9$ )에도 불구하고 본 연구범위에서는 일어나지 않았다. 그 대신에 유속이 4~8 m/s 사이의  $\phi=1.2\sim 1.4$  부근에서 화염색깔이 청색에서 청녹색으로 바뀌면서, 화염이 연소실 밖으로 길게 이어지는 특이한 현상이 나타났다. 이러한 청녹색 화염이 나타나는 현상은 탄화수소계 연료의 과농 혼합기 상태에서는, C<sub>2</sub> radical의 밴드스펙트럼(Band-spectrum)이 지배적이기 때문이라고 생각된다.<sup>11),12)</sup>

#### 3.2 가시화 관찰

먼저 연소실내에서의 화염구조를 조사하기 위해 순간 슬리이렌 사진을 촬영하였다. Fig. 5는 Table 1의 각 조건에서의 슬리이렌 사진이다. 모든 조건에서 연소실 전반에 걸쳐서 대규모 조직적 구조의 와(渦)가 나타나고 있으며, 속도가 5m/s (Fig. 5(a))에서 10m/s (Fig.

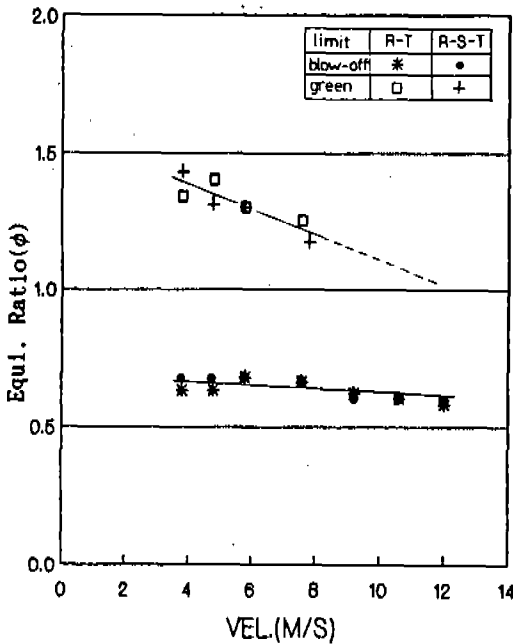


Fig. 4 Flammable Limits



(a)No.1 5m/s, φ 0.9



(b)No.2 Increase Vel. 10m/s



(c)No.3 Decrease Pulse Intensity



(d)No.4 Increase Equi. Ratio φ 1.0

Fig. 5 Schlieren Photographs

5 (b)로 증가하면, 하류부근의 와에 주름이 증가하고 있다. 또한 압력맥동강도가 큰 경우에 스텝선단으로부터 최초 와가 형성될 때까지의 거리도 짧아지고 있다. 이러한 와의 성장을 정량적으로 조사하기 위해서 Fig. 6과 같이 와의 크기( $l$ )를 정의하였다. 여기서  $X$ 는 스텝선단으로부터 와가 존재하는 곳까지의 거리를 나타내며 혼합층의 폭은 와의 크기( $l$ )에 비례할 것이다. 이 1 값은 재부착점까지는 와의 높이(직경)를 나타내고, 그 이후로는 연소실 바닥면에서 와의 최고 높이까지의 거리를 표시한다. Fig. 7과 Fig. 8은 여러장의 순간 슐리렌 사진으로부터, 스텝선단에서의 거리( $X$ )와 와(渦)의 크기( $l$ )를 구한 결과를 나타낸 것이다.

이 그림을 보면 압력맥동강도가 큰 경우 (Fig. 7 (a))는  $X = 150\text{mm}$  단면에서  $l = 16 \sim 29\text{mm}$  정도인데 비해, 맥동강도가 작은 경우 (Fig. 7 (b))에는  $l = 11 \sim 15\text{mm}$  정도로 나타났다. 그러므로 연소기 입구에서 압력맥동강도가 큰 경우에, 스텝선단 가까운 곳에서의 와의 크기가 더 크므로 혼합층의 폭이 증대되고 있다. 따라서 같은 단면에서 미연혼합기의 entrainment도 증가하여 혼합이 더욱 촉진될 것이므로 연소강도도 높아지고, 재순환영역 깊숙히 반응 영역이 넓어질 것으로 예상된다. 한편,  $X = 150\text{mm}$  단면보다 하류에서는 속도나 맥동강도에 관계없이, 와의 크기가 거의  $40 \sim 45\text{mm}$  부근에서 일정하게 유지된다. 이것은 압력맥동강도가 하류로 갈수록 감소하고, 와의 성장이 벽면의 영향을 받기 때문이라고 생각된다.

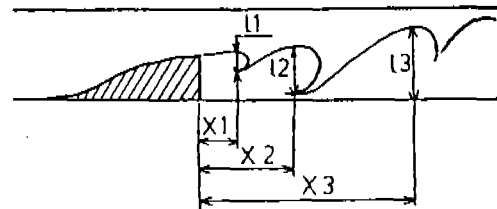
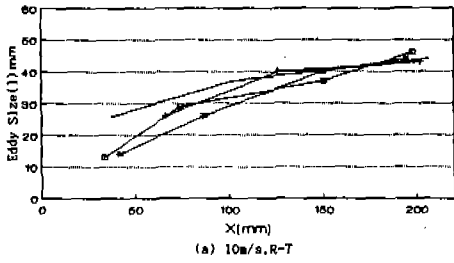
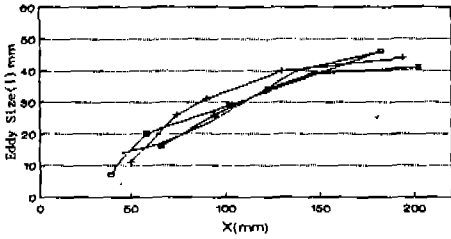


Fig. 6 Schematic Diagram of Eddy Size( $l$ ) and Distance( $X$ )

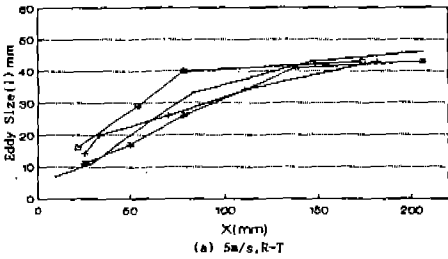


(a) 10m/s, R-T

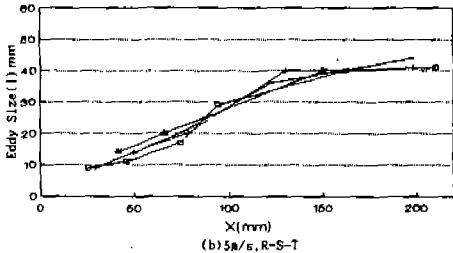


(b) 10m/s, R-S-T

Fig. 7 Profiles of Eddy Size(l) at 10m/s,  $\phi=0.9$ ; (a) R-T (b) R-S-T



(a) 5m/s, R-T



(b) 5m/s, R-S-T

Fig. 8 Profiles of Eddy Size(l) at 5m/s,  $\phi=0.9$ ; (a) R-T (b) R-S-T

### 3.3 압력맥동이 연소실온도와 연소강도에 미치는 영향

Fig. 2의 유로계에서 접근류의 압력맥동강도의 변화가 연소실내의 온도분포에 미치는 영향을 조사한 것이 Fig. 9이다. 혼합기 유속은

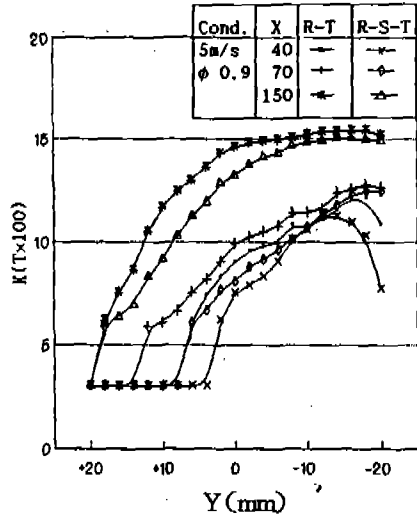


Fig. 9 Temperature Profiles for R-T & R-S-T; 5m/s,  $\phi=0.9$

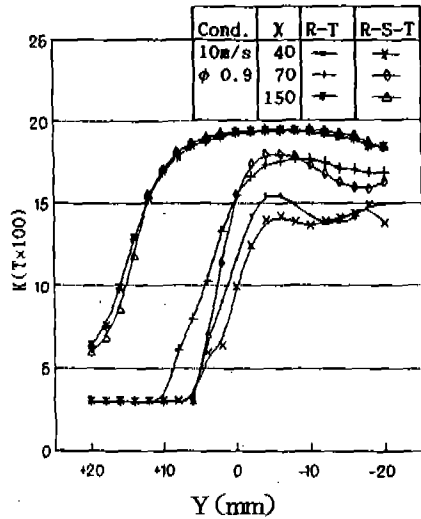


Fig. 10 Temperature Profiles for R-T & R-S-T; 10m/s,  $\phi=0.9$

5m/s인 경우이다. 이 그림을 보면 루츠송풍기의 압력맥동이 더 크게 연소실에 영향을 미치는 경우(R-T)가 각 단면에서 전반적으로 온도가 높으며, 미연혼합기측에서 온도가 상승하는 위치도 빨라지고 있다. 이것은 Fig. 5의 슬리이렌 사진에서도 관찰된 바와 같이 스텝 선단에 더 가까운 곳에 초기 와가 형성되어, 와가 성장하여 가므로 같은 단면에서 혼

합이 더욱 촉진되고 혼합층의 폭이 증가하기 때문일 것이다. 그러나 속도가 10m/s 인 경우 (Fig. 10)에는 Fig. 9에서와 같은 큰 차이는 보이지 않는다.

이것은 저속(5m/s)인 경우에는 루츠송풍기의 맥동의 영향이 연소실에 크게 영향을 미치지 않지만, 고속(10m/s)인 경우에는 그 영향이 줄어들기 때문으로 보인다. 따라서 유동장의 압력맥동이 연소실온도에 미치는 영향은 유동속도에 따라 일정하지 않음을 알 수 있다. 한편, 속도차이에 따른 연소실내의 온도분포를 비교해 본 것이 Fig. 11이다. 속도가 10m/s인 경우가 5m/s인 경우보다 전반적으로 연소실내의 온도가 높아지고, 온도곡선의 구배도 커졌다. 즉 혼합층의 폭이 감소함을 의미한다. 이것은 속도가 증가하면 혼합기의 연소실을 횡단하는 특성시간이 혼합의 특성시간(와의 성장시간)에 비해 짧아지기 때문일 것이다.

한편 접근류의 압력맥동강도가 연소실내의 연소강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 이온전류의 rms 치를 측정한 결과가 Fig. 12 이다. 이온전류의 rms 치는 반응강도에 비례한다고 볼 수 있다. 이 그림을 보면 X=40mm 단면에서는 맥동강도가 큰 조건에서 이온전류 값이 최대 6 nA임에 비해 맥동강도가 적은 경우는 1nA정도이다. 그리고 X=70 mm 단면에서는 50 nA에 대해 11nA이다.

그러므로 접근류의 맥동강도가 큰 경우가 상류 단면에서는 반응강도가 더 높다. 그러나 X=150 mm인 하류단면에서는 맥동강도의 영향이 줄어들고 있다. 이 단면은 Fig. 7과 Fig. 8의 순간 슬리이렌 사진에서 고찰한 바와 같이 와의 크기가 거의 일정한 곳이다. 즉, 와의 성장이 거의 완료된 상태이고 난류에너지의 소산에 의해 와의 강도가 현저히 감소하기 때문으로 보인다.

3. 4 가스분석 고찰

루츠 송풍기에 의해 가해지는 접근류의 압력맥동의 크기가 연소실내의 연소특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 가스분석을 행한 결과 Fig. 13이다. 이 그림은 속도가 10 m/s

인 경우의 X=40mm 단면(재순환 영역내)에서의 분포이다. 먼저 맥동강도가 작은 경우(Fig. 13(a))를 보면, 온도가 상승하기 시작하는 위치(Y=6mm 부근)에서 O<sub>2</sub>는 감소하기 시작하고 CO<sub>2</sub>가 증가하기 시작하는 것은 와내부로부터의 기연가스의 확산때문으로 보인다. 그리고 최고온도 위치(Y=-6mm 부근)에서부

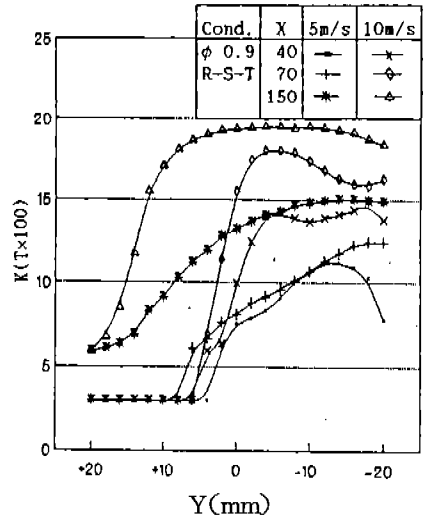


Fig. 11 Temperature Profiles for 5m/s & 10m/s ; φ=0.9, R-S-T

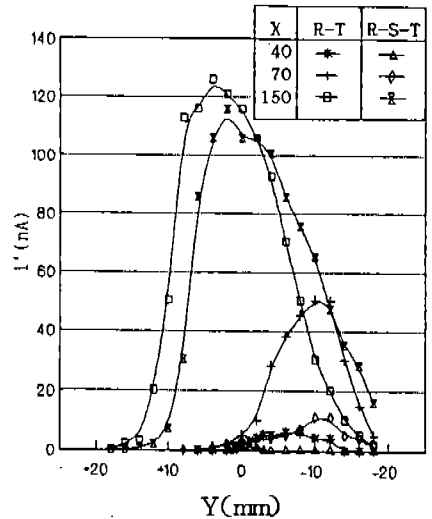


Fig. 12 RMS Values of Ion Concentration for R-T & R-S-T at X=40, 70, 150 mm; 5m/s, φ=0.9

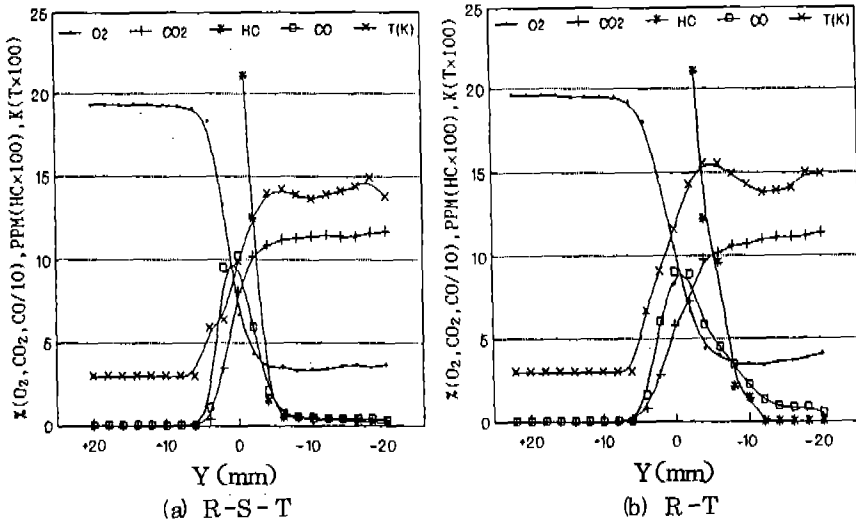


Fig. 13 Gas Concentration Profiles of  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ , UHC, and Temperature at 10 m/s,  $\phi=0.9$ ,  $X=40$  mm

터는  $O_2$ 가 거의 일정하며,  $CO_2$ 가 약간씩 증가하는 것은  $CO$ 가  $CO_2$ 로 변화하는 과정으로서 반응이 거의 종료되어 가기 때문일 것이다. 한편, 중간생성물인  $CO$ 는 온도상승과 함께 증가하다가  $Y=0$  mm 위치에서 최대치에 도달한 후 감소한다. Glassman<sup>12)</sup>에 의하면  $CO$ 가  $CO_2$ 로 바뀌는 과정이 열방출(heat release)의 주원인이 되고, 최고온도 부근에서 열방출의 피크가 나타나며,  $CO$ 와 다른 중간생성물의 급격한 감소와 함께  $CO$ 폭선도 갑자기 하강한다고 하였다. 즉 이 부근( $Y=0 \sim -6$  mm)에서 대부분의 반응이 일어남을 의미하며, 최고온도 부근과 일치하고 있다. 한편 압력맥동강도가 큰 경우의 Fig. 13(b)에서도 같은 경향을 나타내고 있다. 다만 압력맥동강도가 큰 경우에 재순환 영역내에서 온도가 약간 높고,  $CO$ 가 많이 검출되며,  $CO$  분포 폭이 더 넓은 것은 압력맥동의 영향으로 재순환영역내에서도 반응이 더 활발하기 때문일 것이다. 결과적으로 루츠송풍기의 압력맥동을 그대로 연소기 입구 조건에 이용하는 것이, 같은 단면에서 온도와 연소강도의 증가를 가져오기 때문에 고부하 연소에 유리하다고 생각된다. 이것은 연소용 공기를 압송하는 송풍기를 가능한 맥동이 적당히 큰 것을 택하는 것도 고부하 연소에 유리함을 의미한다.

#### 4. 결 론

유선형 스텝에 의해 안정화된 에혼합화염을 대상으로 연소용 공기에 주어지는 압력맥동의 크기가 화염구조와 연소특성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연소기 입구에서의 압력맥동강도가 더 큰 경우, 스텝선단으로부터 최후 와(eddy)가 형성될 때까지의 거리가 짧아지고, 와의 크기가 커져서 혼합층의 발달이 빠른 화염구조를 갖는다. 그러나 하류 단면으로 갈수록 그 영향은 감소한다.
2. 압력맥동강도가 큰 조건에서 연소실내의 온도가 높고, 연소강도가 크기 때문에 고부하 연소에 유리하다. 그러나 같은 맥동강도 일지라도 유동속도가 증가하면 그 영향은 줄어든다.
3. 압력맥동강도가 같은 경우 혼합기의 유입속도가 증가하면 같은 단면에서 온도는 높아지고 혼합층의 폭은 좁아진다.

#### 후 기

본 연구는 1990년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행한 것이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. Jones, R.E., Gas Turbine Engine Emissions, problems, progress and Future, Progress in Energy and Combustion Science, 4,2, pp.73-113, 1978.
2. Sawyer, R.F., Cernansky, N.P. and Oppenheim, A.K., Factors controlling pollutant Emissions from Gas Turbine Engines, AGARD Conference Preceedings, NO.125 on Atmospheric Pollution by Aircraft Engines, section 22-1-11, 1973.
3. Plee, S.L. and Meller, A.M., Review of Flashback Reported in Prevaporizing/Premixing Combustors, Combustion and Flame, 32, pp.193-203, 1978.
4. A.R. Ganji and R.F. Sawyer, An Experimental Study of the Flow Field and Pollutant Formation in a Two Dimensional, Premixed, Turbulent Flame, AIAA, 79-0017, pp.1-17, 1979.
5. A.R. Ganji and R.F. Sawyer, Experimental Study of the Flow Field of a Two Dimensional Premixed Turbulent Flame, AIAA, 79-0017R, pp.817-824, 1980.
6. J.O. Keller et.al., Mechanism of Instabilities in Turbulent Combustion Leading to Flashback, AIAA, 81-0107R, pp.254-262, 1982.
7. L.J. Parker, R.F. Sawyer, A.R. Ganji, Measurement of Vortex Frequencies in a Lean, Premixed Prevaporized Combustor, Combustion Science and Technology, 20, pp.235-241, 1979.
8. R.W. Pitz and J.W. Daily, Experimental Study of Combustion in a Turbulent Free Shear Layer Formed at a Rearward Facing Step, AIAA, 81-0106, 1981.
9. Y. El Bahawy, S. Sivasegaram, J.H. Whitelaw, Premixed, Turbulent Combustion of a Sudden-Expansion Flow, Combustion and Flame, 50, pp.153-165, 1983.
10. P.A. Libby and H.R. Keiss, The Design of Two Dimensional Contraction Section, Quarterly of Applied Mathematics, 10, pp.95-98, 1951.
11. 水谷幸夫, 燃焼工學, 森北出版(株), 東京, p.194, 1989.
12. I. Glassman, Combustion, Academic Press Inc., London, pp.113, 1987.