

2중스월류에 의한 난류분무화염의 연소특성 연구

이강엽* · 황상순**

A Study on Combustion Characteristics of Turbulent Spray Flame by the Dual Swirler

Kang-Yeop Lee*, Sang-Soon Hwang**

Key Words: The Dual Swirl Flow, Co-swirl, Counter-swirl, Thermophoresis, TEM, NOx, Soot, Soot Volume Fraction, Aggregate

Abstract

An Experimental study was conducted on spray combustion using dual swirlers at different outlet angle; co-swirl and counter-swirl. To understand the characteristics of turbulent spray combustion of dual swirl flow(DSF), the axial helical annular vaned swirlers with various swirl ratios and combination of angle and direction were designed. and temperature measurements of a rapidly thermocouple insertion and measurements of soot volume fraction and microrstructure using thermophoretic sampling particle diagnostic(TSPD) as TEM were carried out. The NOx, CO₂, O₂, etc. was analyzed using emission gas analyzer. The results show that flame stability were maintained under very lean condition. for both co-swirl and counter-swirl case. And though Counter-swirl case kept the higher temperature region compared to co-swirl case, Counter-swirl combustion represented less NOx emission and soot formation than co-swirl case.

기호설명

DSF Dual Swirl Flow
S Swirl Number(Swirl Strength)
L_f Flame Height
d_p Primary particle diameter
f_v Soot Volume Fraction
TEM Transmission electron microscope

TSPD Thermophoretic sampling particle diagnostic

f The specific soot growth rate
w The specific soot oxidation rate

1. 서 론

최근 들어 날로 심각해지는 환경오염과 고유가에 의한 에너지 절약문제는 연소연구의 핵심으로 대두되고 있다. 특히, 이로 인한 고효율 저공해 연소기 개발은

* 인천대학교 기계공학과 대학원

** 인천대학교 기계공학과

매우 중요한 테마로서 활발히 진행 중에 있다. 그 중에서도 분무연소의 경우, 자동차용엔진, 산업용보일러, 가정용보일러, 항공기엔진 등과 같은 광범위한 적용범위로 인해 이 분야에서 질소산화물(NOx)과 매연(Soot)등의 유해성 배기가스를 줄이기 위한 많은 연구가 보고되고 있다.

연소기에서 고효율을 유지하고 유해성 배기가스를 줄이는 것은 서로 상충되는 문제로, 이 두 문제의 효율적인 trade-off 방안으로서 연료의 분무특성향상과 연료·공기의 혼합증대가 강조되고 있으며 이러한 혼합특성 증대 및 연소특성향상의 방안으로 스윙류(Swirl flow)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.(1,2) 통상 스윙류에 의한 재순환영역(Recirculation zone)의 생성은 분무의 미립화를 증진시키고 기연가스의 재순환과정을 형성시키며 이로 인해 화염의 형상과 안정성에 보다 긍정적인 영향을 미친다.(1,3) 이와 아울러 연료와 공기 및 기연가스의 혼합특성을 강화시켜 NOx, Soot, HC등의 배기가스를 감소시킨다고 알려져 있다.

이러한 스윙류의 효과를 극대화하기 위한 방안으로서 최근에 들어 2중의 스윙공기를 이용하는 2중스윙류(Dual Swirl Flow, DSF)에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 DSF에 의해 연료액적의 고른 분포와 연료·공기 혼합률 증대에 따른 공해물질의 저감을 보고하고 있으며(4) 특히, Takashi(5), Samuelsen(2,6)등은 DSF에 의한 혼합률 증대가 과농지역을 감소시키고 저NOx특성을 보이는 것을 실험을 통해 관찰하였고, 2중스윙의 방향성에 따른 액적의 분포와 혼합특성을 비교하였다. 그러나, 스윙을 발생시키는 방법과 두 스윙러의 스윙강도 및 방향성의 조합, 연료노즐의 분무특성과의

상호관계에 대해서는 보다 깊이 있는 연구가 요청되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 2중스윙류중에서도 기존의 크고 효율성이 떨어지는 반경방향 유입의 2중스윙류에 비해 효과적인 스윙과 정확한 DSF를 발생시키고 제작이 용이한 축류형 환형배인(Helical annular vaned swirler)방식의 2중 축류스윙류에 대해 High swirl과 Low swirl, Co-swirl 과 Counter -swirl이 각각 연소과정에 미치는 영향을 분석하기로 하였으며 이를 위해 온도, 가스분석, 매연샘플링등의 실험을 통해 화염특성을 분석하였다. 특히, 난류분무화염에 급속압입법에 의한 온도측정과 TEM(8)을 이용한 열영동(Thermophoresis)원리의 TSPD법(9)으로 매연(Soot)측정의 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치 및 실험조건

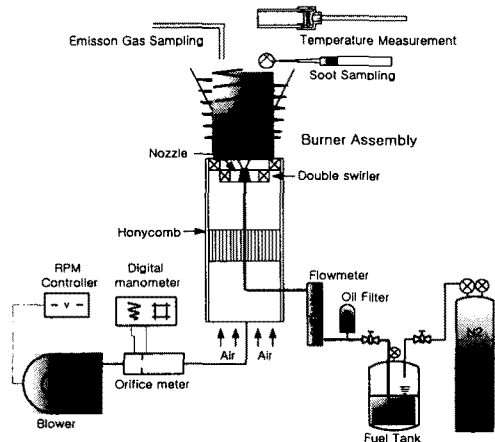


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 연구는 분무연소시스템이기 때문에 액체연료를 균일한 압력으로 공급하기

위하여 정압연료공급장치로서 질소가스를 이용하여 일정한 압력상태에서 일정체적의 유량을 공급하도록 하였으며 연료유량계는 Rotameter를 설치하였다. 공기공급은 최대 $10\text{Nm}^3/\text{min}$ 의 유량을 공급할 수 있는 송풍기(Blower)를 사용하였으며 회전속도(RPM)조절로 공기유량을 제어할 수 있도록 하였다. 또한 공기유량의 확인은 디지털차압계(Digital Differential Manometer)를 사용한 오리피스유량계(Orificemeter)를 사용하였다.

2.2. 노즐분부 특성 분석

분부연소로서 연료노즐은 Danfoss사의 0.5gal/h의 Oil Nozzle 세가지, 30° solid con, 60° hollow cone, 80° hollow cone을 예비선정하여 PMAS(Particle motion analysis system)을 이용한 분부특성을 파악하여 선정하도록 하였다. 연료는 등유(Kerosine)를 사용했으며 성상은 Table. 1과 같다. 실험에서 사용된 연료 공급압은 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 $28.3\text{cc}/\text{min}$ 를 공급하였다.

Table. 1 Fuel property

| Kerosine | |
|-------------------------------|------------------------------|
| 분자식 | $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ |
| 분자량 [kg/kmol] | 167.315 |
| 밀도 [kg/m^3] | 0.83 |
| 발열량 [kcal/kg] | 10,855 |
| 이론공연비 [kg/kg] | 14.63 |

2.3 스윌러의 설계 및 스윌특성

반경방향 유입의 2중스윌러 보다 효율적인 2중 축류스윌러를 Fig.2 에서와 같이 설계·제작하여 실험하였다. 두 스윌러는 방향성의 조합에 따라 Co-swirl과 Counter-swirl로 구분되고 각 스윌러의 사양은 Table.2와 같다.

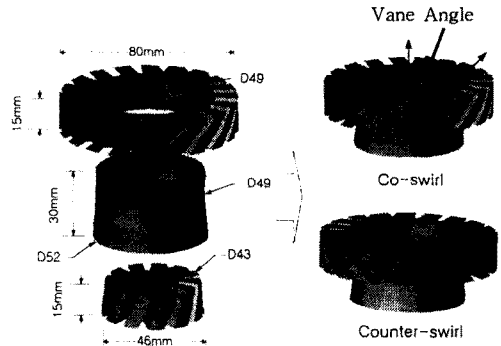


Fig. 2 The Dual Swirler Assembly

Table.2 Characteristic of each swirler

| | | Vane Anlge | | |
|-------------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|
| | | 20° | 45° | 60° |
| Primary Swirler | 유로갯수 | 14 | 12 | 9 |
| | 유로단면적 | 420mm^2 | 360mm^2 | 270mm^2 |
| | Swirl # | 0.29 | 0.46 | 1.36 |
| Secondary Swirler | 유로갯수 | 20 | 20 | 13 |
| | 유로단면적 | 1000mm^2 | 1000mm^2 | 650mm^2 |
| | Swirl # | 0.32 | 0.51 | 1.53 |

그리고 각 조합에 따른 Primary swirler와 Secondary swirler의 출구 속도비는 Fig.3과 같이 나타나기 때문에 두 스윌러의 유량비는 면적에 비례하게 된다.

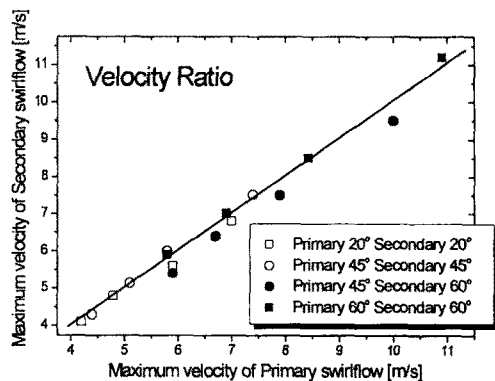


Fig. 3 Velocity ratio of Primary swirler and Secondary swirler

또한, 스윌강도 및 방향성에 대한 다양한 스윌조합에 따라 그 기호를

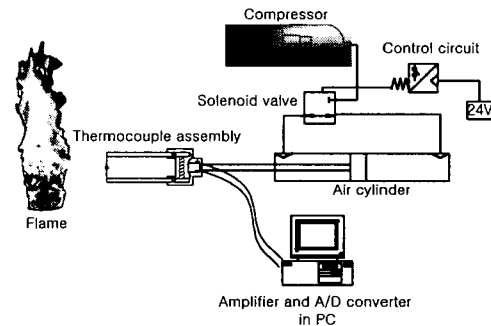
Table.3과 같이 명명하였다.

Table. 3 Definition of DSF

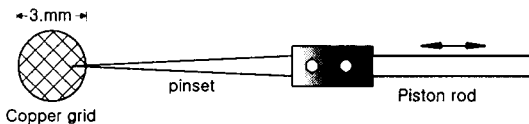
| Formation | DSF | | 기 호 |
|---------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| | Primary Swirler Angle | Secondary Swirler Angle | |
| Co-swirl | 45° | 60° | $45 S_{60}^{+}$ |
| Counter-swirl | 45° | 60° | $45 S_{60}^{-}$ |

2.5 급속삽입법에 의한 온도측정 및 TSPD(Thermophoretic Sampling Particle Diagnostic)법에 의한 Soot측정

온도를 측정하기 위하여 매연(soot)이 발생하는 화염에 열전대를 삽입시켰을 때 매연입자가 열전대의 접점(thermocouple junction)에 묻게 되면 흑체복사(Black body radiation)에 의한 복사율



(a) Schematic diagram of rapid insertion



(b) Soot sampling probe

Fig.4 Experimental apparatus by rapid inserted method for temperature measurement and soot sampling (emissivity)과 접점의 직경 증가에 의해

열손실이 발생하게 되고 그 손실로 인하여 측정오차가 발생하게 된다.

따라서, 이러한 오차를 최소화하기 위하여 화염안의 측정위치에 매연입자가 묻지 않은 깨끗한 열전대를 매우 빠르게 삽입·후퇴시켜 가능한 한 빠르게 접점의 온도를 측정하는 급속삽입법을 사용하여 온도를 측정하였다. 급속삽입법을 위한 실험장치 개략도는 Fig.4와 같다. 그리고 열영동원리를 이용하여 Carbon grid 에 묻는 매연입자의 질량유속을 구하고 TEM촬영에 의한 매연의 미세구조를 파악할 수 있는 TSPD(Thermophoretic Sampling Particle Diagnostic)을 구현하기 위하여 Fig.4(b)와 같이 공압실린더의 로드 에 핀셋을 이용하여 Carbon grid를 고정하고 솔레노이드밸브를 이용하여 샘플링시간을 제어하였다.

열전대는 Pt-Pt/13%Rh R-type으로 세선의 직경은 70 μ m, 접점의 직경은 240 μ m를 사용하였다(10). 세선은 직경3mm세라믹 튜브로 피복하고 공압실린더의 충격에 견딜 수 있도록 직경 4mm의 스테인레스 스틸 튜브로 보호하였다. 또한, 세선의 간격은 37mm로 하고 열팽창을 고려해 보상커넥터쪽에 스프링을 장착하였다. 공압실린더의 행정길이는 화염폭을 고려하여 100mm로 선정하였다. Fig.5는 화염안의 국부지역에서 급속삽입법으로 600ms 동안 측정한 온도함수이다. 화염안의 측정위치에 도달한 후 열평형에 의해 최고점에 이르고 soot에 의한 열손실이 발생하기 전까지 약 150~200ms의 일정 온도를 유지한다. 열전대의 후퇴와 함께 온도함수는 하강하는데 일시적인 피크값은 화염면을 통과하면서 발생된다. 또한, 접점에서 발생하는 흑체복사에 의한 손실을 보상해 주었는데 기체온도 1500K에서 약 7K의 손실이 발생한다.

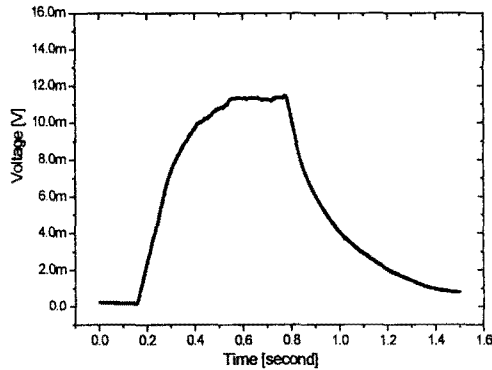


Fig.5 Temperature history of rapid inserted method

TSPD법은 열영동원리를 이용하여 평면의 Carbon grid에 묻는 질량유속을 이용하여 Soot의 체적분율(f_v)을 구하는 방법으로 TEM에 의한 Soot의 미세구조의 정보도 얻을 수 있다.

2.6 NOx 및 배기가스 측정

각 스월러의 조합에 따른 국부적인 위치, 즉 온도측정과 동일한 위치에서 샘플링하였으며 분해능 0.01ppm의 California instrument Co.의 Medel 300 seris 분석기를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 노즐의 분무특성 결과

PMAS장치를 사용하여 위치에 따른 노즐의 분무특성을 분석하여 세가지 분사노즐에 대한 평가를 하였으며 이에 따른 거시적촬영 및 미시적촬영에 의한 측정결과는 Fig.6~8에 나타나 있다.

Fig.7에서 보는바와 같이 60° Hollow 분무노즐은 상류에서 반경방향 16mm 부근의 액적의 크기가 20~25 μ m로 다른

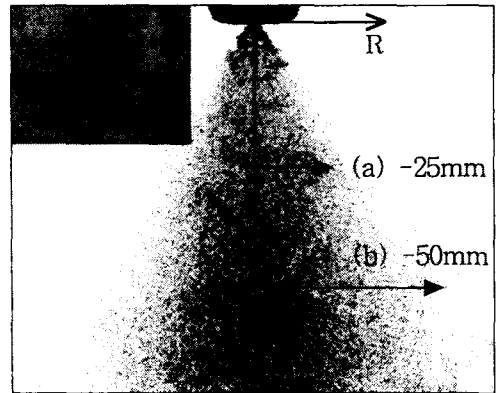
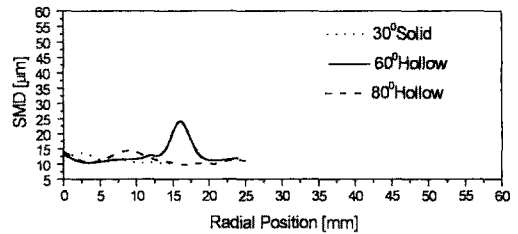
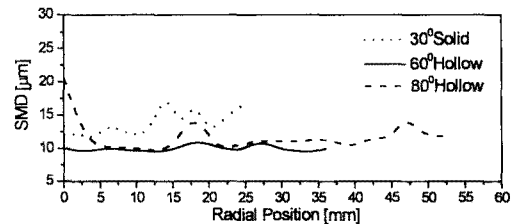


Fig.6 photograph of 60° hollow cone spray



(a) Axial location -25mm



(b) Axial location -50mm

Fig.7 SMD distributions at radial position of each nozzles

지역에 비해 두배이상 크을 알 수 있는데 이것은 Hollow cone의 분무형태를 잘 보여주고 있다. 특히, 하류에서 10 μ m로 매우 작은 액적들의 균일한 분포를 보이고 있으며 하류지역에서의 SMD를 나타내는 Fig.8의 Histogram 통해서도 다른 노즐에 비해 매우 우수한 특성을 보이기 때문에 60° Hollow cone 노즐을 최종 선

정하여 스윙류에 의한 연소특성연구에 기본 분무노즐로 적용하기로 하였다.

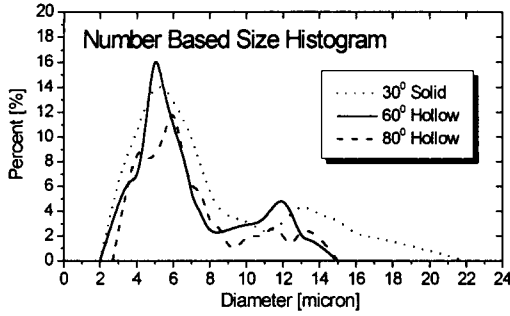


Fig.8 Number Based size Histogram at R=12mm, Z= -50mm for 3 case

3.2 형상학적 관찰과 화염모드변화

우선적으로 가시적 관찰로서 화염의 높이(Hight) 및 두께(Thickness), 재순환영역의 존재 유무, 그리고 화염의 안정성에 대해 관찰하였다. Fig.9는 화염길이와 폭의 비에 따른 영향을 나타낸 것으로 Primary 60°, Secondary 60° 인 경우는 공연비 17부근에서 급격한 변화가 시작되고 Primary 20°, Secondary 20° 인 경우는 공연비 25부근에서 변화가 시작되는데 이것은 연소모드의 변화로 정의될 수 있다. 특히, S_{45} 의 경우, 다른 조합들과 달리 공연비 30이후에서야 급격히 변화가 시작된다.

이와 같은 변화를 나타내기 위한 순간 및 평균촬영의 가시적인 관찰에서, 연소모드가 스윙류의 조합과 방향성에 따른 공기량 증가에 따라 변화하는 것을 Fig.11에서 보여주고 있다. 여기에서, 정상연소모드에서 2중의 화염이 동시에 존재하는 2중화염연소모드로, 그리고 최소한의 화염면 면적을 가지는 스윙컵연소모드로 변화함을 관찰할 수 있었고 그 변화시기 또한 공연비 및 유동조건에 따라 차이를 확인할 수 있었다. 그리고 관

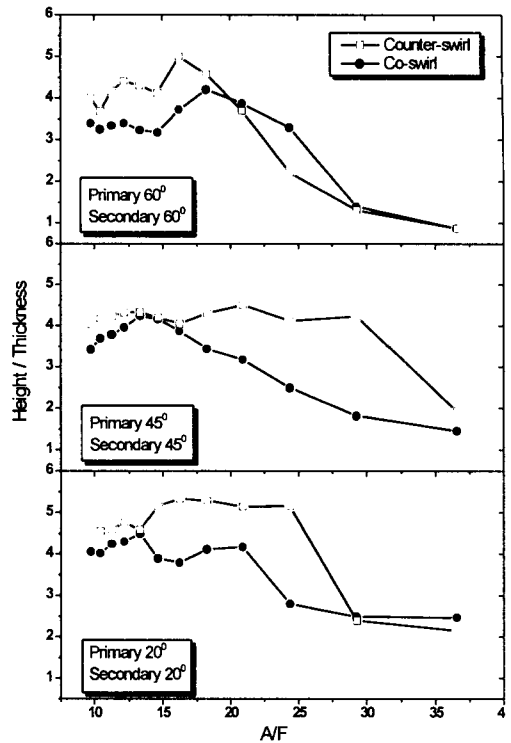
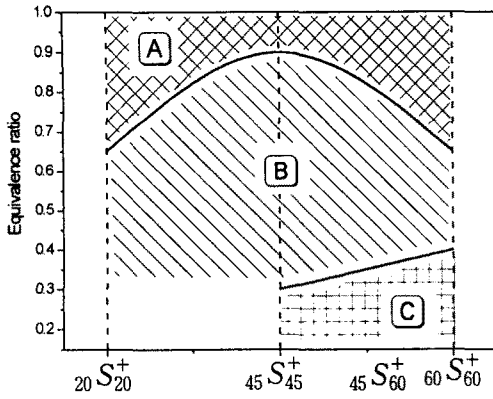


Fig.9 Plot of ratio of flame height and thickness

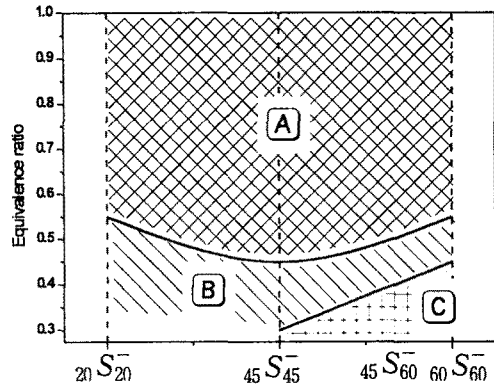
찰된 화염모두 당량비 0.3이하에서도 높은 안정성을 보였다.

스윙비와 공연비에 따른 연소모드를 나타내는 Fig.10을 살펴보면 Co-swirl의 경우가 Counter-swirl에 비해 2중화염 연소모드 지역이 넓게 분포함을 확인할 수 있었는데 이것은 유동장의 평균속도 외에 Co-swirl과 Counter-swirl의 방향성에 의한 다른 특성, 유동특성에 기인된다는 것을 알 수 있다.

특히, Co-swirl에 의한 화염에서는 중앙에서의 회전유동장의 회전력증가로 인해 중앙부위에 별개의 화염이 형성되어 2중화염이 생성되는데 Fig.12는 2중화염의 사진과 그 화염구조에 대한 개략도를 보여준다. 여기서 Co-swirl이 반경방향의 확산을 더 강화시켜 화염폭이 더 크



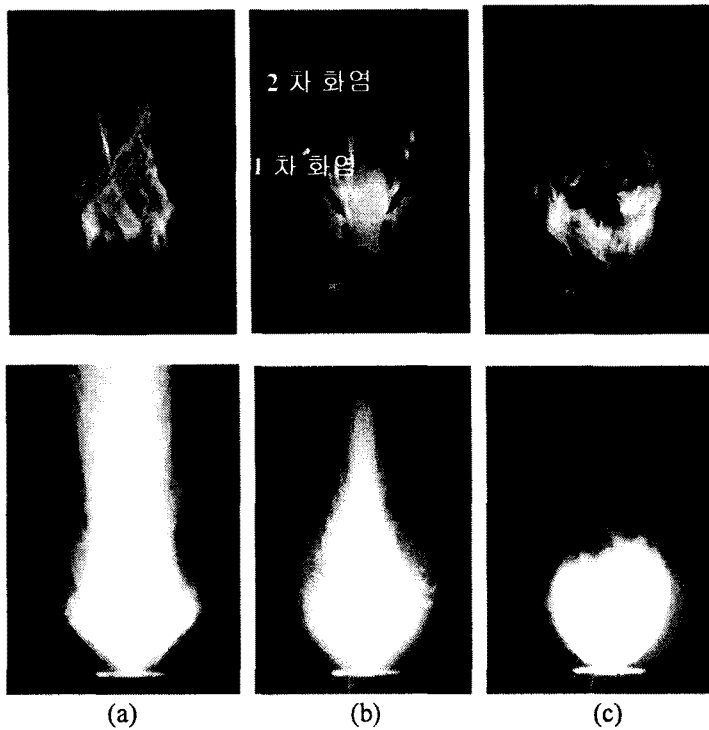
(a) Co-swirl



(b) Counter-swirl

Ⓐ : 정상연소모드 지역 , Ⓑ : 2중화염 연소모드 지역, Ⓒ : 스윙컵 연소모드 지역

Fig.10 Range of combustion mode change of each flame



(a)

(b)

(c)

(a) $\phi=1.0$ 정상연소모드

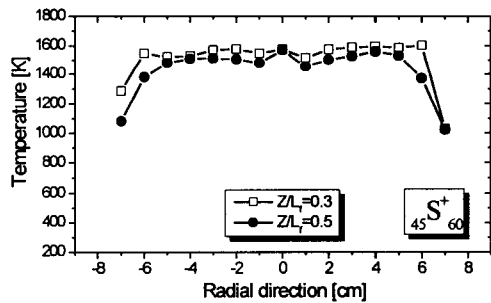
(b) $\phi=0.6$ 2중화염연소모드

(c) $\phi=0.3$ 스윙컵연소모드

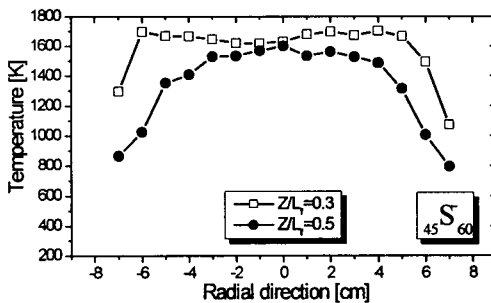
Fig.11 Instantaneous and time-averaged Photographs of combustion mode change on $45 S_{45}^+$

며 중앙의 2중화염이 생성되어 재순환영역의 폭이 감소됨을 관측할 수 있다. 재순환영역의 크기는 화염의 연소특성을 결정지을 수 있는 인자로서 매우 중요하다.

따라서, 이러한 다양한 스월조합과 방향성에 따른 형상학적인 관찰을 통해서, 일반 보일러의 원통형 열교환기에 보다 적당한 화염크기와 공연비를 고려하여, 2중화염 연소모드의 범위에 존재하는 Primary 45°, Secondary 60° 조합의 당량비 0.5 조건을 선정하였다. 또 이 조건은 3가지 연소모드가 공연비에 따라 동시에 존재하여 보다 깊이 있는 연구가 요구되는 영역이다. 이 조건하에서 Counter-swirl과 Co-swirl에 따른 온도 및 배기가스등을 분석하여 두 화염의 연소특성을 분석하였다.



(a) Co-swirl flames



(b) Counter-swirl flames

Fig. 12 Radial temperature profiles at different axial location

3.3 급속삽입법에 의한 온도측정과 NOx 및 배기가스 분석결과

Fig.12와 Fig.13의 축방향과 반경방향을 따라 측정된 온도분포를 살펴보면 Co-swirl이 반경방향으로 보다 넓게 분포되고 있는데 이는 앞서 언급하였듯이 반경방향에 대한 확산이 Counter-swirl에 비해 커서 온도분포도 반경방향으로 더 넓게 분포함을 확인할 수 있다. 그리고 Fig.13과 Fig.14,15의 NOx분포는 Counter

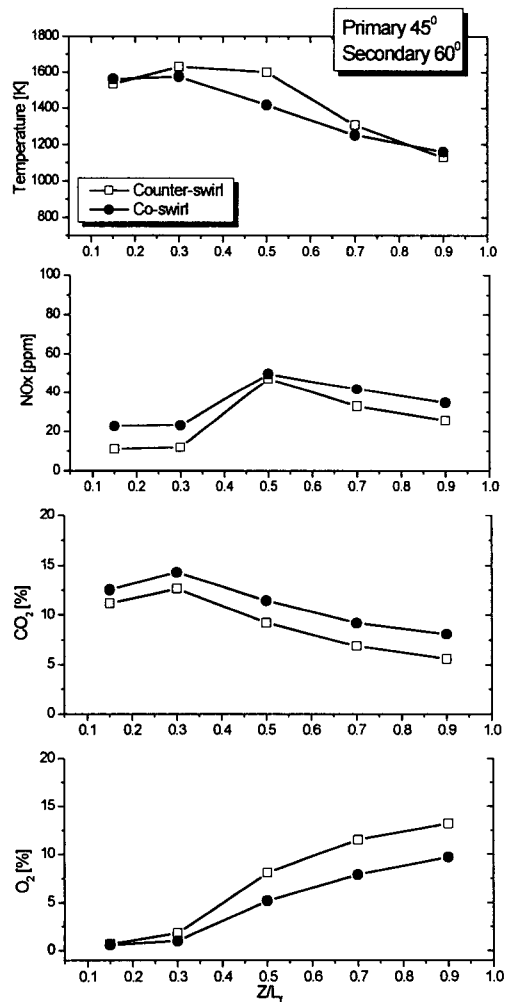


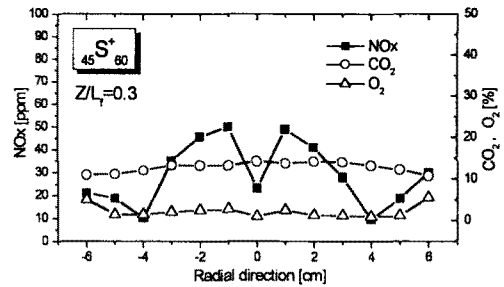
Fig. 13 Temperature and gas analysis of $45^\circ S_{60}^+$ and $45^\circ S_{60}^-$ at different axial location

-swirl이 더 낮은 배출특성을 보이고 있다. 통상 NOx의 배출은 Thermal NO의 지배적인 영향으로 온도상승에 따라 즉, 국부적인 고온지역일수록 많이 배출되지만, 본 연구의 2중스윙류에 의한 난류분무화염의 경우 2중스윙에 의한 재순환영역의 생성과 그 영역에서의 혼합특성의 증대, 강한 스윙유동에 의한 회석효과로, 높은 온도분포의 Counter-swirl이 더 낮은 NOx배출 특성을 보이고 있다. 이것은 Counter-swirl이 Co-swirl에 비해 재순환영역에서의 연료와 공기의 혼합특성강화로 높은 온도분포를 나타내지만 그와 함께 연소가스의 재순환에 의한 회석효과의 극대화로 Fig.15 (a)와 같이 더 낮은 NOx배출 특성을 나타내는 것으로 생각된다. 즉, 이것은 Fig.12의 온도분포와 Fig.14,15의 NOx 분포에서 확인할 수 있듯이 DSF에 의한 화염의 NOx배출은 온도의 영향보다 재순환영역에서의 배기가스의 회석효과가 더 지배적인 것으로 생각된다. 또한, CO₂, O₂의 배출도 3%정도의 차이를 보이지만, 두 화염 모두 스윙류에 의한 연소효율 증가로 CO₂배출이 10~13%범위에 들며 액체연료 연소모드에 있어서 고효율성을 나타내고 있다.

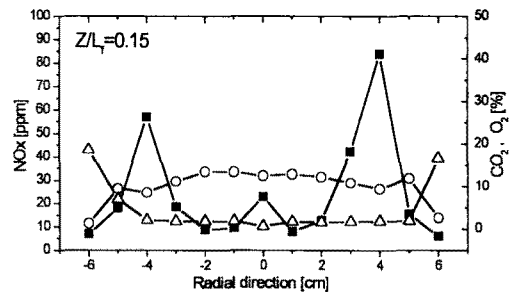
특히, Fig.14,15에서의 NOx분포는 앞에서 언급한 화염의 형상에 따른 분포로서 (a)는 화염상단 부분으로 Co-swirl의 경우가 중앙의 2중화염에 의해 중앙부위에 높은 분포를 보이고 있으며 (b)는 외곽의 재순환영역의 다소 높은 분포를 나타내고 있다.

3.4 TSPD법에 의한 Soot 측정

체적분율(Soot volume fraction)과 Morphology를 구하기 위한 샘플링은 Z/R의 절대위치에서 측정되었고 TEM촬영에 의한 이미지는 디지털변환에 의해

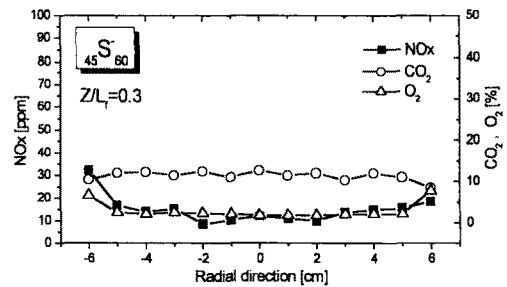


(a) $Z/L_f = 0.3$

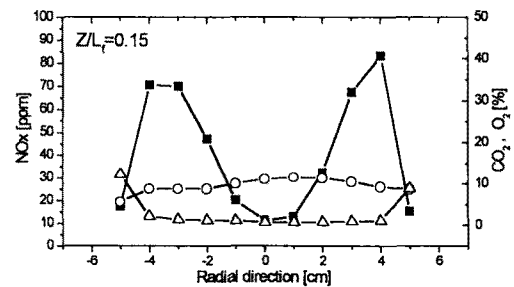


(b) $Z/L_f = 0.15$

Fig.14 Emission gas analysis in Co-swirl burner of primary 45°, secondary 60°



(a) $Z/L_f = 0.3$



(b) $Z/L_f = 0.15$

Fig.15 Emission gas analysis in Counter-swirl burner of primary 45°, secondary 60°

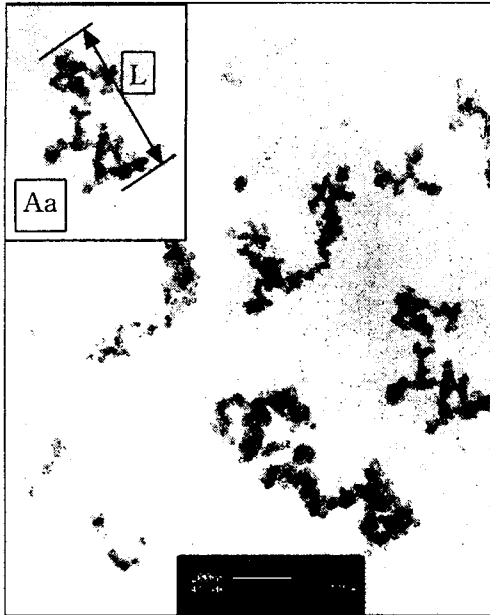


Fig.16 TEM micrograph of soot

Soot의 정보를 분석하였다. Fig.16은 TEM으로 측정된 이미지로 41,000배율로 촬영하였다. Fig.17의 각 위치에서의 Soot에 대한 정보는 두 화염의 Soot생성·산화과정과 체적분율, 그리고 3차원적인 분포를 알 수 있는 데이터이다. Fig.17의 체적분율은 높은 온도분포를 보이는 Counter-swirl의 경우가 Co-swirl보다 적게 분포되는 데 이것은 높은 온도에도 불구하고 DSF에 의한 2차적인 산화제 추가와 그에 따른 희석작용에 의한 연료농도의 감소 때문으로 판단된다. 두 경우 모두 Z/R=3까지는 soot의 생성·성장하고 그 이후부터는 산화되는 그 시점은 동일하지만 Table. 4에서와 같이 Counter-swirl의 경우가 낮은 생성률을 보이고 하류에서는 산화률이 높다. 또한, 체적분율의 경향은 Fig.17에서와 같이 군집의 직경(Equivalent aggregate area diameter, $d_{eq,a}$)의 경향과 달리 기본입자크기(Primary particle, d_p)분포와 매우 유사한데 이것

은 입자와 군집으로 구성된 Soot의 성장·산화과정에 따른 두 화염의 체적분율의 차이가, $d_{eq,a}$ 크기가 증가하는 표면성장률보다는 d_p 의 크기에 의한 차이로 설명될 수 있다. 그리고 N_p (단위체적당 입자의 수)와 S_T (단위체적당 표면적), D_f (프랙탈 차원)등으로 매연입자의 3차원적인 분포를 예측할 수 있는데, Counter-swirl의 경우가 화염하류에서 적은 체적당 입자수와 넓은 단위체적당 면적으로 Co-swirl보다 큰 군집의 분포를 보여주고 있다. 또한, 이것은 군집의 크기인 $d_{eq,a}$ 의 분포와 일치한다. 그리고, Table.5의 n_{av} (군집당 입자수)와 n_g (군집을 원으로 가정하고 구한 군집당입자

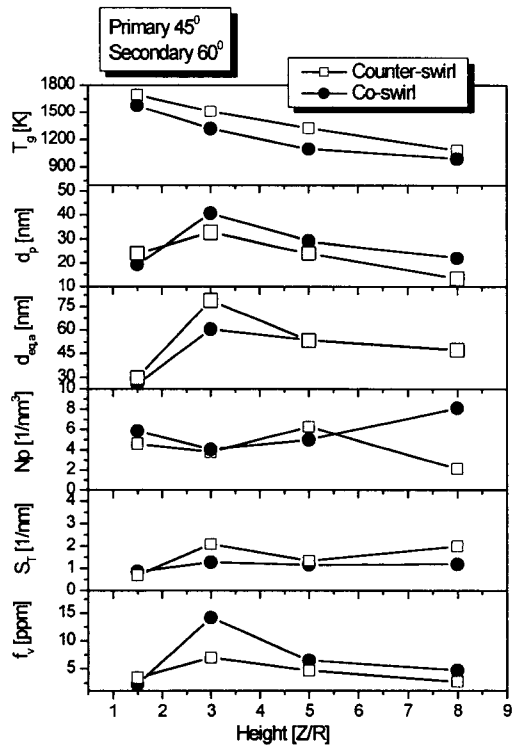


Fig.17 Temperature and emission characteristic of soot particle

Table.4 Specific soot growth and oxidation rates for soot sampled from the combustor centerline

| Co-swirl | Z/R | $f=\omega$ [kg/m ³ s] |
|---------------|-------|----------------------------------|
| $45 S_{60}^+$ | 1.5~3 | $f=3.9674E-2$ |
| | 3~5 | $\omega =1.5959E-2$ |
| | 5~8 | $\omega =6.4728E-3$ |
| Counter-swirl | Z/R | $f=\omega$ [kg/m ³ s] |
| $45 S_{60}^-$ | 1.5~3 | $f=1.5847E-2$ |
| | 3~5 | $\omega =1.1955E-2$ |
| | 5~8 | $\omega =1.0053E-2$ |

수)은 앞에서 확인한 바와 같이 Counter-swirl의 soot 분포가 Co-swirl에 비해 작고 많은 soot입자를 가진 큰 군집들로 이루어져있다는 입체적 분포를 설명해 주고 있고 D_f 은 위치에 따라 차이를 보여주고 있다.

Table.5 Soot aggregate parameters as a function of non-dimensional flame height

| | 측정 위치 (Z/R) | d_p [nm] | $d_{eq,a}$ [nm] | n_{av} | n_g | D_f |
|---------------|-------------|------------|-----------------|----------|-------|-------|
| $45 S_{60}^+$ | 1.5 | 19.28 | 25.52 | 4.47 | 2.12 | 1.78 |
| | 3 | 40.61 | 60.36 | 8.34 | 2.73 | 2.06 |
| | 5 | 29.17 | 53.60 | 9.36 | 4.33 | 1.64 |
| | 8 | 22.21 | 47.35 | 11.78 | 5.99 | 1.99 |
| $45 S_{60}^-$ | 1.5 | 24.23 | 29.65 | 12.94 | 1.79 | 1.67 |
| | 3 | 32.75 | 78.91 | 18.89 | 7.82 | 1.56 |
| | 5 | 24.18 | 53.34 | 13.92 | 6.45 | 2.04 |
| | 8 | 13.37 | 47.19 | 103.6 | 17.98 | 1.68 |

4. 결론

1) Co-swirl과 Counter-swirl에 따라 연소 모드의 변화시기가 다르고 특히, Co-swirl의 경우가 더 넓은 공연비영역에서 2중스웰연소모드를 유지하며, DSF에 의해 모든 화염이 당량비 0.3이하에서도 안정성을 유지한다. 그리고, 모든 화염은 DSF에 의한 희석효과로 1800K이하의 온도분포를 보이고 Counter-swirl의 경우가 더 높은 온도분포특성을 갖는다.

2) Counter-swirl이 더 높은 온도분포에도 불구하고 재순환영역에서의 더 강한 혼합물과 배기가스의 희석률로 인해 약 10ppm의 NOx배출량을 보인다. 결과적으로 전체적인 NOx배출의 감소는 DSF의 희석효과에 의한 온도감소로 Thermal NOx가 감소하기 때문이고 각 화염마다의 배출특성차이는 혼합물과 배기가스의 희석률의 차이로 결정된다.

3) Counter-swirl이 산화제의 2차적인 공급과 그에 따른 희석효과의 강화로 연료 농도가 감소하여 더 낮은 Soot를 배출한다. 또한 TEM을 이용하여 Soot 입자 (particle)와 군집(aggregate)의 정보인 d_p 와 $d_{eq,a}$, N_p , S_T 등의 입체적 정보를 획득하여 Soot의 생성·성장의 차이가 입자의 표면성장률보다는 기본입자의 크기에 비례함을 확인할 수 있었고 Soot 입자의 공간적인 분포를 확인하였다.

참고문헌

- (1) A. K. Gupta, D. G. Lilley, N.Syred, "Swirl Flows", Abacus Press, 1984
- (2) H. Y. WANG, V. G. MCDONELL and G. S. SAMUELSEN, "The Two-Phase Flow Downstream of a Production Engine Combustor Swirl

- Cup", Twenty-fourth Symposium on Combustion, 1992, pp. 1457-1464
- (3) A. H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Hemisphere Publishing Co., 1983
- (4) 박중훈, 황상순, 윤영빈, 정인석, "2중 스왈러가 있는 가스터빈 엔진의 연료 분무특성에 관한 수치 해석", 한국항공우주공학회지 제27권 제6호, 1999
- (5) Takashi, Terasaki and Shigeru, Hayashi, "The Effects of Fuel-Air Mixing on NO_x Formation in Non-Premixed Swirl Burner"
- (6) A. ATESHKADI, V. G. MCDONELL and G. S. SAMUELSEN, " Effect of Hardware Geometry on Gas and Drop Behavior in A Radial Mixer Spray", Twenty-Seventh Symposium on Combustion, 1998, pp. 1985-1992
- (7) Ian M. Kennedy, "Models of Soot Formation and Oxidation", Prog. Energy Combsut. Sci. Vol.23, pp95-132, 1997
- (8) T. C. Fang, C. M. Megaridis, W. A. Sowa and G. S. Samuelsen, "Soot Morphology in a Liquid-Fueled, Swirl-Stabilized Combustor", Combustion and Flame 112:312-328, 1998
- (9) Ü. Ö. Köylü*. C. S. Mcenally, D. E. Rosner, and L. D. Pferrerle, "Simultaneous Measurements of Soot Volume Fraction and Particle Size / Microstructure in Flames Using a Thermophoretic Sampling Technique", Combustion and Flame 110:494-507, 1997
- (10) Charles S. Mcenally, Ü. Ö. Köylü,

Lisa D. Pfefferle, and Daniel E. Rosner, "Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples", Combustion and Flame 109: 701-720, 1997