

평면화염 버너의 선회유동 및 연소특성에 관한 실험적 연구

김철민* 최수진** 전충환** 장영준**

An Experimental Study on the Swirled Flow Pattern and Combustion Characteristics in the Flat Flame Burner

C.M. Kim, S.J. Choi, C.H. Jeon and Y.J. Chang

Key Words: Flat Flame Burner(평면화염 버너), Swirl Number(선회도), Excess Air Ratio(과잉공기비), Thermal NO_x

Abstract

The flat flame made by swirling air has lots of the different characteristics according to the swirl numbers in the burner throat. Its combustion characteristics are also affected by them. In this study, the flow patterns in the flat flame burner which is no firing condition were investigated experimentally with using smoke in terms of each swirl number. Also the blow off, flame structure, temperature distribution and NO emission in the firing condition were measured at the atmosphere and combustion furnace.

1. 서론

공업로는 대부분이 연료를 연소시켜 발생되는 열을 이용하는 연소로서 여기에 사용되는 연소기의 성능 특성에 따라 열효율, 가열특성, 유해 배출가스량 등이 크게 영향을 받는다. 상용화된 기존의 연소기는 대부분 가스의 연소열을 대류가열의 형태로 이용하고 있기 때문에 열효율이 낮고 연소부하에 따른 화염구조 등이 변하게 되어 피열체에 국부가열을 발생시킬 수가 있으며 화염중 국부 고온역의 존재와 연료및 공기의 불충분한 혼합으로 배출가스중 질소산화물(NO_x)과 미연소 물질이 증대되는 문제점이 있다.

이에 반하여 평면화염 버너(Flat Flame Burner)는 버너 throat에서 토출되는 연소화염 및 고온의 연소가스를 이용하여 버너 타일(tile)부와 노벽면을 가열시켜 고체표면으로 부터 발생하는 복사열을 피열체에 빠르고 균일하게 전달함으로 피열체의 가열시간을 단축시키고 가열품질을 향상 할 수 있는 장점이 있다. 또한 버너의 중심에서 강한 선회력 동반한 연소공기가 반경 방향으로 토출되기 때문에 화염의 전면에서는 후류가 형성되어 연소가스의 자기 재순환이 이루어지므로 연소영역에서의 산소농도 저하와 낮고 평평한 화염형상에 따른 화염의 방열성 촉진으로 thermal NO_x의 발생을 억제하고 연료 및 공기의 혼합성 향상으로 저 공기비 운전영역에서도 완전연소가 가능한 특성을 가지고 있다. 그리고 연소화염의 길이가 버너의 축 방향으로 극히 짧기 때문에 노의 소형화가 가능하여 노 축조시의 시설 투자비를 대폭 줄일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 평면 화염버너에서의 노즐의 선회도에 따른 비연소시의 연소공기유동 특성을 스모크(smoke) 유동가시화를 통하여 실험적으로 밝히고

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학과

연소시에 화염 안정성, 화염형상, 온도특성 및 배출가스 발생 특성을 비교 실험하고 그 결과를 고찰하였다.

2. 유동 특성 실험

2.1 실험장치 구성

버너의 유체유동 현상을 정성적으로 파악하기 위하여 스모크의 유선을 관찰할 수 있는 실험장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다.

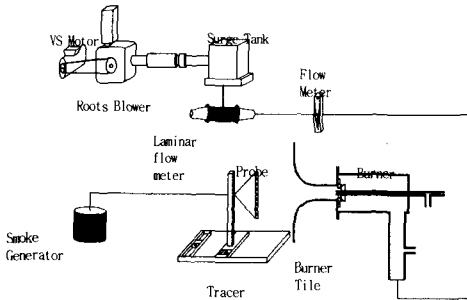


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus to visualize the flow pattern

사용된 버너는 유동현상을 관찰하기 위하여 아크릴로 제작하였으며 실험버너의 크기는 타일부 직경 246 mm, throat 직경 34mm, throat 직관부 길이 65 mm, 곡률반경 56 mm로 제작하였다. 타일형상은 실제의 버너와 동일하게 throat 부위에서 점차적으로 직경이 확장되는 방사형 모양을 하고 있다. 공기 선회기 형태는 두께 15mm의 원형 스테인레스강에 2mm×3.5mm의 슬릿(slit) 모양으로 4개의 공기분출구를 갖고 있어 연소용공기는 축방향으로 각각의 선회도에 따라 선회유동으로 분출되도록 되어있다. 선회기의 위치는 throat 직관부의 끝으로부터 30mm에 고정하였다. 연료노즐은 공기선회기의 중심에 위치하고 반경 방향으로 직경2mm의 연료 분출구가 12개 배치되어 있어 연료의 분사는 반경방향으로 분출되어 공기의 분출방향과 수직한다. 사용된 공기 선회기는 모두 4개로 공기분류에 대한 선회각을 가지고 있으며 각각의 선회도는 축방향에 대하여 0, 0.24, 0.6, 1.24 로 되어있다.

유선을 형성하기 위한 스모크 프로브(smoke probe)는 직경 3mm의 튜브에 10mm 등간격으로 직경 0.5mm의 원형 hole을 15개 가공하여 일정 방향으로 한줄로 배열하였다. 또한 스모크의 원활한 공급과 압력손실에 의한 거리에 따른 hole 별 유속의 차이를 줄이기 위하여 프로브의 양쪽 방향에서 스모크가 공급되도록 제작하였다. 스모크의 분사 hole은 버너의 축중심에서 반경방향으로 버너타일의 끝단부 까지 버너타일의 전면과 평행하게 설치하였다. 스모크는 담배연기 입자를 사용하였다.

2.2 실험방법

비 연소시 버너의 유동실험을 위하여 연소용 공기만을 공급하였다. 연소용 공기는 LPG 연소시 3000kcal/hr에 상당하는 40 liter/min을 공급하였다. 이때 노즐의 공기분사 유속은 13.5 m/sec이며 모든 노즐의 선회도에서 정상유동으로 하였다. 스모크 유선의 측정방법은 버너 타일부 전면에서 버너 축 방향 및 반경방향으로 10mm 간격으로 격자를 형성시키고 프로브가 고정된 이송장치를 사용하여 각 격자에서 유동을 관찰 하였다. 측정은 버너의 유동을 완전한 측대칭으로 가정하고 한쪽 면만을 실시하였다.

2.3 결과 및 고찰

Fig. 2는 버너에서 공기의 각 선회도별로 정상 유동시의 유동현상을 스모크 테스트를 통하여 얻어진 결과 데이터를 점선로 점선으로 표시하였으며 재순환류가 형성되는 경계역을 나타내고 있다. 선회도가 0일 경우는 버너의 중심에서 축방향으로의 공기유동이 주류를 이루고 선회유동은 하지 않으며 분류 중심부에서 역류하는 재순환류가 존재하지 않는다. 그러나 버너타일의 반경방향에서 중심부와 떨어진 지점에서 중심부 쪽으로 재순환하는 유동이 다소 넓은 영역에서 존재한다. 이것은 버너의 중심부에서 축방향으로의 분류되는 직진공기의 토출 모멘텀이 가장 크기 때문에 주위의 유체가 흡인되면서 재순환을 하게된다. 이 결과로부터 선회도가 0일 경우는 버너타일의 형상에 관계없이 연소시 화염형상은 평면화염을 형성하지 못하고 원추형의 화염을 형성할

것임을 알 수 있다.

선회도 0.24의 실험결과에서는 선회도는 증가할수록 공기의 선회유동은 강하게 되고 버너의 중심부에서 역류하는 재순환 영역 또한 커지게 됨을 알 수 있다. 이것은 반경방향의 공기분류 모멘텀이 축방향 분류의 공기 모멘텀 보다 훨씬 커져서 버너 중심에서의 압력이 주위 보다 낮아지기 때문이다. 선회도가 0.6이하의 범위에서는 공기의 선회분류에 따른 버너의 토출 중심에서 역류하는 재순환 영역과 버너타일의 중심축과 반경방향으로 떨어진 곳에서 직진분류의 모멘텀의 영향으로 재순환영역이 발생하는 것이 관찰되었다. 따라서 평면화염 버너에서 선회도 0.6이하를 적용할시에는 버너타일을 따라 완전한 평면화염을 형성 할 수 없게 된다는 것을 알 수 있다. 선회도가 0.6 이상에서는 버너중심부에서 재순환류의 영역은 커지지만 버너타일의 외측에서의 재순환류는 더 이상 존재 하지 않음을 알 수 있다. 이것은 선회력의 증가에 따라 반경방향으로의 공기 토출 모멘텀이 훨씬 커져서 분류공기의 대부분이 버너의 타일을 따라 반경방향으로 흐름을 유지할 수 있기 때문이다. 따라서 선회도가 0.6 이상인 공기노즐을 적용하면 실제의 연소조건에서도 완전한 평면화염을 형성 할 수 있는 기본적인 요소를 갖추게 된다는 것을 알 수 있다.

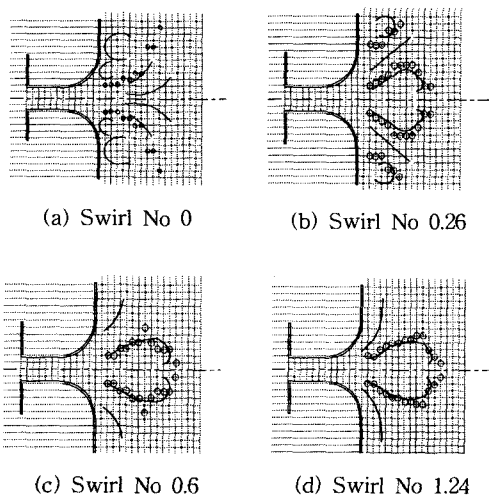


Fig. 2 Smoke flow shapes with swirl numbers in non-firing condition

3. 연소특성 실험

3.1 실험장치 구성

실험장치는 연소용 버너, 송풍기, 연소실, 유량계, 서지탱크, 연료 및 공기공급 배관으로 구성되어 있다. 버너는 앞의 유동실험에 사용한 사양과 동일하며 고온에 견딜 수 있도록 재질로 제작하였다. 연소실은 내면이 250mm×250mm×450mm의 크기를 갖고 있으며 100mm 두께의 내화재로 단열되어 있다. 송풍기는 풍압 2500mmH₂O, 풍량 5m³/min의 ring blower를 사용하였다. 온도 기록장치는 thermo Dac을 사용하였고 온도 측정용 열전대는 R-type과 K-type을 사용 하였다. 가스 분석기는 COSA-6000을 사용하였다. 사용연료는 저위 발열량 21,790kcal/Nm³, 이론공기량 23.86Nm³/Nm³의 LPG를 사용하였다.

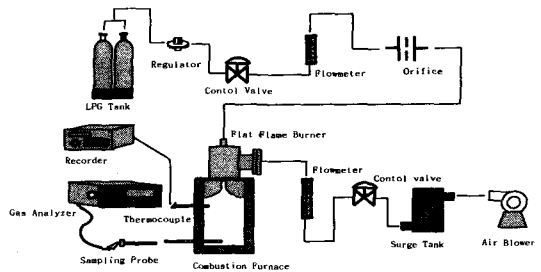


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

3.2 실험방법

연소시의 모든 실험에서 연소 형태는 연료와 연소공기가 버너 throat 부까지 분리 공급된 후 강제혼합 연소하는 확산연소 방식으로 하였다. 화염의 blow off 특성을 확인하기 위하여 대기 조건에서 연소 부하량 2600kcal/hr, 3900kcal/hr, 5200kcal/hr, 6500kcal/hr의 각 조건에서 LPG를 연소하여 과잉공기비 1.0에서 부터 blow off이 나타날 때까지 공기유량을 증가시켜 각 선회도별로 실시 하였다. 이때 연소용 공기는 대기온도의 공기를 사용 하였다. 화염의 형상 특성은 대기조건에서 연소부하량 3000kcal/hr, 과잉공기비 1.2로 하여 디지털 카메라로 각 선회도별로 화염의 측면을 촬영하여 화염의 길이와 평면성을 관찰하였다.

온도특성 실험은 대기공기가 연소장내에 유입되지 않는 단일 연소로내에서 각 연소 부하별, 선회도별로 열전대를 이용하여 화염의 반경방향과 축 방향으로 온도측정을 하였으며 열전대의 온도 측정위치는 버너타일 전면으로부터 5mm 떨어진 축 중심에서 반경방향으로 R-type을 20mm간격으로 8개, 버너중심에서 축 방향으로 K-type을 30mm간격으로 6개로 하였다. 화염으로부터 순간적으로 일어나는 복사 손실열과 연소로 벽면의 열손실 및 배가스 손실열은 고려하지 않고 동일 실험 조건에서 온도측정을 하였다.

배출가스인 NO의 발생량을 비교실험하기 위하여 연소부하별, 선회도별로 과잉공기비(λ) 0.9~1.3범위까지 변경하면서 연소로의 배가스 출구측에서 NO량을 측정하였다. 이때 단일 연소로의 내부 온도는 650°C로 하였다.

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 화염 Blow off 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 대기조건에서 연소부하별 각 선회도에 따른 화염의 blow off 특성을 나타낸 것이다. Fig. 4에서는 연소부하가 증가할수록 모든 선회도 범위에서 blow off 한계가 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 5에서는 각 연소부하에서 선회도가 0~0.28 범위 까지는 blow off 한계가 증가하다가 0.28 이상의 선회도에서는 점차 감소하였다. 그리고 선회도가 0.6이상에서는 선회도가 0일 경우보다도 더 낮아져 점차적으로 감소되어 가는 것으로 나타났다.

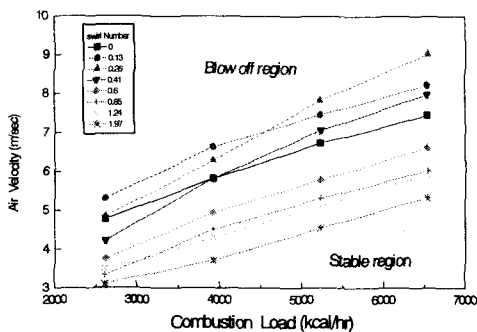


Fig. 4 Blow off characteristics with combustion loads

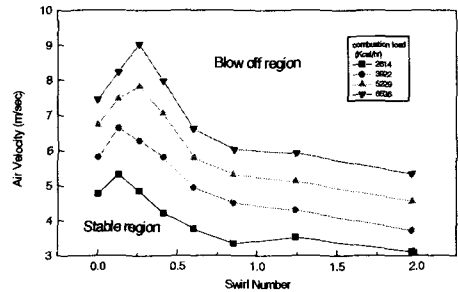
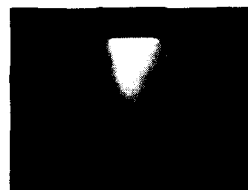


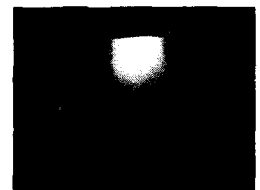
Fig. 5 Blow off characteristics with each swirl number

3.3.2 화염형상 특성

Fig. 6은 연소부하량 3000kcal/hr, $\lambda = 1.1$ 인 일 정조건으로 하여 대기중에서 화염의 측면을 각 선회도에 따라 직접사진으로 형상을 촬영한 결과를 나타내고 있다. (a)는 선회도가 0인 경우로 화염의 형상은 원추모양을 하고 있으며 버너의 축 방향으로 화염이 발달하고 있는 것으로 나타났다. (b)는 선회도가 0.26인 경우로 화염의 길이가 선회도 0인 경우에 비하여 짧아져 있으며 화염 끝의 폭이 넓어져 있다. 이것은 선회도의 증가에 따라 축 방향의 유체속도에 비하여 반경방향으로의 유체 속도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. (c)는 선회도가 0.6인 경우로 화염의 형상이 버너타일을 따라 평면을 유지하고 있으며 선회도 0, 0.26과는 달리 화염이 반경방향으로 발달되어 화염두께가 얇고 편평하게 유지되어 있다. (d)는 선회도가 1.24로 축 방향으로의 화염 발달은 극히 작고 반경방향으로의 화염이 커서 화염두께가 극히 얇아져 있다. 대부분의 연료연소가 버너의 타일을 따라 진행되고 있어 화염대가 버너 타일의 전반부에 걸쳐서 존재하고 있음을 알 수 있다.



(a)Swirl number 0



(b)Swirl number 0.26



(c) Swirl number 0.6 (d) Swirl number 1.24

Fig. 6 Photographs of flame shape with each swirl number

3.3.3 화염온도 분포

Fig. 7과 Fig. 8은 연소부하 2500kcal/hr, $\lambda = 1.2$ 조건에서 선회도별로 각각 반경방향과 축방향의 연소장에서 온도 profile을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 선회도 0, 0.26일 때 반경방향의 온도 분포에서 버너 중심에서 거리가 0인 경우 온도가 가장 높게 나타나고 중심에서 거리가 멀어질수록 감소하며 60mm 지점에서 온도가 일정하게 유지되고 있음을 나타내고 있다. 이것은 선회도가 비교적 약하기 때문에 화염대의 폭이 작기 때문이다. 선회도가 0에 비하여 0.26일 경우에 온도가 비교적 높게 나타나는 것은 연료와 공기의 혼합이 상대적으로 잘 일어나 연소온도가 높아진 것으로 생각된다. 선회도가 0.6인 경우는 버너 중심의 온도가 선회도 0, 0.26인 경우에 비하여 상당히 낮고 반경방향으로 40mm까지는 온도가 증가하다 점차 감소하여 버너 중심의 0mm 지점의 온도와 유사하게 되는 것으로 나타났다. 이것은 선회도의 증가에 따라 화염영역이 반경방향으로 확장되어 평면화염을 유지하고 있음을 나타내고 40mm 지점에서 연소가 가장 활발하게 진행되는 것으로 생각되어 진다. 선회도가 1.24일 경우는 버너 중심의 온도가 선회도 0, 0.24, 0.6에 비하여 비교적 낮고 반경방향으로의 전체적인 온도 분포는 균일하나 40mm 지점에서 온도가 낮게 되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 선회도 증가에 따른 연소로내의 저온 배가스가 상당량이 연소영역으로 재순환되어 유입되면서 화염의 온도를 낮추는 것으로 생각된다. 그리고 40mm 이후에서 온도가 어느 정도 증가하는 것은 연료의 연소열이 점차 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8에서는 축 방향 중심의 온도분포를 20mm 간격으로 150mm까지 측정 한 것으로 선회도가

작은 0, 0.26 인 경우는 버너에 근접한 0mm 지점에서 온도가 가장 높게 나타났다가 30mm 지점에서 급격히 감소하여 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이에 비하여 선회도 0.6 이상에서 축 방향의 거리에 온도분포가 균일함을 보인다.

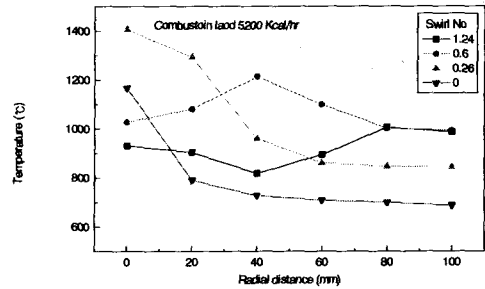


Fig. 7 Temperature distributions for radial distance

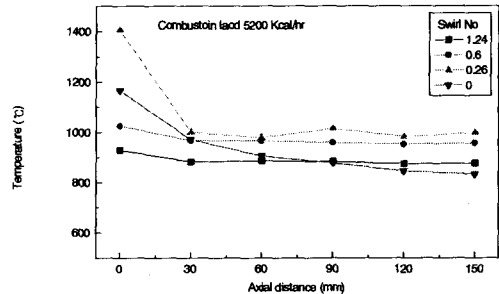


Fig. 8 Temperature distributions for axial distance

3.3.4 NO 발생특성

Fig. 9는 연소부하량 5200kcal/hr시 선회도 0, 0.26, 0.6, 1.24의 각 조건에서 과잉 공기비(λ)를 0.9~1.3의 범위로 변경하면서 NO의 발생량을 측정 한 결과를 기준산소농도 3%로 환산하여 나타낸 것이다. 선회도가 0과 0.26인 경우가 0.6과 1.24인 경우에 비하여 상대적으로 NO 발생량이 높게 나타났다. 선회도가 0일 경우는 선회도가 0.26인 경우에 비하여 $\lambda = 1.0 \sim 1.3$ 까지의 영역에서 평균 15ppm 정도 높게 나타났으며 선회도가 0.6, 1.24에 비하여는 평균 30ppm 정도 높게 나타났다. 이것은 선회도가 낮을 경우 화염중의 국부

고온역이 존재하고 화염의 두께가 크기 때문에 화염으로부터의 방열성이 저하되어 thermal NOx의 발생량이 증가하는 것으로 판단되며 선회도가 높을 경우는 화염이 버너타일을 따라 평면을 유지하게 되어 화염층이 얇고 화염폭이 커지게 되어 화염의 방열성이 증대됨으로 화염중의 국부 고온역 형성을 억제하며 연소실내의 연소가스가 연소역으로 재순환되어 유입되는 양이 증가하기 때문에 연소역에서 상대적인 산소농도의 저하로 NO의 발생이 적은 것으로 사료된다. λ 의 변화에 따른 NO의 발생량은 $\lambda=0.9$ 인 연료과잉 상태에서는 전체의 선회도 범위에서 10ppm 정도로 나타났다. 이것은 NO의 발생 영향인자인 고온 연소역에서의 산소농도의 저하 때문인 것으로 파악된다. $\lambda=1.0$ 이상의 영역에서는 선회도가 0, 0.26인 경우 산소농도가 증가하여 NO발생에 지배적으로 영향을 미치기 때문에 NO의 발생량이 지속적으로 증가하나 선회도가 0.6, 1.24인 경우는 λ 의 증가에도 불구하고 배가스 재순환 영역이 확대되어 앞서 언급한 상대적 산소농도의 저하로 NO의 발생량은 큰 변화가 없이 일정하게 나타났다.

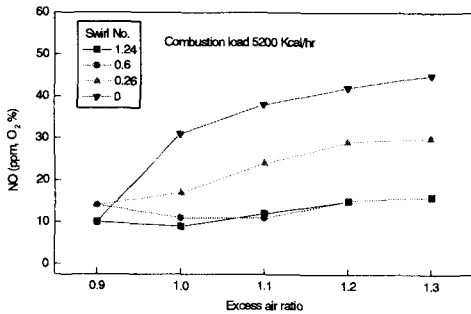


Fig. 9 Comparison of NO formation with excess air ratio in each swirl number.

4. 결론

이상의 평면화염 버너에 있어서 유동 및 연소 특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 안정한 평면화염을 형성하기 위한 공기선회기의 선회도는 0.6이상으로 선회도가 커질수록 배가스 자기 재순환이 넓은 영역에 걸쳐 분포하

였다.

(2) 화염의 blow off 한계는 동일 선회도에서 연소 부하량이 증가할수록 커지며 선회도 0.28까지는 선회도의 증가에 따라 blow off 한계가 커지나 0.28이상에서는 작아지는 것으로 나타났다.

(3) 화염의 형상은 선회도 0.26까지는 축 방향으로 화염이 형성되고 0.41에서 평면화염으로 전이가 나타나서 0.6이상에서 완전한 평면화염이 형성됨을 보였다.

(4) 온도분포는 평면화염이 형성되지 않는 선회도 0, 0.26에서는 버너타일의 중심부에서 온도가 가장 높게 나타나고 반경방향과 축 방향으로 거리가 멀어질수록 감소하는 경향이 나타났다. 이에 비하여 평면화염을 형성하는 선회도 0.6, 1.24에서는 반경방향, 축 방향 모두에서 온도분포가 일정한 경향을 보였다.

(5) NO특성은 모든 선회도가 0일 때 가장 높게 나타나고 선회도가 0.6까지 점차적으로 감소하다가 이상의 선회도에서는 거의 일정한 경향을 보였다.

후기

본 논문은 에너지 절약과제기술개발의 일환으로 에너지관리공단 및 (주)케너텍의 지원하에 과제의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김시욱, 김지윤, 1992, "연소공학", 집문당, pp.69-135
- (2) 일본기계학회, 1990, "연소설계", pp 9-30,
- (3) K. Hanamura and R.Echigo, 1991, An analysis of flame stabilization mechanism in radiation burners, *Warmeund Stoffubertragung*. Vol.26, pp.377-383
- (4) S. Schneider and R.L. Himmer, 1985, Gas-fired infrared burners an expanding technology, *A/G/S Newsletter*, pp.3-5
- (5) Kent, J.H and Wagner, H.Gg., 1984, Why do diffusion flames emit smoke, *Combust. Sci. Tech.*, Vol.41, pp.245-269