

〈論 文〉

二重旋回流中の亂流擴散火焰의 安定化에 관한 研究

조 옹 대* · 최 병 루**

(1990년 7월 30일 접수)

A Study on the Stability of Turbulent Diffusion Flame in Double Swirl Flows

Yong Dae Cho and Byeong Ryun Choi

Key Words ; Double Swirl Flows(이중선회류), Reverse Flow Boundary(환류영역경계), Blow-off Limit(吹飛限界), Blowout Limit(吹消限界), Lift Limit(浮上限界), Drop-back Limit(재정착한계), Swirl Generator(선회류 발생기)

Abstract

The annular and coaxial swirl flows between which LPG is supplied was selected to study the swirling flames in double co-swirl flows. The objective of this study is to research into the effects of double co-swirl flow conditions on the stability limit, the reverse flow boundary, and the time mean temperature distributions of the swirling flames. The increase of swirl intensity of axial flow makes the stability limit decrease, but the annular swirl flow ($SM > 0.5$) makes stability and swirl intensity of axial flow increase, And the existence of axial swirl flow makes flame intensive and small in size, and this may be applicable to the design of high power compact combustor.

기 호 설 명

- M_{ian} : 접선방향으로 유입되는 공기의 질량유량
- M_{tot} : 접선방향 및 축방향으로 유입되는 총공기의 질량유량
- R : 노즐중심에서 반경방향좌표
- SM : 선회강도 ($= M_{ian}/M_{tot}$)
- U_c : 중심 선회류의 노즐 출구에서의 축방향 평균 유속
- U_g : 연료의 노즐출구에서의 축방향평균유속
- U_s : 주위 선회류의 노즐 출구에서의 축방향 평균 유속
- Z : 노즐출구에서 유동방향좌표

주위로 선회류가 공급되는 형태이며 이에 대한 비연소시의 유동장의 연구^(1~4,6), 화염구조의 연구^(5~8), 화염안정의 연구^(7,9,10) 및 배기오염물질생성의 연구^(11,12)가 많이 보고되어 있다. Yuasa⁽¹⁰⁾는 수소 및 메탄을 연료로 하여 연료제트에도 선회를 부여할때 부상화염(lifted flame)의 안정성을 향상시킬 수 있다고 보고했고, Gupta 등⁽⁹⁾은 유동장이 난류상태에서는 전단응력이 큰 영역과 연료농도가 높은 영역이 일치하도록 연료의 농도와 유동방향을 조절함으로써 높은 연소부하율(volumetric heat release rate)을 얻을 수 있다는 원리를 이용하여 새로운 형태의 다중선회연소기(multi-annular swirl burner)에 대해 연구한 결과 기존의 선회화염보다 화염안정한계가 더 넓은 이점이 있다고 보고했다.

1. 서 론

일반적으로 실용연소기의 선회화염은 연료노즐

본 연구는 다중선회연소기의 원리에 기초하여 연료와 산화제의 접촉면적 및 혼합속도를 증가시킴으로써 연소부하의 증대 및 연소효율의 향상효과를

* 정회원, 부산대학교 대학원

** 정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학과

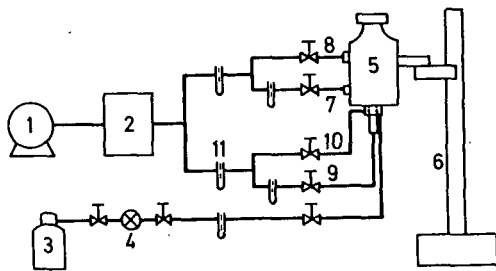
얻을 수 있는 새로운 연소방식을 개발하기 위한 시도로서 속도차가 있는 동축의 두 공기분류 사이의 전단층에 기체연료를 분출시켜서 형성되는 난류 확산 화염에 관하여 유동장의 성상이 화염안정한계 및 화염구조에 미치는 영향을 조사하여 실용연소기의 유동장제어 및 고부하연소기설계를 위한 기초자료를 얻는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이고, Fig. 2는 연소기의 상세도이다. 연료노즐은 내경 18mm, 두께 2mm의 圓管과 내경 26mm, 두께 2mm의 圓管이 동심으로 설치되어 두개의 동심원관 사이(간격 2mm)에서 기체연료인 상용프로판가스(LPG)가 공급되는 구조이고, 이 연료노즐은 출구직경 80mm의 공기노즐에 동심으로 설치되어 있으며 화염안정한계의 측정에는 화염안정한계에 미치는 연료노즐 림(rim)의 영향을 최소화 하기 위하여 노즐선단의 두께를 0.1mm로 얇게 제작했다. 연료노즐의 중심축 공기류를 중심기류, 연료노즐 주위의 공기류를 주위기류라 정하고, 각각의 출구 평균유속을 U_c, U_s 로 표시했다. 선회류 발생기(swirl generator)는 실린더형 공기덕트에 접선방향 및 축방향으로 공기를 공급하는 Axial Plus Tangential Entry Swirl Generator이며 접선방향 공기류는 4개의 슬롯(slot)에서 접선방향으로 실린

더 내에 공급된다. 중심기류 및 주위기류의 선회는 접선방향의 공기량(M_{tan}) 및 축방향의 공기량을 조절하여 선회강도 및 공기유량을 변화시켰다. 선회강도(SM)는 접선방향 및 축방향 공기의 총유량(M_{tot})에 대한 접선방향의 공기유량(M_{tan})의 비, 즉 $SM = M_{tan}/M_{tot}$ 로 정의되므로 접선방향의 공기만 유입될 때는 $SM=1$ 이고 축방향의 공기만 유입될 때는 $SM=0$ 이다.

중심기류와 주위기류의 선회방향은 같은 방향(co-swirl)으로 하였다. 측정좌표는 노즐선단에서 유동의 하류방향을 Z축, 노즐중심에서 반경방향을 R축으로 설정하였다. 화염의 시간평균온도의 측정에는 직경 0.3mm Pt-Pt/Rh13%의 수냉식 열전대를 사용했다. 환류영역경계(reverse flow bound-



- 1. Blower
- 2. Surge tank
- 3. LPG tank
- 4. Regulator
- 5. Burner
- 6. Traversing equipment
- 7. Axial air control valve of surrounding air
- 8. Tangential air control valve of surrounding air
- 9. Axial air control valve of central air
- 10. Tangential air control valve of central air
- 11. Manometer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

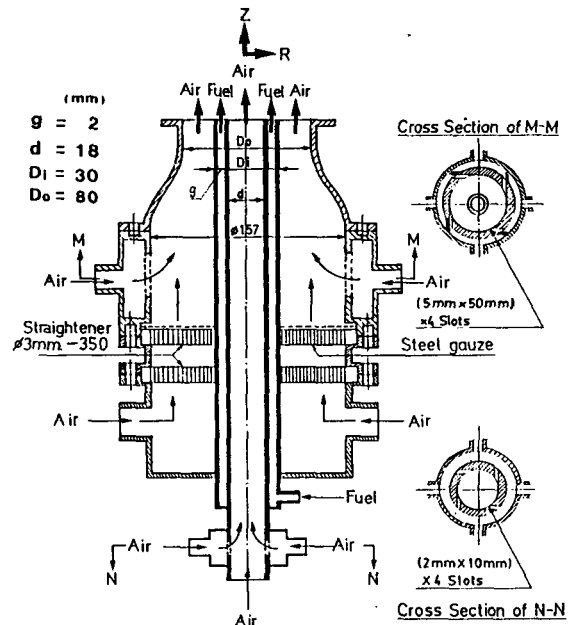
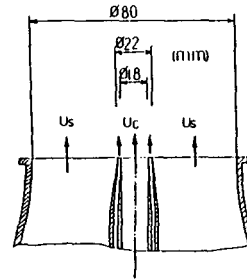
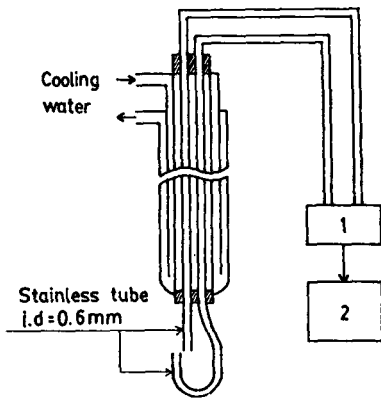


Fig. 2 Schematic of double swirl burner



1. Differential pressure transducer
2. Differential pressure amplifier

Fig. 3 Total pressure difference probe

ary)의 측정은 내경 0.6mm의 한쌍의 全壓(total pressure) 측정용 튜브의 끝단을 서로 마주보도록 제작한 프로브를 사용하였고 그 상세도를 Fig.3에 나타내었으며, 환류영역경계는 축방향유속이 0인 위치로서 順流와 還流의 경계이므로 全壓差(total pressure difference)가 零(zero)이 되는 반경방향의 위치로 결정하였다^(2,10).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염안정한계

본 실험에서 화염안정한계는 화염이 소멸(blow-off 또는 blowout)될 때의 중심기류의 평균유속(U_c)으로 정의한다.

(1) 중심선회류의 영향

Fig. 4는 정지대기중($U_s=0$)에 $SM=1$ 인 중심선회류를 분출시킬때 본 실험장치의 한도내에서의 연료량에 따른 화염안정한계를 나타낸 것이다. $Q_g \leq 150\text{cc/s}$ 에서는 $U_c(8.2\text{m/s})$ 일때 림부착화염(rim-attached flame, R)의 형태로 안정되고 $U_c=8.2\text{m/s}$ 에서 blowoff(BF)된다. 그러나 Q_g 150cc/s에서는 $U_c=8.2\text{m/s}$ 에서 blowoff 되지 않고 浮上火焰(lifted flame, L)의 형태로 안정되며 U_c 를 더욱 증가시키면 blowout(BT)된다. 이 때 blowout limit는 연료량이 증가할수록 높아진다. 그리고 일단 浮上火焰(L)이 형성된 후 U_c 를 감소시켜갈 때 다시 림부착화염(R)으로 안정되는 재정착한계(drop-back limit)는 浮上限界(lift limit)보

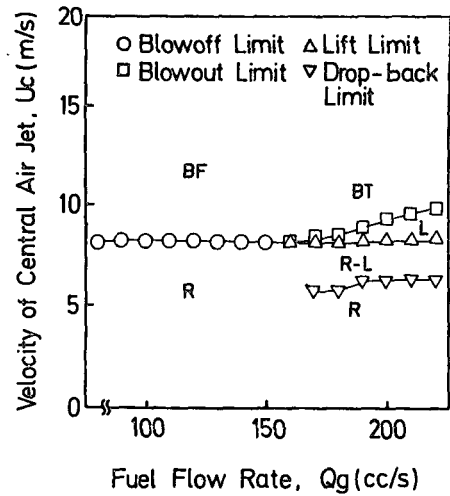


Fig. 4 Stability limit of flame ($SM_{central}=1$)

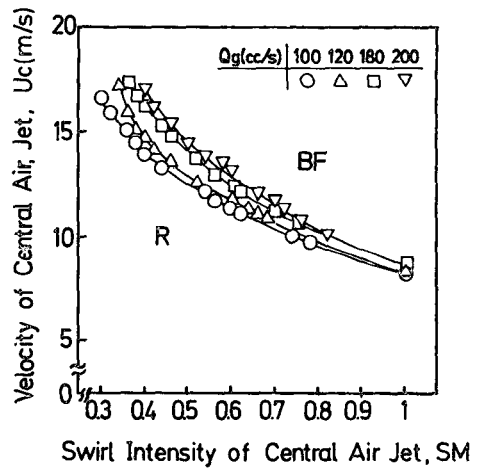


Fig. 5 Effect of swirl intensity of central air jet on stability limits

다 약 2m/s 작은 값이다. 이러한 재정착한계는 연료분류형 확산화염(fuel jet type diffusion flame)에 대해 浮上限界가 존재하는 조건에서는 일반적으로 생기는 현상⁽¹³⁾으로서 본 실험의 조사대상화염인 선회공기분류형 확산화염(swirling air jet type diffusion flame)에서도 존재함을 알았다.

Fig. 5는 $Q_g=100, 126, 180, 200\text{cc/s}$ 인 경우에 대해서 Fig.4에서와 같이 정지대기중($U_s=0$)에 중심선회류를 분출시킬때 중심선회류의 선회강도의 변화에 따른 blowoff limit를 나타낸 것이다. 각각의 일정한 연료량에 대해서 중심기류의 선회강도가

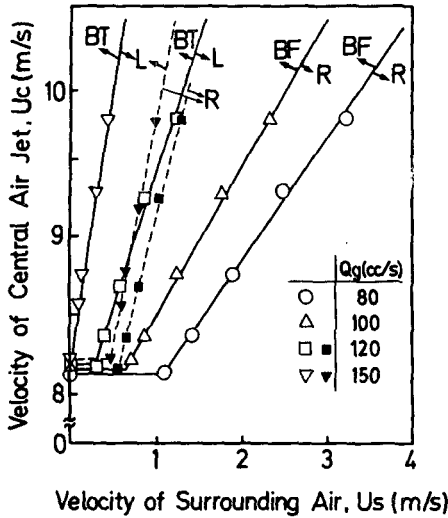


Fig. 6 Effect of velocity of surrounding air on stability limits ($SM_{central}=1, SM_{surrounding}=1$)

커짐에 따라 blowoff limit는 낮아진다. 또 일정한 선회강도의 중심기류에 대해서 연료량이 증가함에 따라 blowoff limit는 높아지지만, 이 경향은 중심기류의 선회강도가 커질수록 작아진다.

(2) 주위선회류의 영향

Fig. 6은 $SM=1$ 인 중심선회류가 분출되어 형성되는 화염을 대상으로 $SM=1$ 인 주위선회류의 유속(U_s)의 변화에 따른 blowoff limit 및 blowout limit를 나타낸 것이다.

$Q_g=80, 100\text{m/s}$ 일때는 주위선회류의 유속이 각각 $U_s(1.2\text{m/s}, U_s(0.8\text{m/s})$ 에서 blowoff limit가 $U_c=8.2\text{m/s}$ 이지만 $U_s \geq 1.2\text{m/s}, U_s \geq 0.8\text{m/s}$ 에서는 U_s 가 커짐에 따라 비례적으로 blowoff limit도 높아진다. 또 $Q_g=120\text{cc/s}$ 에서는 주위선회류의 유속이 $U_s(0.4\text{m/s})$ 에서 blowoff limit가 $U_c=8.2\text{m/s}$ 이지만 $U_s \geq 0.4\text{m/s}$ 에서는 blowoff limit 대신 lift limit와 blowout limit가 나타나며 역시 U_s 가 커짐에 따라 비례적으로 blowout limit가 높아진다. 그리고 Fig. 4에서 보면 $U_s=0$ 일때는 $Q_g \geq 150\text{cc/s}$ 에서 lift limit가 나타나지만 Fig. 6에서는 주위선회류가 존재하면 연료량이 더 적은 $100\text{cc/s}(Q_g/120\text{cc/s})$ 에서 부터 lift limit가 나타남을 알 수 있다. $Q_g=150\text{cc/s}$ 에서는 $U_s=0$ 에서 lift limit가 나타나며 U_s 가 커짐에 따라 역시 비례적으로 blowout limit가 높아진다. 립부착화염(R)과 부상화염(L)

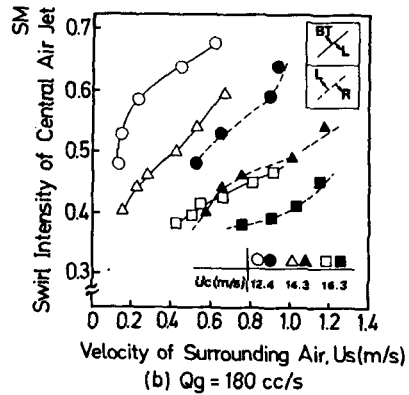
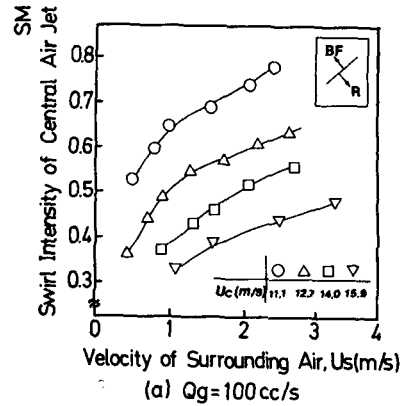


Fig. 7 Effect of velocity of surrounding air on swirl intensity of central air jet at stability limit ($SM_{surrounding}=1$)

은 모두 안정된 화염이며 일반적으로 소염한계는 blowoff limit와 blowout limit를 함께 지칭하므로 이상의 결과를 종합하면 주위선회류의 유속(U_s)이 증가하면 비례적으로 소염한계가 높아짐을 알 수 있다. 그리고 전반적으로 주위선회류의 조건이 일정할때 연료량이 증가하면 소염한계가 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 $Q_g=100\text{cc/s}$ 이고 중심선회류의 유속이 $U_c=11.1, 12.7, 14.0, 15.9\text{m/s}$ 로 각각 일정한 경우에 대해서 $SM=1$ 인 주위선회류의 유속(U_s)의 변화에 따른 blowoff limit에서의 중심선회류의 선회강도를 나타낸 것이다. U_s 가 증가할수록 blowoff limit에서의 중심류의 선회강도는 높은 값을 나타낸다. Fig. 7(b)는 $Q_g=180\text{cc/s}$ 인 경우로서 lift limit가 나타나며 lift limit 및 blowoff limit 모두에 대해서 Fig. 7(a)와 같은 경향을 나타낸다.

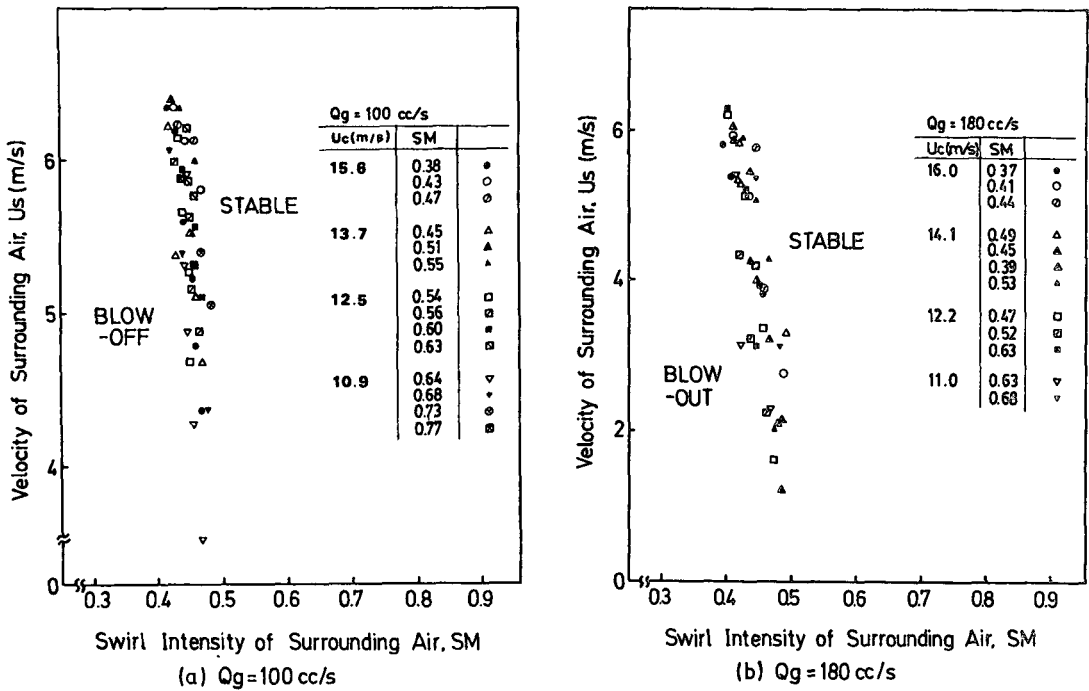


Fig. 8 Effect of swirl intensity of surrounding air on stability limit

즉 주위선회류의 유속 (U_s)을 증가시키므로써 일정한 유속의 중심선회류에 대해 선회강도가 더 높은 범위까지 화염을 안정화시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 $Q_g = 100 \text{ cc/s}$ 일때 주위선회류의 선회강도의 변화에 따른 blowoff limit를 나타낸 것이고 Fig. 8(b)는 $Q_g = 180 \text{ cc/s}$ 일때 blowout limit를 나타낸 것이다. 중심기류의 유속 (U_s)와 중심기류의 선회강도에 거의 관계없이 blowoff limit 및 blowout limit에서의 주위기류의 선회강도는 대략 0.4~0.5이다. 또한 U_s 가 증가함에 따라 선회강도 (SM)는 0.5에서 0.4로 약간 감소하는 경향이 있으나 이것은 연료노즐 끝단을 날카롭게 제작하기 위하여 연료노즐에 약 7°의 테이퍼 (taper)가공한 곳에서의 환류에 의한 보염효과에 의해 U_s 가 증가할수록 보염효과가 커져서 상대적으로 주위기류의 선회강도가 작아도 화염이 안정되기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 중심기류의 선회강도 (SM)와 중심기류의 유속 및 주위기류의 유속에 관계없이 주위기류는 선회강도가 0.5 이상이 되어야 화염안정 한계의 향상에 기여할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 중심기류 및 주위기류의 환류영역경계에 대한 영향

중심기류와 주위기류의 선회조건에 따라 유동장이 변화하는 양상을 조사하기 위하여 비연소시의 유동장에서 환류영역의 경계를 측정했다. Fig. 9(a)는 중심선회류의 환류영역경계를 나타낸 것이다. 정지대기중 ($U_s = 0$)에 $SM = 1$ 인 중심선회류의 유속 (U_c)을 증가시키에 따라 환류영역경계의 반경 방향폭 및 축방향길이가 약간 커지지만 본 실험의 범위에서는 그 차이가 미세하다. Fig. 9(b)는 중심선회류가 없는상태 ($U_c = 0$)에서 주위선회류에 의한 환류영역경계를 나타낸 것이다. $SM = 1$ 인 주위선회류의 유속 (U_s)을 증가시키에 따라 $Z \leq 30 \text{ mm}$ 에서는 반경방향의 폭이 약간 감소하지만 $Z > 30 \text{ mm}$ 에서는 오히려 더 커지고 환류영역경계의 축방향 길이는 더 길어지는 경향이다. Fig. 9(c)는 주위선회류의 유동조건이 $SM = 1$, $U_s = 5.42 \text{ m/s}$ 일때 중심기류의 유동조건의 변화에 따른 환류영역경계의 변화를 나타낸 것이다. 중심기류가 없거나 ($U_c = 0$) 비선회류 ($SM = 0$)인 경우 및 $SM = 1$, $U_c = 5.5 \text{ m/s}$ 인 저속의 경우에 대해서는 주위선회류에 의한 환

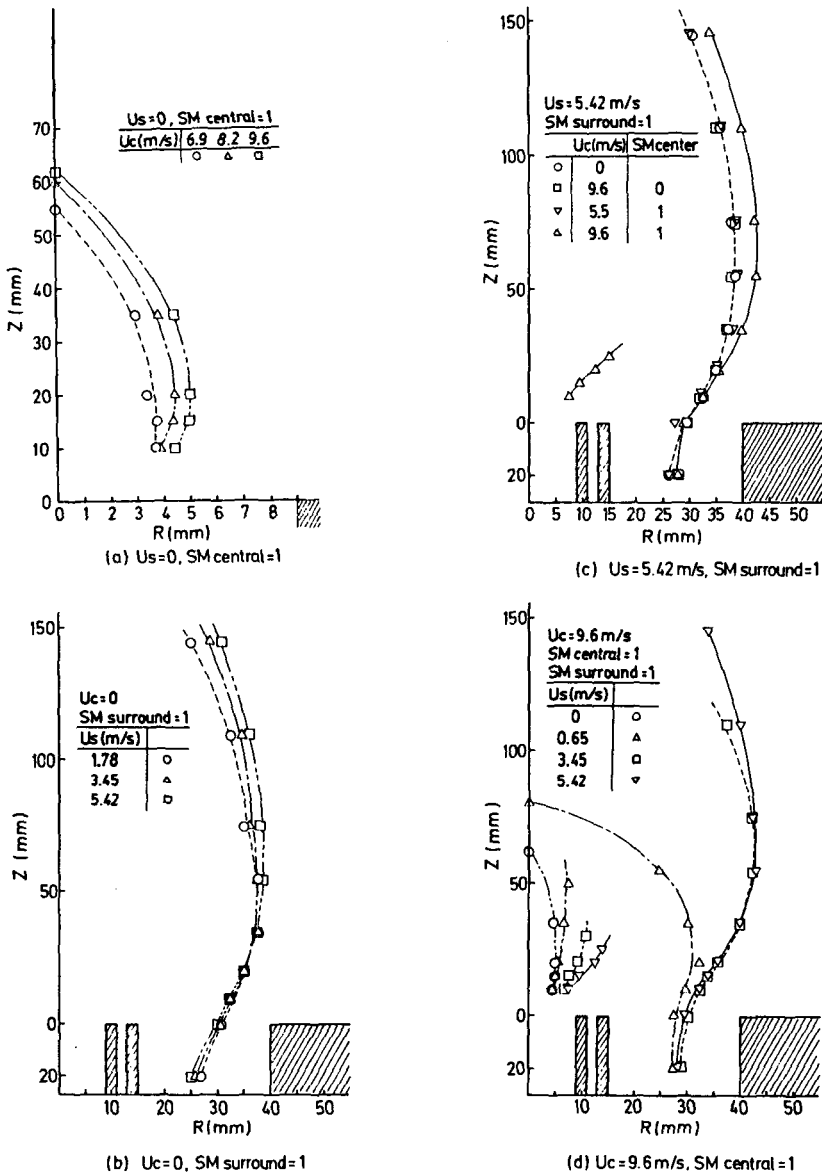


Fig. 9 Reverse flow boundary

류영역경계에 거의 변화가 없다. 그러나 중심선회류의 유속이 증가한 $SM=1, U_c=9.6m/s$ 인 경우는 $10mm < Z < 25mm, 7.5mm < R < 15mm$ 범위에서 또 하나의 환류영역경계가 나타나며 이에 따라 주위선회류에 의한 환류영역경계의 반경방향 폭은 약간 증가함을 알 수 있다. Fig. 9(d)는 중심선회류의 유동조건이 $SM=1, U_c=9.6m/s$ 일때 $SM=1$ 인 주위선회류의 유속변화에 따른 환류영역경계의 변화를 나타낸 것이다. U_s 가 커짐에 따라 중심선

회류에 의한 환류영역경계는 반경방향으로는 나팔 모양으로 점점 확장되었다. 그러나 축방향으로는 경계가 불확실해졌으며 이것은 주위선회류의 역류와 중심선회류의 역류가 합쳐져서 그 경계가 불분명해졌기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 거시적 화염구조

Fig. 10은 중심기류와 주위기류의 유동조건에 따른 거시적인 화염구조의 변화를 알기 위해

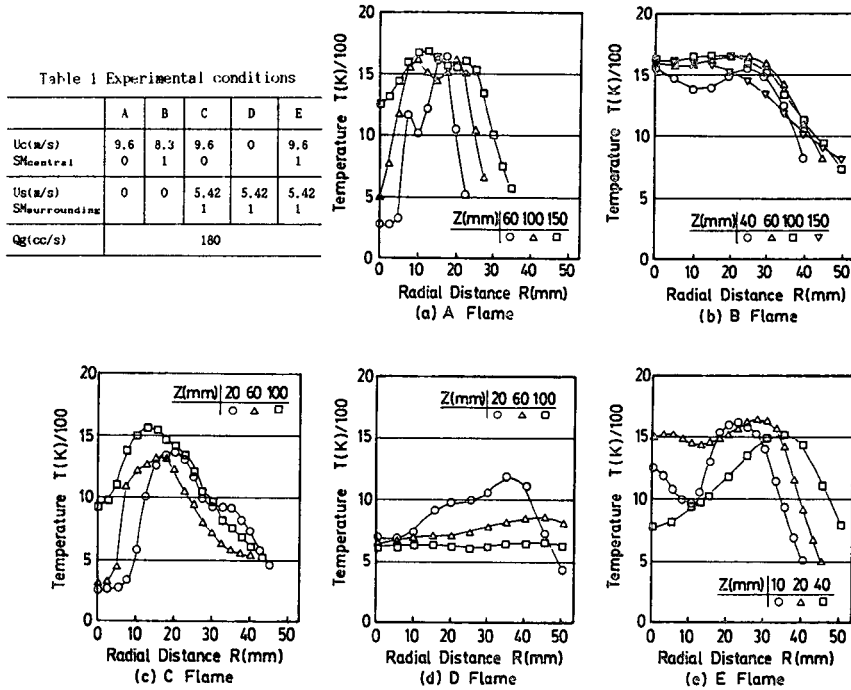


Fig. 10 Temperature distributions ($Q_g=180cc/s$)

여 대표적으로 $Q_g=180cc/s$ 인 경우에 대해 각 화염의 시간평균온도분포를 나타낸 것이다. 실험조건은 Table 1에 나타내었다. Fig. 11은 화염의 하류방향 각 단면에서 단면최고온도의 반경방향 위치를 나타낸 것으로 최고온도의 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 12는 각 화염의 중심축상의 온도분포를 나타낸 것이다.

(1) 중심기류의 영향

Fig. 10(a), Fig. 10(b), Fig. 11(a), Fig. 12(a)는 정지대기중 ($U_s=0$)에 비선회중심기류 ($SM=0$) 및 중심선회류 ($SM=1$)가 분출될때 두 화염에 대한 화염구조의 비교관찰을 위한 것이다. Fig. 10(b)에서 중심선회류에 의한 B화염은 고온영역이

중심축부근($R=0$)과 중심축에서 이탈한 $R=25mm$ 부근의 두 곳에서 형성되고 두 고온영역 사이의 온도강하가 크지 않으므로 단면 전반적으로 고온이 형성되어 있으나 Fig. 10(a)에서 비선회중심기류에 의한 A화염은 $Z=60, 100, 150mm$ 에서 중심축에서 이탈한 두 곳에서 고온영역이 형성되며 두 고온영역 사이의 온도강하가 크지않다. 이것은 A화염이 비선회중심기류에 의한 화염으로서 중심기류와 주위의 정지한 공기사이로 연료가 공급되므로 각각의 경계에서 부터 반응이 진행되기 때문으로 생각되며 두 고온영역 사이의 온도강하가 크지 않으므로 거시적으로 볼 때 고온영역이 중심축에서 이탈한 위치에서 대체로 한 곳에 형성된다고 볼 수 있다. Fig. 11(a)에서 고온영역은 $Z>100mm$ 에서 A화염과 B화염 모두 중심축 쪽으로 이동하며 Fig. 12(a)에서 B화염이 A화염보다도 상류인 $Z<40mm$ 에서 급격히 상승하며 중심축상의 최고온도의 위치도 B화염이 A화염보다 약 150mm 더 상류에 위치하므로 B화염이 A화염보다 화염길이가 짧음을 알 수 있고 이것은 육안관찰에 의해서도 확인되었다.

Fig. 10(c)~Fig. 10(e), Fig. 11(b), Fig. 12(b)

Table 1 Experimental conditions

	A	B	C	D	E
U_s (m/s)	9.6	8.3	9.6	0	9.6
$SM_{central}$	0	1	0	0	1
U_s (m/s)	0	0	5.42	5.42	5.42
$SM_{surrounding}$			1	1	1
Q_g (cc/s)	180				

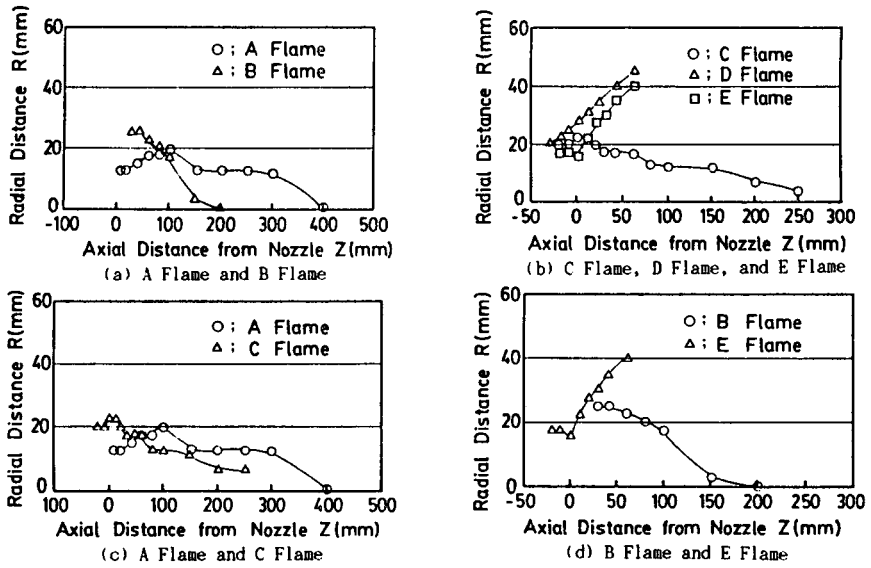


Fig. 11 Radial positions of maximum temperature at each axial section

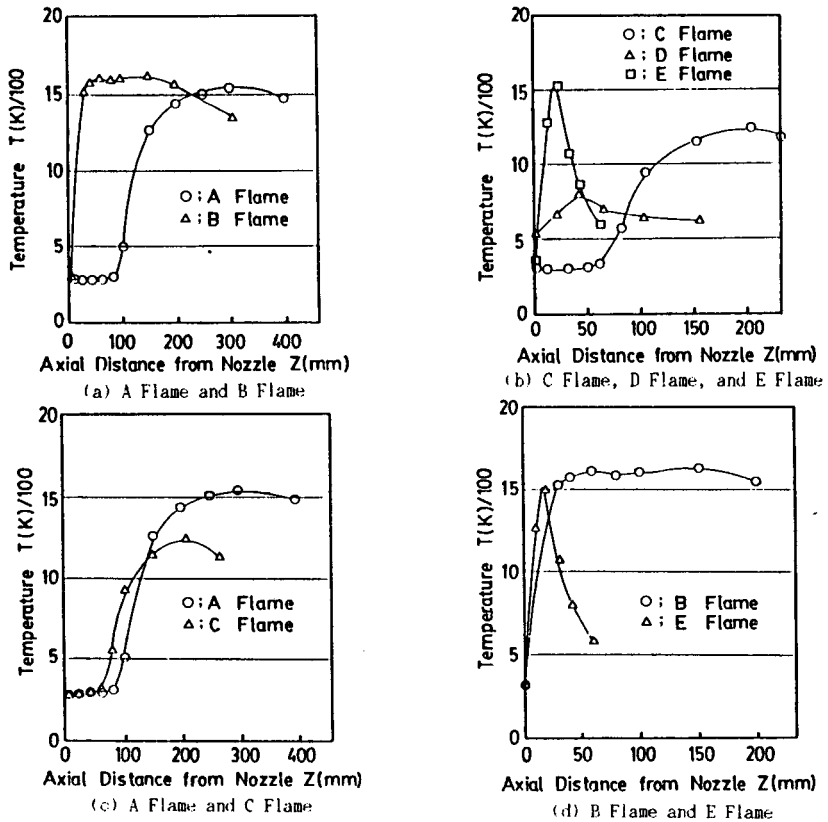


Fig. 12 Temperature distributions along central axis

는 주위선회류의 조건이 $SM=1$, $Us=5.42\text{m/s}$ 일 때 중심기류의 유동조건에 따른 화염구조의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10(d)에서 중심기류가 없는 ($Uc=0$) D화염의 중심축 부근은 700K 이하로 비교적 저온이며 Fig. 11(b)에서 불매 하류로 감에 따라 단면최고온도의 위치가 반경방향으로 나팔모양으로 점점 멀어지는 경향이다. D화염에서 비선회중심기류($SM=0$)가 분출되어 형성된 C화염은 $Z<10\text{mm}$ 에서는 D화염과 같이 단면 최고온도의 위치가 반경방향으로 점점 멀어지므로 주위선회류의 지배를 많이 받는다고 생각되지만 $Z>10\text{mm}$ 에서는 Fig. 11(a)에서 처럼 중심축방향으로 이동하므로 중심기류의 지배를 많이 받는 것으로 볼 수 있다. 그리고 D화염에서 $SM=1$ 의 중심선회류가 분출되어 형성된 E화염은 단면최고온도의 위치는 D화염 처럼 하류로 감에 따라 반경방향으로 멀어지는 경향이 있지만 전체적으로 D화염보다 5~10mm 정도 중심축 쪽으로 이동해 있으므로 화염의 반경방향 폭이 좁아졌으며 Fig. 10(e)에서 보면 중심축 부근과 중심축에서 이탈한 곳의 두 곳에서 고온영역이 형성되어 있다. 그리고 Fig. 10(c)~Fig. 10(e)에서 보면 각 단면의 전반적인 온도증가의 경향은 중심축 온도의 증감경향과 잘 일치하므로 Fig. 12(b)에서 중심축온도분포로서 화염의 길이를 비교해 보면 비선회중심기류가 분출되는 C화염은 D화염에 비하여 길며 중심선회류가 분출되는 E화염은 화염중심축 부근에서도 고온영역을 형성시켜 화염길이 D화염에 비하여 짧고 화염폭도 작음을 알 수 있다.

(2) 주위선회류의 영향

Fig. 10(a), Fig. 10(c), Fig. 11(c), Fig. 12(c)는 비선회중심기류에 의해 형성된 화염(A화염, $SM=0$, $Uc=9.6\text{m/s}$)의 주위선회류($SM=1$, $Us=5.42\text{m/s}$)에 의한 화염구조의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11(c)에서 A, C 두 화염 모두 고온영역이 중심축에서 이탈한 곳에 형성되어 있으나 $Z<60\text{mm}$ 에서는 C화염의 고온영역이 A화염보다 반경방향으로 10mm정도 더 이동해 있는 것은 주위선회류의 영향으로 생각되며, Fig. 12(c)에서 중심축의 온도는 C화염이 A화염보다 전반적으로 낮게 형성되어 있으며 중심축최고온도의 위치는 약 100mm 더 상류에서 나타나므로 화염길이 짧아짐을 알 수 있다.

Fig. 10(b), Fig. 10(e), Fig. 11(d), Fig. 12(d)는 중심선회류에 의해 형성된 화염(B화염, $SM=1$, $Uc=8.3\text{m/s}$)의 주위선회류($SM=1$, $Us=5.42$

m/s)에 의한 화염구조의 변화를 나타낸 것이다. B, E 두 화염 모두 고온영역이 중심축 부근과 중심축에서 이탈한 곳의 두 곳에서 형성되어 있다. Fig. 11(d)에서 B화염은 하류로 감에 따라 고온영역이 중심축으로 이동하지만 주위선회류가 존재하는 E화염은 반경방향으로 점점 이탈하는 나팔모양이며, Fig. 12(d)에서 중심축온도는 E화염이 B화염보다 약 130mm 더 상류에서 최대값이 나타났다가 급격히 하강하므로 E화염의 길이가 짧음을 알 수 있고 이것은 육안관찰에서도 확인되었다.

4. 결 론

이중선회류의 전단층에 프로판가스를 분출시켜서 형성된 이중선회 확산화염을 대상으로 해서 중심기류와 주위기류의 유속 및 선회강도의 변화가 화염안정한계, 환류영역경계 및 거시적인 화염구조에 미치는 영향을 실험적으로 조사하여 본 실험의 범위내에서 다음의 결과를 얻었다.

(1) 중심선회류의 선회강도가 증가할수록 화염안정한계는 감소한다.

(2) 주위선회류의 선회강도(SM)가 0.5 이상일 때 주위선회류의 유속을 증가시키므로써 화염안정한계를 증가시킬 수 있고, 또 일정한 유속의 중심선회류에 대해 선회강도가 더 높은 범위까지 화염을 안정시킬 수 있다.

(3) 주위선회류의 유속이 증가하면 중심선회류에 의한 환류영역의 경계는 반경방향으로 확장된다.

(4) 중심선회류가 없이 주위선회류에 의해 형성된 화염(D화염)에 비하여 중심선회류가 존재하는 화염(E화염)은 화염의 중심축 부근에서도 고온영역을 형성시켜 화염의 길이가 D화염에 비하여 짧고 화염폭도 작으므로 고부하연소에 적합하다.

(5) 중심기류에 의해 형성된 화염에 대해 주위선회류가 존재하면 고온영역의 형성위치가 반경방향으로 중심축에서 이탈하며 화염길이 짧아진다.

참 고 문 헌

- (1) Beer, J.M. and Chigier, N.A., 1972, "Combustion Aerodynamics", Halsted-Wiley, pp. 100~135.
- (2) Gupta, A.K., Lilly, D.G. and Syred, N., 1984, "Swirl Flows", Abacus Press, pp. 97, 17~293.

- (3) Lilly, D.G., 1977, "Swirl Flows in Combustion : A Review", AIAA J., Vol. 15, No. 8.
- (4) Syred, N. and Beer, J.M., 1974, "Combustion in Swirling Flows : A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143~201.
- (5) Chigier, N.A. and Dvorak, K., 1975, "Laser Anemometer Measurements in Flames with Swirl", 15th Symposium (International) on Combustion, pp. 573~585.
- (6) Baker, R.J., Hutchinson, P., Khalil, E.E. and Whitelaw, J.H., 1975, "Measurements of Three Velocity Components in a Model Furnace with and without Combustion", 15th Symposium (International) on Combustion, pp. 553~559.
- (7) Syred, N., Chigier, N.A. and Beer, J.M., 1971, "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets with Swirl", 13th Symposium (International) on Combustion, pp. 617~624.
- (8) 신현동 외 2인, 1984, "선회화염의 구조에 따른 NO, CO 및 THC 생성특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제8권, 제3호, pp. 210~216.
- (9) Gupta, A.K., Beer, J.M. and Swithenbank, J., 1977, "Concentric Multi-Annular Swirl Burner : Stability Limits and Emission Characteristics", 16th Symposium (International) on Combustion, pp. 79~91.
- (10) Yuasa, S., 1986, "Effects of Swirl on the Stability of Jet Diffusion Flames", Combustion and Flame, Vol. 66, pp. 181~192.
- (11) Takagi Toshimi and Okamoto Tatsuyuki, 1981, "Characteristics of Combustion and Pollutant Formation in Swirling Flames", Combustion and Flame, Vol. 43, pp. 69~79.
- (12) Sadakata, M. and Beer J.M., 1977, "Spatial Distribution of Nitric Oxide Formation Rates in a Swirling Turbulent Methane-Air Flame", 16th Symposium (International) on Combustion, pp. 93~103.
- (13) Scholefield, D.A. and Garside, J.E., 1949, "The Structure and Stability of Diffusion Flame", 3rd Symposium (International) on Combustion, pp. 102~110.