

Flat Flame Burner의 유동과 연소 특성에 관한 연구

정용기* · 김철민 · 전충환** · 장영준

A Study on Flow and Combustion Characteristics of Flat Flame Burner

Y.K. Jeong, C.M. Kim, C.H. Jeon, Y.J. Chang

Key Words: Flat Flame Burner(평면 화염 버너), Recirculation Zone(재순환 영역)

Abstract

In this study, We studied flow and combustion characteristics of a Flat Flame Burner(FFB) with swirler. As swirl number increase, the streamlines is proceed close to tile and velocity is large. Blow-off limit decrease when swirl number is 1.24, but blow-off limit increase when combustion load is 6500kcal/hr. Temperature distribution is uniform in front of tile and NO formation is small at $S=1.24$. We expect that the radiation can be transmitted to the object and NOx will reduce because of recirculation zone

1. 서 론

고부하 연소와 안정된 정상연소를 하기 위해서는 유동중에 화염을 안정화시키는 것이 중요하다. 화염안정화의 수단으로 선회기를 이용하여 선회류 중심부에 생기는 순환류를 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 가스연료 분류 주위에 유입되어지는 공기류에 강

한 선회를 주면 중심축상에 재순환 유동이 생기고 고온의 연소가스가 역류함과 동시에 연료와 공기의 혼합이 촉진되기 때문에 넓은 연소 범위에 걸쳐서 안정된 고부하 연소를 얻을 수 있고, 선회강도와 공기비에 따른 운전조건을 변화시킴으로서 연소기내의 온도와 환경오염의 주인자인 CO, NOx등을 제어할 수 있다. 따라서, 선회연소기의 활용도가 점점 높아지고, 이에 따른 환경오염이 증가함에 따라 연소와 배출특성에 대한 규명이 절실히 요구되고 있다.

고복사 연소기중 평면화염 버너(Flat Flame Burner)는 연료, 공기 혼합가스에

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부

강한 선회를 수반하여 연소 시작 전 단계에서 완전한 예혼합이 이루어지므로 이론 당량비 부근에서도 완전연소가 가능하다. 또한 버너화염 전면에 후류 형성에 의한 배기가스 재순환영역이 형성되어 연소온도를 낮추어서 NO_x를 저감시킬 수 있다. 특히 고부하 연소에 사용되는 강선회류는 화염 안정 및 길이에 직접적인 영향을 미치는 재순환유동을 발생하는데 재순환되는 영역의 크기는 연소기의 기하학적인 구조와 밀접한 관계에 있다.

따라서 본 연구는 PIV기법을 이용하여 평면 화염 버너의 선회도에 따른 비연소시 유동 특성을 파악하고, 연소시에 화염 안정성, 온도 특성 및 배출가스 발생 특성을 비교 실험하고 그 결과를 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 실험방법

2.1 PIV 유동실험

Fig. 1은 평면 화염 버너(Flat Flame Burner)의 선회도에 따른 확대 타일 전면부의 비연소 유동장을 측정하기 위한 실험장치도이다. 연소기는 아크릴로 제작하였으며, 버너 내부로 주입된 공기류에 선회를 가하기 위한 베인 형태의 축방향 선회기를 사용하였고 광원으로는 532nm의 파장을 갖는 Nd : YAG레이저

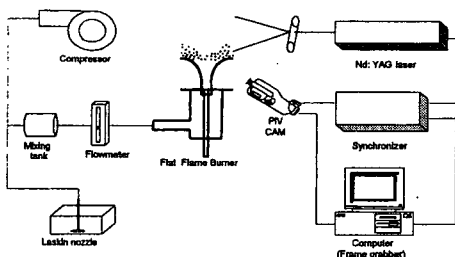


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

를 사용하였다. 입자는 비교적 공기의 흐름을 잘 추종하는 Laskin nozzle을 이용한 올리브 오일을 사용하였다.

버너의 유입유량을 48 l/min, 즉 노즐의 초기분사속도를 15.5m/s로 실험을 행하였다. 타일은 점차 확대판을 사용하여 선회도를 0, 0.26, 0.6, 1.24로 변형시키면서 전체 유동장의 특성을 파악하였다. 속도벡터의 검출은 2프레임 상호상관 PIV기법을 이용하였다. 이 때, 두 프레임 사이의 간격은 160μs로 일정하게 하고, 탐색영역의 크기는 24×24픽셀이고, 50%의 겹침을 허용하였다. 후처리 프로그램을 사용하여 불량벡터의 제거, 보간, 앙상블의 순서로 처리하였다. 각 선회도에 따라 1000장의 화상을 취득하고, 속도장 500장을 획득하여 앙상블 평균하였다.

2.2 버너 연소 실험

Fig. 2는 선회도에 따른 연소 특성을 알아보기 위한 실험장치도이다. 버너는 앞의 유동실험에 사용한 사양과 동일하며 고온에 견딜 수 있도록 내화 및 내열 재질로 제작하였다. 연소실은 내면이 250mm×250mm×450mm의 크기를 갖고 있으며 100mm 두께의 내화재로 단열되어 있다. 온도 측정은 R-type과 K-type 열전대를 사용하였고 가스분석은 전기화

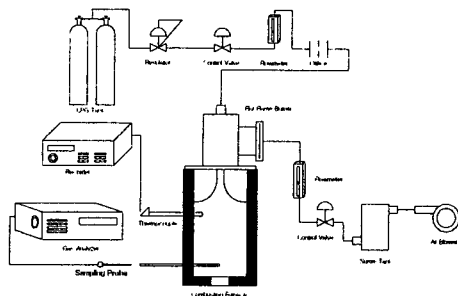


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

학센서가 장착된 KM-9106을 사용하였다. 사용연료는 저위발열량 21,790kcal/Nm³, 이론공기량 23.86Nm³/Nm³의 LPG를 사용하였다.

실험에서 사용된 연소조건은 Table 1과 같다.

화염의 blow-off 특성을 확인하기 위하여 대기조건과 연소로내의 조건에서 연소 부하별로 LPG를 연소하여 과잉공기비 1.0에서부터 blow-off가 나타날 때까지 공기유량을 증가시켜 선회도 별로 실시하였다. 이때 연소용 공기는 대기온도의 공기를 사용하였다. blow-off한계는 각 부하량 조건에서 화염이 blow-off될 때의 버너 스토틀부의 연소공기 속도로 규정하였다.

온도특성 실험은 대기공기가 연소장내에 유입되지 않는 단열 연소로내에서 선회도별로 R-Type(백금-로듐) 열전대를 이용하여 화염의 반경방향과 축 방향으로 온도측정을 하였으며 열전대의 온도 측정위치는 버너 스토틀의 축 중심에서 반경방향으로 0, 20, 40, 60, 80, 100mm의 6지점에서 축 방향으로는 30mm지점에서 측정하였다.

선회도에 따른 NO의 발생량을 비교 실험하기 위하여 과잉 공기비(λ) 0.9~1.3 범위까지 변경하면서 연소로의 배가스

출구측에서 NO량을 측정하였다. 이때 단열 연소로의 내부 온도는 650℃로 하였다.

3 실험 결과 및 고찰

3.1 선회도에 따른 유동장의 유선 분포

Fig.3은 각 선회도에 따른 유선의 분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 선회도가 유동장에 미치는 영향을 확인하기 위해 타일의 중심에서 23mm떨어진 지점에서 타일의 끝단부까지 버너 상부를 측정영역으로 하였다. 횡축(x/D)과 종축(y/D)은 반경방향의 거리와 축방향의 거리를 관경으로 무차원하여 표현하였다.

(a)는 선회도(S)=0인 경우로 유선의 분포로부터 주유동은 직진하는 구조를 확인할 수 있으며, 유선을 벗어난 영역은 입자가 미미한 관계로 유선으로서 표현이 되지 않았다. (b)는 S=0.26인 경우로 타일을 따라 이동하지만 축방향으로의 속도 성분의 증가로 주 유동의 확산각이 크고 재순환 영역도 작게 나타났다. (c)는 S=0.6인 경우로 타일의 끝단부에서 주유동이 외부의 공기와의 마찰로 깨어져 와(Vortex)가 생성되는 것이 확인되며, 다시 중심부로 재순환되는 부분이 뚜렷이 나타나고, 재순환되는 유동이 주 유동방향으로 유입되는 것을 확인할 수 있다. (d)는 S=1.24인 경우로 선회도가 증가할수록 축방향 속도보다 반경방향의 속도가 증가하여 주 유동의 폭이 타일에 근접하여 이동하고, 중심과 외부의 압력에 차이로 인해 중심으로 재순환하는 유동이 관찰되고, 재순환영역의 유동이 다시 주유동에 유입되는 것을 보여 주고 있다.

	Combustion		
	Blow-off	NO	Temperature
Combustion Load(kcal/hr)	2600, 3900, 5200, 6500	2600	2600
Air Excess Ratio(λ)	1.0	0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3	1.2
Swirl Number(S)	0, 0.26, 0.6, 1.24		

Table 1 Experimental condition

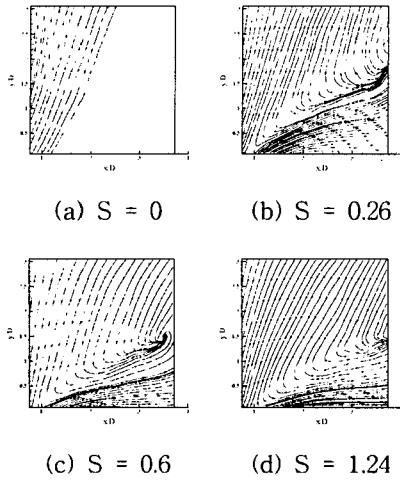


Fig. 3 Streamlines from ensemble averaged velocity field

3.1.1 반경방향 속도분포

종축(x/D)은 축방향을 관경으로 무차원하여 나타내었고, 횡축(U_x/U_{avg})은 반경방향 속도를 관경의 면적 평균속도를 이용하여 무차원하여 나타내었다.

Fig. 4는 반경방향으로의 6지점($x/D=1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$)을 설정하여 선회도에 따른 그 지점의 속도를 비교하였다.

(a)는 $x/D=1$ 인 지점으로 노즐 출구 부근에서 속도가 음의 값을 갖는 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 영역은 외부의 주위공기가 타일의 중심부로 유입되는 것이고, 선회도(S)=1.24인 경우에 음의 반경방향 속도가 상대적으로 선회도가 낮은 것 보다 크게 나타남을 알 수 있다. (b)는 $x/D=1.5$ 인 지점으로 선회로 인해 축방향의 속도가 반경방향의 속도로 전환되기 때문에 평균속도는 점차 타일을 따라 이동하는 반경방향 속도가 크지는 것을 보여주고 있다. 최대 반경 방향 속도는 무차원 반경방향 거리(x/D)가 대략 1.5 부근에서 반경방향 무차원 속도가 0.65 정도로 가장 크게 나타났다.

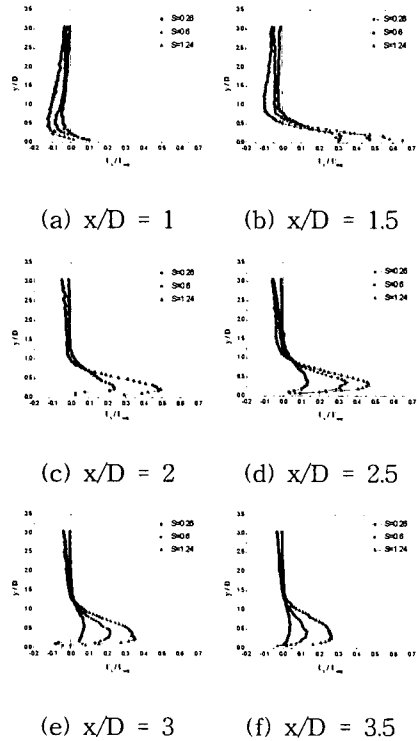


Fig. 4 Distribution of mean radial velocity with radial distance

(c)는 x/D 가 2인 지점으로 속도가 최고점을 지나 속도가 감소하는 것을 보여주며, 속도가 피크점을 향하다가 감소하는 부분은 타일부와의 마찰로 인해 속도가 감소하는 것으로 생각되어진다. (d), (e), (f)는 무차원 반경방향 거리(x/D)가 2.5, 3, 3.5로 증가할수록 뾰족한 형태가 운동모멘텀의 감소로 인해 타원형으로 변하는 경향을 보인다.

3.1.2 축방향 속도분포

버너 스토틀의 관경으로써 무차원화시킨 거리($y/D=1, 1.5, 2, 2.5$)에 따른 선회도 별 축방향 속도 성분을 파악해 봄으로써 재순환영역의 유동 패턴을 확인하였다.

Fig. 5는 4 지점에서의 축방향 속도성분을 나타낸 것으로 (a)는 $y/D=1$ 인 지점의 축방향 속도로서 타일의 중심을 향하는 속도 성분이 모두 크게 나타나고, 특히 선회도가 1.24인 경우에는 축방향의 무차원 속도(U_y/U_{avg})가 0.4정도로 가장 크게 나타났으며, 선회도에 따라 축방향으로의 음의 속도가 증가하였다. 이것은 선회도의 증가에 의해 타일의 중심부는 저압이 형성된다. 저압은 점차 압력을 회복하여 축방향의 압력 역구배를 형성시키며 유동의 축방향 운동에너지가 역방향의 압력구배를 극복하지 못할 때 재순환 영역이 형성된다. 그러므로 주변의 완만한 속도는 주유동의 속도와 중심의 압력의 영향을 받는다.

(b) $y/D=1.5$, (c) $y/D=2$, (d) $y/D=2.5$ 로 증가할수록 축방향의 속도 성분이 전체적으로 감소하는 경향을 보이고, $y/D=3$ 인 지점에서는 선회도(S)가 0.6인 경우와 1.24인 경우의 축방향 속도 성분의 폭이 거의 동일한 것으로 나타난다.

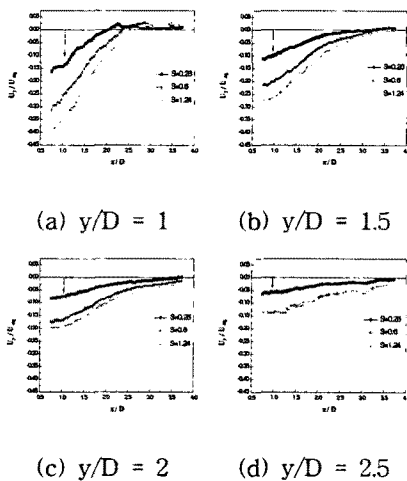


Fig. 5 Distributions of mean axial velocity with axial distance

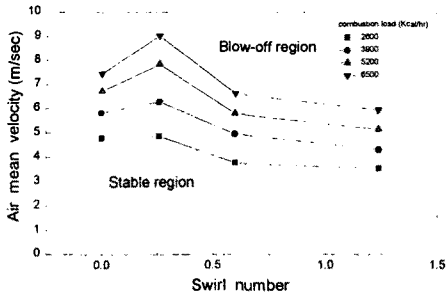
이로부터 선회도가 0.6인 경우와 1.24인 경우에 있어서 축방향이 일정 길이 이상이 되면 선회도의 영향이 줄어드는 것으로 판명된다.

3.2 화염의 Blow-off 특성

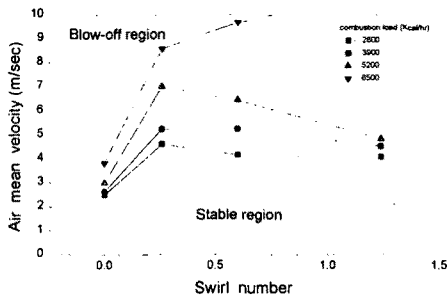
Fig. 6(a)는 대기조건에서의 선회도(S) 변화에 따른 화염의 blow-off 한계 특성을 나타내고 있다.

선회도가 0.26인 경우 blow-off 한계가 증가하는 것으로 나타났다. 그 이유는 연료와 산화제의 혼합이 연소에 적합하도록 잘 이루어지고 화염의 중심에 적당한 재순환영역이 존재하기 때문으로 생각된다. 그리고 선회도가 0.26이상에서 비화한계가 감소하는 것은 선회수의 증가에 따라 재순환영역이 커지게 되어 화염의 주위인 대기공기를 부압이 형성된 화염의 중심영역으로 다량 유입시켜 화염을 냉각시키게 되기 때문이다.

Fig. 6(b)는 연소로 조건에서의 선회도(S) 변화에 따른 화염의 blow-off 한계 특성을 나타내고 있는 것으로 연소부하가 6500 kcal/hr인 경우를 제외하고는 선회도가 0.26 영역까지는 blow-off 한계가 증가하다가 0.26이상에서는 대기조건과 마찬가지로 선회도 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 연소부하가 6500 kcal/hr인 경우는 화염의 blow-off 한계가 선회도의 증가에 따라 급격히 커지는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 연소부하가 클 경우는 선회수 증가에 기인한 화염의 냉각효과 보다는 재순환영역으로 유입되는 열량이 커서 화염유지에 필요한 열원의 지속적인 공급과 활성화확종의 충분한 공급이 이루어지기 때문인 것으로 생각된다.



(a) atmospheric condition



(b) furnace condition

Fig. 6 Blow-off limit with swirl number in atmospheric & furnace condition

3.3 화염온도 분포

연소로 내의 온도분포 특성을 파악하기 위하여 연소부하 2600kcal/hr, 과잉공기비(λ) 1.2 로 하여 선회도 변경시

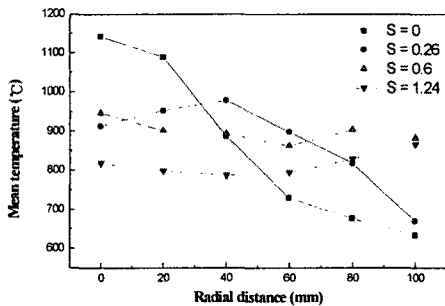


Fig. 7 Temperature distributions for radial distance with swirl number at Z=30

반경방향 및 축방향으로의 노내 온도분포를 측정하였다. Fig. 7은 선회도별로 반경방향(R)에 따른 노내 온도분포를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 선회도가 0인 경우는 유동 형상이 원추형을 하고 있기 때문에 축방향 Z=30mm 위치에서 반경방향으로의 온도분포는 반경방향으로의 거리가 멀어질수록 온도구배는 큰 것으로 나타났다. 버너의 축중심에서 반경방향 R=20mm지점까지의 온도가 높은 것은 화염대의 직접적인 영향을 받기 때문이고 20mm이상에서부터 급격히 온도가 떨어지는 것은 화염의 폭이 좁아 화염으로부터 영향이 줄어들기 때문이다.

선회도(S)가 0.26인 경우에는 화염의 폭이 비 선회시에 비해 어느 정도 커져 있으므로 Z=30mm에서 고온역은 반경방향으로 R=40mm 까지 존재하고 있으며 그 이후에서는 온도가 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 화염기부의 중심부에 해당하는 R=0mm에서의 온도보다도 R=20, 40mm 지점의 온도가 더 높게 나타나는 것은 화염장내에 작은 재순환영역이 형성되어 있어 온도가 상대적으로 낮아진 것으로 생각된다. 선회도(S)가 0.6, 1.24인 경우, 반경방향으로의 온도분포는 선회수 0 및 0.24에 비하여 온도구배가 거의 없이 나타났다.

3.4 질소산화물(NO) 발생특성

평면화염 버너에 있어서 선회도와 공기과잉률에 따른 NO의 발생특성을 파악하였다. 그 결과치를 기준산소농도 3%로 환산하여 나타내었다. 기준산소농도는 다음의 식에 따라 환산하였다.

$$NO = \frac{21 - O_N}{21 - O_S} NO_S$$

여기서 NO는 환산 NO(ppm) 농도, O_N 은 기준산소농도(%), O_S 는 배가스중의 산소농도(%), NO_S 는 NO의 실측치(ppm)이다.

Fig. 8은 연소부하 2600kcal/hr시 선회도 0, 0.26, 0.6, 1.24의 각 조건에서 과잉 공기비(λ)를 0.9~1.3의 범위로 변경하면서 NO의 발생량을 측정된 결과를 나타낸 것이다. $\lambda=0.9 \sim 1.0$ 까지는 모든 선회수에서 NO의 변화가 없었으나 λ 가 1.0~1.3 범위에서는 점차적으로 증가하였다. 이것은 과잉 공기비(λ)가 1.0 이하일 경우는 연소역에서의 산소농도 저하로 NO 발생이 적고 과잉 공기비(λ)가 1.0 이상일 경우에는 연소역에서의 산소농도가 높아지기 때문에 NO의 발생이 점점 증가한 것으로 생각된다. 일반적으로 과잉공기비가 아주 높을 경우에는 연소역에서의 산소농도는 높아지지만 상대적으로 화염온도의 저하를 초래하여 NO의 발생은 오히려 감소하는 경향이 있으나, 본 실험 조건에서는 λ 가 1.3까지는 산소농도의 영향이 NO 생성에 더 지배적인 영향인자로 나타났다.

선회도가 높을 경우는 화염이 버너타일을 따라 평면을 유지하게 되어 화염층이 얇고 화염폭이 커지게 되어 화염의

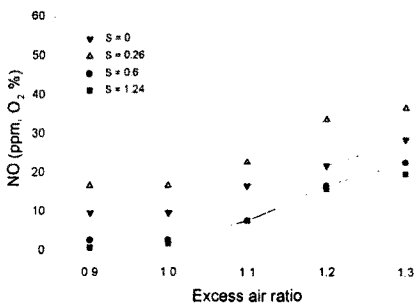


Fig. 8 NO formation characteristics by excess air ratio (2600 kcal/hr)

방열성이 증대됨으로 화염중의 국부 고온역 형성을 억제하며 연소실내의 연소가스가 연소역으로 재순환되어 유입되는 양이 증가하기 때문에 연소역에서 상대적인 산소농도의 저하로 NO의 발생이 적은 것으로 생각된다.

4. 결론

이상의 평면화염 버너에 있어서 스윙 유동 및 연소특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선회도에 따른 유동장의 유선 분포를 통해 선회도의 증가에 따라 주유동의 확산각이 커지고, 재순환 영역이 증가하는 것으로 나타났다.
2. 화염의 blow off 한계는 대기조건 및 연소로 조건에서 선회수가 같을 시 연소부하가 증가할수록 커지며, 선회수 변경시는 약선회($S=0.26$ 이하) 영역에서는 선회수의 증가에 따라 blow off 한계가 커지나 그 이상의 영역에서는 선회수 증가시 blow-off 한계는 작아지는 것으로 나타났다.
3. 온도분포는 선회도 0, 0.26에서는 버너타일의 중심부에서 온도가 가장 높게 나타나고 반경방향과 축 방향으로 거리가 멀어질수록 낮아지는 경향이 나타났다. 이에 비하여 평면화염을 형성하는 선회도 0.6, 1.24에서는 반경방향, 축 방향 모두에서 온도분포가 균일한 경향을 보였다.

4. NO특성은 선회도가 0일 때 화염의 국부 고온역의 존재로 가장 높게 나타나고, 선회도가 증가함에 따라 화염의 방열성 촉진 및 연소가스 재순환율의 증대로 화염대에서 산소농도가 저하되어 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

1. Hiett, G.F. and Powell, G.E., "Three Dimensional Probe for Investigation fo Flow Patterns', The Engineer, Jan., 1962, PP.165-170
2. R. D. Keane and R. J. Adrian, "Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images, Flow Visualization and Image Analysis," F.T.M. Nieuwstadt(ed.) Kluwer Academic Pub., pp.1 - 25.
3. Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L., "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers", J. of The Institute of Fuel, Vol. 41, June 1976. pp.238-240
4. Masahiro SHIOJI et, "Structure of a Flat Flame Stabilized by an Air Swirl", JSME, Vol.30, 1987, No.270
5. Hirai and Nagai, "Effects of Fuel Spray Nozzles on Combustion Characteristics of a Swirl Combustion", JSME, Vol.564, 1993, pp.236-243
6. Chang, K. C., Wang, M. R., 썸, W. J., and Hong, C. H., "Experimental and Theoretical Study on Hollow-Cone Spray", Journal of Propulsion and Power, Vol 9, No.1, 1993, pp.28-34
7. K.Aoki and Nakayama, "The Flow Characteristics in Swirl type Combustor", Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, 1987, pp.45-54
8. Sang-Nam Lee, Hyung-kee Yoon, Jeon -In RYU, "Flow Field Characteristics of a High Load Combustor", KSME 96S151, pp.58-63
9. R. J. Adrian, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", annu. rev. Fluid Mech., Vol.23, 1991, pp.201-304
10. 한국 에너지 기술 연구소, "A Study on Development of combustion System for Energy Conservation and Low Emissions", 1997
11. Sang-joon Lee, "PIV-Velocity Field Measurement", 1999
12. T. P. Chang, et al., "Image Processing of Tracer Particle Motion as Applied to Mixing and Turbulent Flow," Chemical Engineering Science, Vol. 40, No. 2, 1985
13. C. C. Landreth and R. J. Adrian, "Impingement of a Low Reynolds Number Tubulent Circular Jet onto a Flat Plate at Normal Incidence," Experimental Fluids, Vol. 9, 1990
14. D. L. Reuss, M. Bardseley, P. G. Felton, C. C. Landreth and R. J. Adrian, "Velocity, Vorticity, and Strain Rate Ahead of a Flame Measured in a Engine Using Particle Image Velocimetry," SAE Paper No. 900053, 1990