

축열식 저 NO_x 연소기의 배기가스 내부 재순환 유동에 대한 연구

김종규*, 강민욱**, 윤영빈***

A Study on the Self Flue Gas Recirculating Flow of the Regenerative Low NO_x Burner

Jonggyu Kim, Minwook Kang and Youngbin Yoon

Key Words: Regenerative low NO_x burner, Self flue gas recirculation, Two color PIV, Acetone PLIF

Abstract

Self flue gas recirculation flow is an effective method for low NO_x emission in the regenerative low NO_x burner. The object of this study is to analyze the self flue gas recirculating flow by varying jet velocity of the combustion air. Fuel and air flow rates are fixed and combustion air jet nozzle diameters are 13, 6.5 and 5mm. The stoichiometric line is obtained from the concentration of the fuel using an acetone PLIF technique. It is found that the self flue gas recirculating flow is entrained into that line using a two color PIV technique. As the jet velocity of combustion air is increased, the flue gas entrainment rate into the stoichiometric line is increased. This result suggests that NO_x emission can be reduced due to the effects of flue gas which is lowering the flame temperatures.

1. 서론

공업용 연소로 중 축열식 연소 시스템은 공업용로에서 매우 큰 에너지 절약이 가능한 시스템으로 알려져 있다. 기존의 축열식 연소 시스템(twin burner system)은 연소기 2대가 1조를 이루어 한 대의 연소기에서 연소가 이루어지면 그 배기가스가

다른 연소기를 통해 밖으로 배출되며 이때 연소기에 내장된 축열체에 열을 저장한다. 얼마 후 이 시스템은 역으로 작동하게 된다. 즉 배기가스가 배출되었던 연소기로 연소용공기가 통과하며 연소를 일으키고 다른 연소기의 축열체에 열을 저장한 후 밖으로 배출된다. 축열체를 연소용

* 서울대 기계항공공학부 대학원

** 서울대 기계항공공학부 대학원

*** 서울대 기계항공공학부

공기가 통과하면서 열교환을 통해 예열공기가 되는 것으로 축열식 연소 시스템이 큰 에너지 절약을 꾀할 수 있는 점이 바로 이 때문이다.^{[1][2]} 최근에는 버너 1대로 축열 연소가 가능한 self regenerative burner system이 개발, 적용되고 있다. 즉 한 대의 연소기 헤드에 여러 노즐을 위치하고 연소 배기가스 배출구 및 공기 분출구로 교대로 사용하는 시스템이다. 기존의 축열식 연소 시스템(twin burner system)에 비해 설비면에서나 가격면에서 큰 이점이 있다.^{[3][4]}

에너지 절약에 큰 효과가 있는 축열식 연소 시스템의 최대 단점은 바로 NOx이다. 즉 예열공기에 대한 에너지 절약은 로 내온도가 높고 예열공기온도가 높을수록 큰 효과를 거둘 수 있지만 이런 조건에서는 NOx의 배출량이 상당하다. 특히 연료 속에 N성분이 포함되지 않은 청정연료에서는 NOx의 대부분이 열적 NOx이므로 이를 억제하기 위해서는 최대화염온도를 될 수 있는 한 낮게 형성하여야 한다. 낮은 최대화염온도를 구현하기 위해 연료와 공기를 로내로 고속으로 분사해서 로내 배기가스의 재순환을 최대한 유도하는 연소 방식이 유리하다.^{[5][6][7][8][9][10]}

본 연구는 축열식 연소기에서의 배기가스 재순환 유동특성을 연소용공기 분사 노즐의 직경에 따라 즉, 분사속도에 따라 알아보았다. 아세톤 PLIF 기법을 이용하여 연료의 분포상태로부터 화염면의 위치를 구하고 Two color PIV 기법을 이용하여 이 화염면으로의 배기가스 유입 특성을 알아보았다. 비화학 반응 유동이며 안전상 연료는 공기로 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

2.2.1 Self regenerative low NOx burner

Fig.1은 축열식 저 NOx 연소기이다. 연소기 헤드 정면에 연료노즐과 동축공기노즐, 그리고 6개의 연소용공기 분출노즐(배가스 흡입노즐)이 있다. 또한 측면에도 정면의 노즐과 같은 직경의 노즐이 6개가 있다.

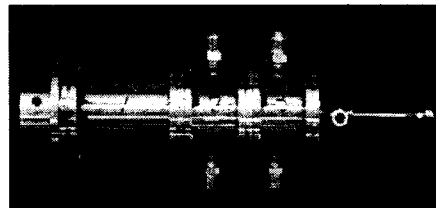


Fig.1 Self regenerative low NOx burner

연소기의 작동원리는 Fig.2에 나타내었다. 중앙으로 연료와 동축공기가 들어가며 4개의 솔레노이드 밸브가 부착되어 있어서 연소용공기가 하나의 밸브를 통해 흡입이 되면 반대편 밸브는 닫혀진다. 내부에 연소기 헤드까지 3개의 파이프가 연결되어있으며, 이 3개의 파이프를 통해 연소용공기가 통과되어 3개의 노즐을 통해 로내로 주입된다. 나머지 3개의 노즐을 통해 배기가스가 배출되며 3개의 파이프는 그 앞의 솔레노이드 밸브에 연결되어 두 개의 솔레노이드 밸브중 하나가 열려져 외부로 배출된다. 측면의 노즐로는 Fig.2에 나타낸 것처럼 유동이 생기며 이는 배기가스 내부 재순환 효과를 극대화하기 위

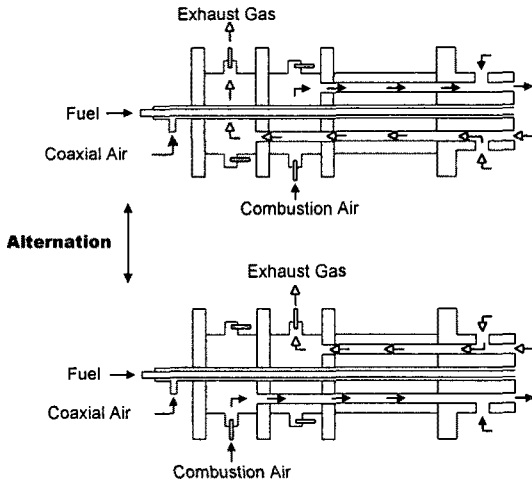


Fig.2 Basic concept of the self regenerative burner

한 즉, 재순환 유도형 노즐이다. 솔레노이드 밸브의 작동은 제어장치(Control box)를 제작해서 2개가 1조(Fig.3의 AA'-BB')를 이루어 작동하게 하여 절환을 이룰 수 있게 하였다.

Fig.3은 전체 실험장치 개략도를 나타낸다. Test section은 400×800×400 (mm)의 크기를 가지며 레이저가 통과되는 측면부분과 영상획득을 위한 전면부분은 유리창을 장착할 수 있게 제작하였고, 입자 주입기(particle seeder)는 PIV 실험을 위해 장착하였으며 아세톤 PLIF 실험시에는 입

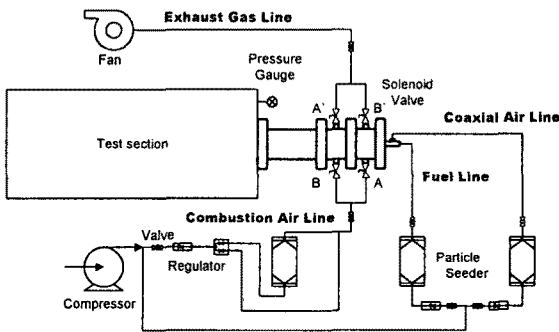


Fig.3 Schematic of the Experimental Facility

자 주입기를 제거하고 연료라인에 아세톤 주입기를 장착하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 Two color PIV 시스템

Fig.4는 Two color PIV 시스템을 나타낸다. 시스템을 크게 세 부분으로 분류하면 광원부와 계측부 그리고 제어부로 나뉜다. 광원부는 2대의 Nd:Yag 레이저(Spectra Physics GCR-170, Continuum PL-9050)와 1대의 Dye 레이저(Spectra Physics PDL-3), 광학기구들로 구성되어 있으며 계측부는 digital CCD camera(KODAK DCS460, 3060 × 2036 pixel)와 저장장치로 그리고 제어부는 레이저들과 camera를 동기화 시키기 위한 장치인 delay generator(Stanford Research System, DG535), camera triggering circuit들, 솔레노이드 밸브 제어를 위한 장치(control box)로 구성되어 있다.

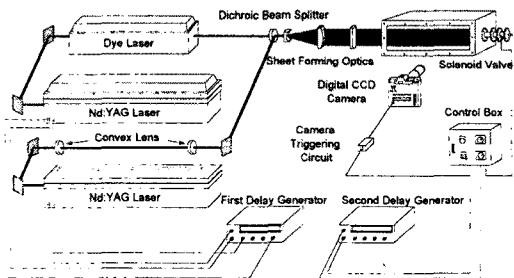


Fig.4 Two color PIV system

2.2.2 아세톤 PLIF 시스템

공기와 연료가 혼합되는 양을 알기 위해서는 아세톤 증기와 같은 적절한 지표 유체를 planar laser induced fluorescence (PLIF)를 이용하여 가시화 한다. 본 연구에서는 정성적인 혼합을 관찰하기 위해서 아세톤 PLIF를 이용하였다. 실험장치는 Fig.5에 나타내었다. Nd-Yag laser (Spectra

physics)에 4th harmonic generator를 설치하여 532, 266nm의 빔을 얻을 수 있도록 하였고, pellen broca prism을 이용하여 532nm 빔과 266nm 빔을 분리하여 266nm 빔만을 sheet beam optics를 통해 평면광으로 만든 후 실험장치에 조사하였다. 연료라인을 통해 주입된 아세톤으로부터의 산란 신호(LIF signal)를 ICCD camera(4 Quick 05, Stanford Computer Optics, 512× 487)에서 포착하게 된다. ICCD camera에서 포착된 신호가 frame grabber를 거쳐 초당 10장의 이미지로 저장된다. 이미지 처리는 아세톤이 주입된 이미지에서 주입되지 않은 이미지를 즉, background 이미지를 제거하여 아세톤 신호만을 얻었다.

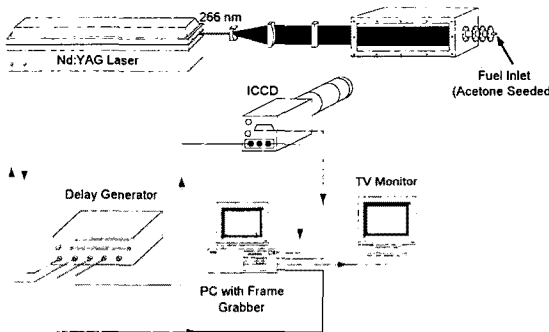


Fig.5 Acetone PLIF system

2.2.3 실험조건

연료유량과 공기유량을 일정하게 하고 연소용 공기 분사속도를 다르게 하기 위하여 분사 노즐 직경 d_a 를 변화시켰다. 연료 분사노즐직경 d_f 와 동축공기 분사노즐 직경 d_c 는 일정하게 하였다.

Table.1 에 실험조건을 나타냈다. 비화학 반응 유동이며 연료는 안전성을 고려하여 공기로 사용하였다. 연료 대 공기 유량비는 1 : 11 로 했으며, 동축공기량 대 연소용공기량은 3:7로 하였다. 연소용공기 분사노즐의 직경을 달리 했을 경우 속도는

$d_a = 13\text{mm}$ 일 경우 약 15m/s, 6.5 mm는 61 m/s, 5 mm는 103m/s의 속도로 분사된다.

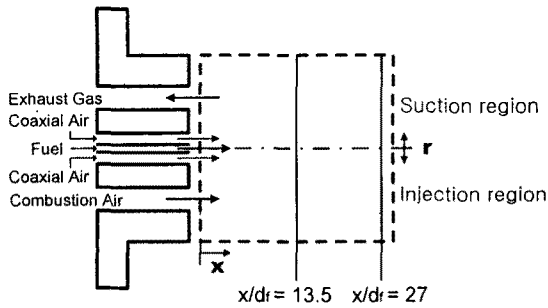
Table.1 Experimental Conditions

Mass flow rate & Variables	Conditions
Fuel	0.79 ℓ /sec
Coaxial air	2.6 ℓ /sec
Combustion air	6.07 ℓ /sec
Nozzle diameter of Combustion air (d_a)	Case I $d_a = 13\text{mm}$ Case II $d_a = 6.5\text{mm}$ Case III $d_a = 5\text{mm}$

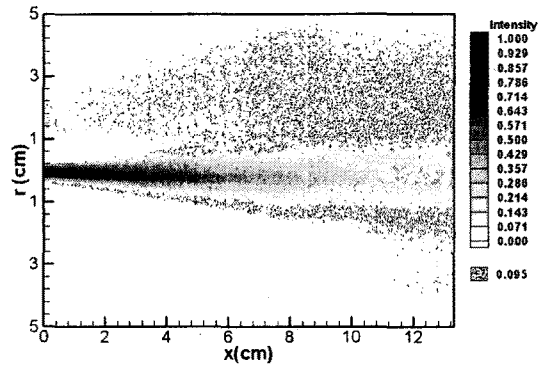
3. 결과 및 검토

3.1 연료 분포(아세톤 PLIF 결과)

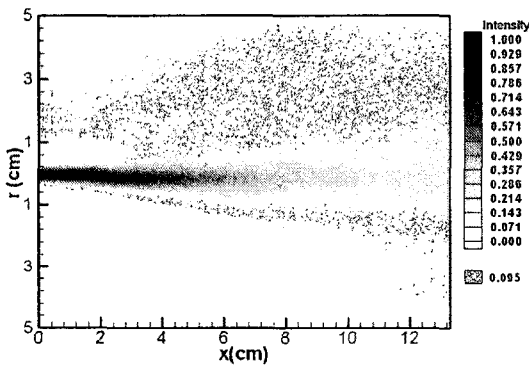
각 경우별로 아세톤 PLIF을 한 결과를 Fig.6에 나타내었다. 측정 영역은 Fig.6(a)에 나타낸 점선부분이며, 나타낸 이미지는 background 이미지를 제거한 이미지이고, 50장의 이미지를 평균한 이미지이다. 신호 강도를 강도가 가장 강한 부분으로 나누어 정규화 했으며 이 정규화된 신호강도 중 0.095부분은 실제 반응시 연료를 LNG(Liquefied Natural Gas)로 사용했을 경우 당량비(equivalence ratio) ϕ 가 1이 되는 부분을 나타낸 것이다. 즉 화염이 이 부분에서 생김을 예측할 수 있다. 각 이미지에서 연료 제트 상단부분은 연소기에서 배기가스가 흡입되는 부분(suction region)이며 하단부분은 연소용 공기가 분출되는 부분(injection region)이다. 이미지에서도 알 수 있듯이 배기가스가 흡입되는 상단 부분에 연료가 많이 분포함을 알 수 있다. 이는 흡입으로 인한 효과와 연소용공기의 분사로 인한 모멘텀에 의해 유동이 위로 치우쳐 이런 현상이 나타나는 것으로 알



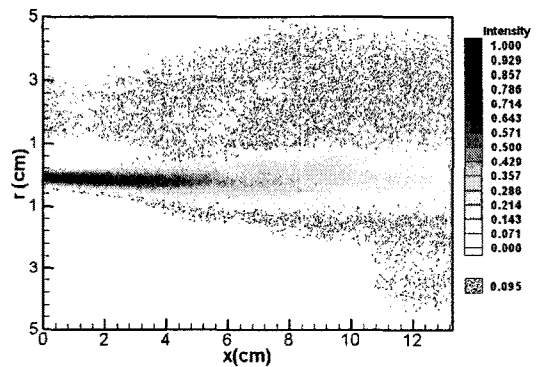
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.6 Normalized fuel intensity distribution using Acetone PLIF by varying air jet nozzle diameters : (a) Measurement position (b) $d_a = 13$ mm (c) $d_a = 6.5$ mm and (d) $d_a = 5$ mm

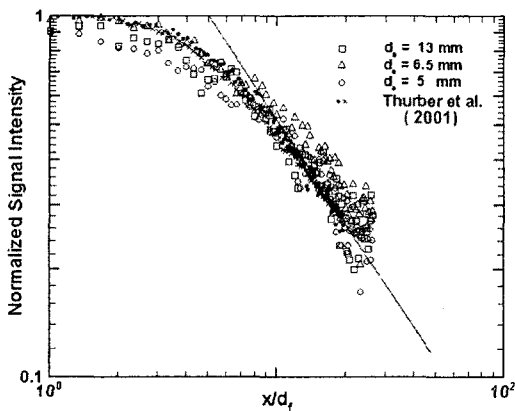
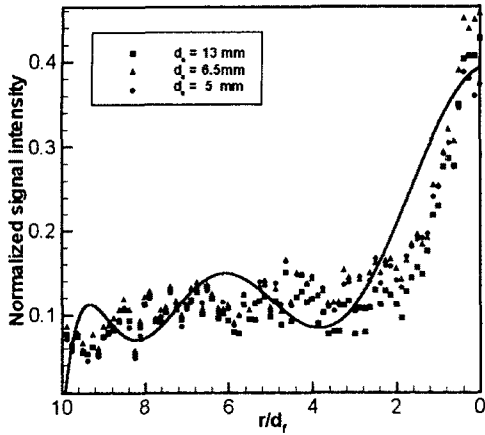


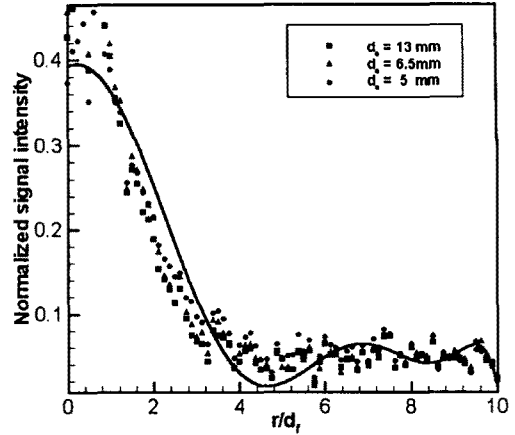
Fig.7 Mole fraction along centerline indicating $(x/d_f)^{-1}$

수 있다. Fig.7은 연료 제트의 증앙을 따라서 즉, 축방향(x 방향)으로의 연료 물분율의 감소(mole fraction decay)를 보여준다.

이전 논문의 결과 (M. C. Thurber, R. K. Hanson 2001)처럼 3경우 모두 점근적으로 $(x/d_f)^{-1}$ 의 감소를 보인다.^[11] Fig.8은 $x/d_f = 13.5$ 와 27 (Fig.6(a)참고)에서 반경반향(r 방향)으로의 물분율 분포를 나타낸다. $x/d_f = 27$ 은 거의 발달된 영역(fully developed region)이고 $x/d_f = 13.5$ 는 중간부분의 영역이다. 먼저 $x/d_f = 13.5$ 부분에서의 물분율 분포를 보면 suction region의 물분율이 r/d_f 가 증가할수록 크게 나타남을 알 수 있다.



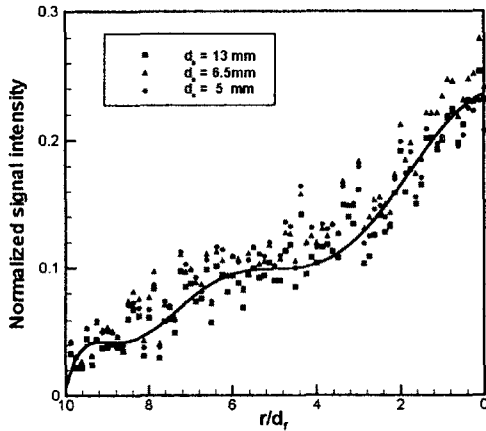
(a)



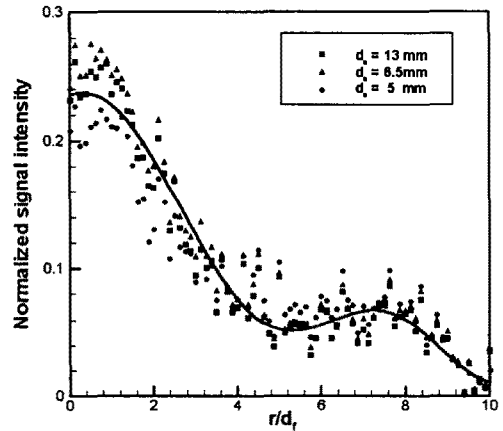
(b)

Fig.8 Radial distribution of normalized fuel intensity at $x/d_f = 13.5$

: (a) Suction region (b) Injection region



(a)



(b)

Fig.9 Radial distribution of normalized fuel intensity at $x/d_f = 27$

: (a) Suction region (b) Injection region

이는 위에서 이미 언급한 원인에 의한 것이다. $x/d_f = 27$ 부분에서도 같은 현상을 볼 수 있다.

3.2. 유동장 분석 (Two color PIV 결과)

각 경우에 대하여 Two color PIV 기법

을 이용하여 각각의 유동장을 분석하였다. 측정영역은 Fig.10(a)와 같이 배기가스가 빠져나가는 부분(suction region), 연소용 공기가 분사되는 부분(injection region)으로 2부분으로 나누어 측정하였다. 이는 아세톤 PLIF 측정영역과는 달리 상하로 좀 더 확장된 영역에서의 유동장을 측정하고자 하

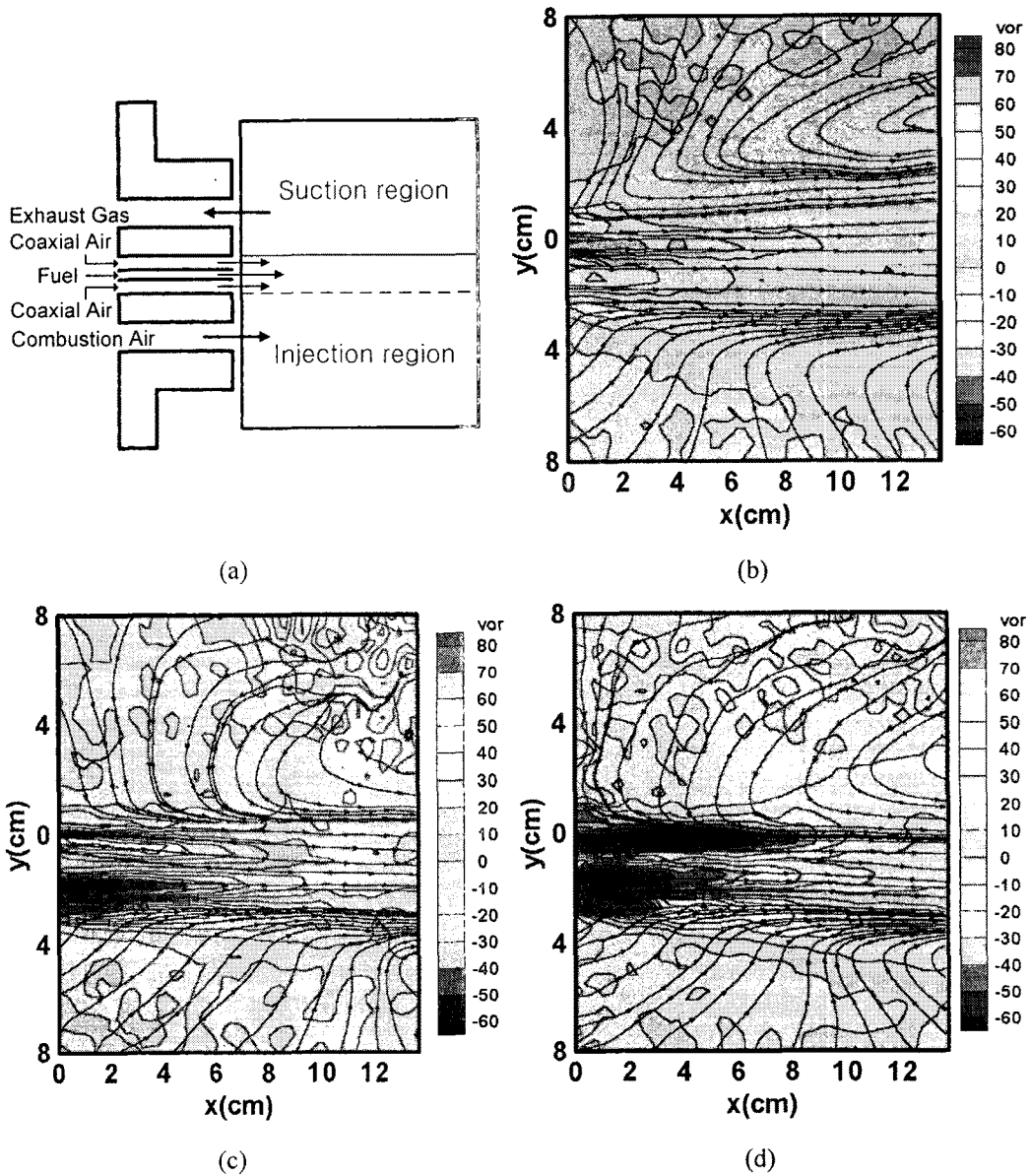


Fig.10 Streamlines & vorticity fields with the different air jet nozzle diameters

(a) Measurement position (combined results of the two regions)

(b) $d_a = 13$ mm (c) $d_a = 6.5$ mm and (d) $d_a = 5$ mm

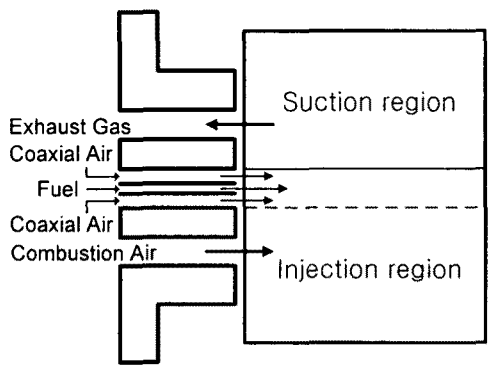
였으며 Fig.10의 결과들은 두 영역에서의 결과를 겹쳐서 나타내어 전체적인 유동을 볼 수 있도록 하였다. 나타낸 것은 유선도 (streamline)와 와류장(vorticity field)이다.

이 그림들 중에서 차이가 가장 많이 보이는 부분은 배기가스가 빠져나가는 부분 즉, suction region이다. 유선의 형태를 보면 노즐 직경이 작아질수록, 즉 연소용 공

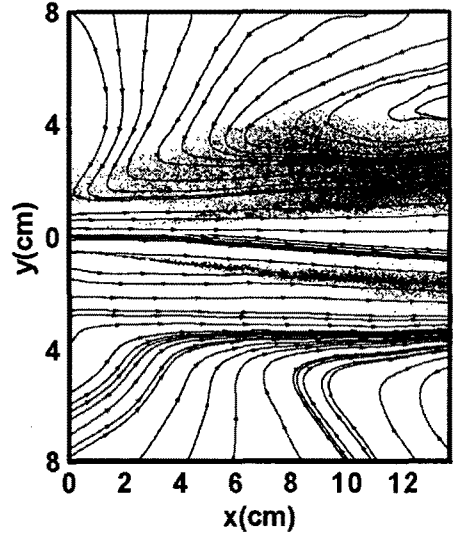
기 분사 속도가 빨라질수록 연료로 유동의 유입됨이 크다.

3.4 Entrainment of flue gas

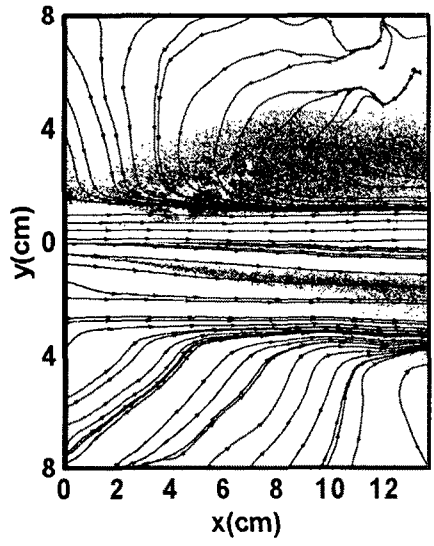
Fig.11은 PIV 결과와 PLIF 결과를 함께 나타낸 것으로 당량비(equivalence ratio) ϕ



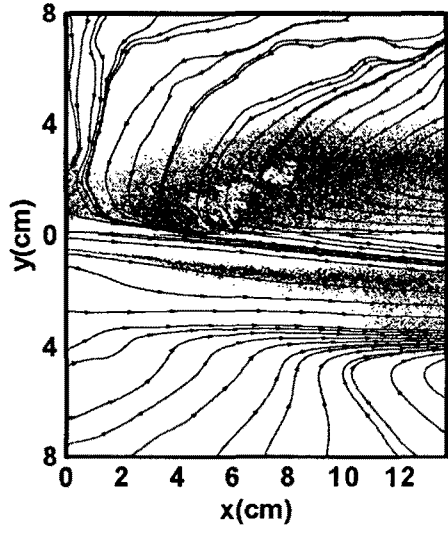
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.11 Streamline & stoichiometric mole fraction contours with the different air jet nozzle diameters: (a) Measurement position (b) $d_a = 13$ mm (c) $d_a = 6.5$ mm and (d) $d_a = 5$ mm

가 1이 되는 연료분포 부분과 유동장을 같이 나타내었다. Suction region에서 보편이 연료분포 부분으로 유동이 들어감을 볼 수 있다. 이 연료분포 부분에서 화염면이 생성되리라 보고 이곳으로 유입되는 유량을 구하였다. Fig.12는 두 영역에서의 유입되는 유량을 나타낸다. 연료분포 부분이 대체로 직선에 접하게 분포되어 있으므로 그림에서 처럼 직선상으로 통과되는 유동중에서 수직방향성분만을 고려하여 단위길이 당 유입되는 유량을 계산하였다. Fig.12(a)에서 Suction region에서는 연료의 분포가 위쪽으로 더 분포되어 있어서 접하는 직선을 injection region보다 위로 올려서 고려하였다. 축방향을 따라서 유입되는 유량을 보면 분사 노즐 직경 d_f 가 작을수록, 즉 분사속도가 클수록 유입되는 유량도 많아진다. 즉 배기가스 내부 재순환으로 인해 화염면으로의 배기가스 유입을 유도해 화염면의 높은 온도를 낮추어서, 열적 NOx의 저감을 예상 할 수 있다.

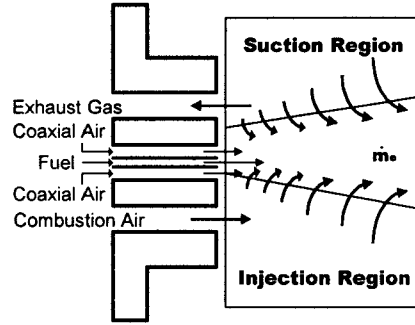
4. 결론

본 연구는 축열식 저 NOx 연소기에서 배기가스 내부 재순환 특성을 알아보기 위하여 아세톤 PLIF 기법과 Two color PIV 기법을 이용하였다. 실험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

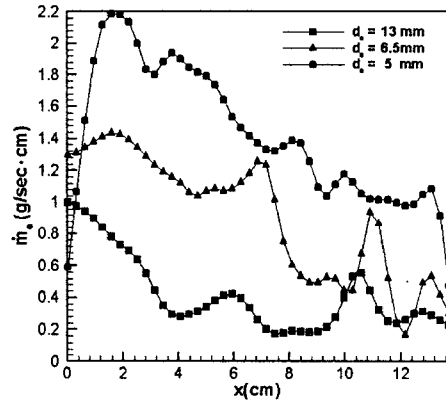
첫째, 배기가스 흡입으로 인한 효과와 연소용 공기의 분사로 인한 모멘텀에 의해 유동이 위로 치우쳐 연료의 분포가 배기가스가 흡입되는 쪽으로 많이 나타났다.

둘째, 연소용 공기의 분사 속도가 빠를수록 연료 부분으로 많은 유동이 유입되었다.

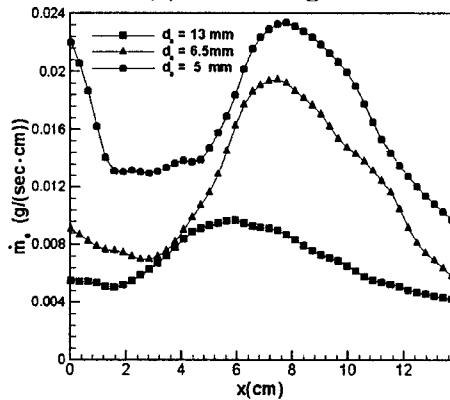
셋째, 화염면이 존재할 수 있는 부분으



(a) Entrained mass flow rate per unit length along the stoichiometric line



(b) Suction region



(c) Injection region

Fig.12 Entrained mass flow rate along the stoichiometric line : the flame contour is assumed with a linear line

로 배기가스가 유입이 되고, 연소용 공기 분사 속도가 증가할수록 이 부분으로의 유입량이 즉 단위길이 당 유량이 많다. 이로써 화염면의 온도를 낮추어 열적 NOx의 저감을 이룰 수 있음을 예측 할 수 있다.

후기

본 연구는 에너지·자원기술 개발 위탁 사업과제(과제명: 공업로용 고효율 저 NOx 연소기 연소특성 연구, 과제번호: 2000-E-FM01-P-27)에 의해 수행된 것이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanishi and R. Kitamura, 1997, "Low-Nox Combustion under High Preheated Air Temperature Condition in an Industrial Furnace", Energy Conversion & Management, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1353-1363, 1997.
- (2) Y. Suzukawa, S. Sugiyama, Y. Hino, M. Ishioka, and I. Mori, "Heat Transfer Improvement and NOx Reduction by Highly Preated Air Combustion ", Energy Conversion & Management, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1061-1071, 1997
- (3) 戸松三男, 谷口鑛司, "셀프리지네 버너의 개발", 工業加熱 Vol. 36, No. 2, pp. 53-60, 1999.
- (4) 山上俊, "셀프리지네버너의 개발とその適用について", 工業加熱 Vol.37, No. 3, pp. 24-32, 2000.
- (5) 仲町一郎, "最近の低NOx 燃焼技術の動向", 工業加熱 Vol. 36, No. 1, pp. 21-29, 1999.
- (6) 栗原孝好, 仲町一郎, 安岡 省, 小泉健司, "FDI 리지네레이티브버너의 개발", 工業加熱 Vol. 33, No. 5, pp. 39-47, 1996.
- (7) Tomeczek, J., Goral, J., Gradon, B., " The GAFT Burner for Reducing NOx in Gas-fired High-temperature Industrial Furnaces," Journal of the Institute of Energy, Vol .68, No. 477, pp.178-183, 1995.
- (8) "わが國の工業爐におけるリジネ레이ティブシステムの實踐の活用法", 日本バーナ研究會報 NO. 73, 1993.
- (9) 藤崎 亘, 橋本建信, 中村恒明, "FDI 天然가스酸素버너의 개발" 工業加熱 Vol. 37, No. 6, pp. 13-21, 2000.
- (10) 谷川正, "高性能工業爐開發 프로젝트の変遷と高温空氣 燃焼技術の展望", 工業加熱 Vol. 37, No. 5, pp. 13-22, 2000.
- (11) M. C. Thurber, R. K. Hanson, "Simultaneous imaging of temperature and mole fraction using acetone planar laser-induced fluorescence", Experiments in Fluids, Vol. 30, Issue 1, pp. 93-101, 2001.