

단일 프레임 이중 노출법을 이용한 Flat Flame Burner의 유동장 특성에 관한 연구

정용기* · 전충환** · 장영준**

Flowfield Characteristic of a Flat Flame Burner using One Frame Double Exposure Method

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

Key Words: Flat Flame Burner(평면 화염 버너), Swirl angle(선회각), Recirculation(재순환)

Abstract

Recently, Flat flame burners are highlighted in high-load burners. Our study contains flow field analysis of a flat flame burner. In this paper, We analyzed the direction and magnitude of the velocity in a round tile type burner with swirl angles, 10°, 30°, 50°. In the case of swirl angle 10°, because axial momentum is larger than radial momentum, Recirculation region was weakly developed. In the case of swirl angle 50°, Flow in front of the tile is distributed for radial direction. And Recirculation region is large. So, We expect that the radiation can be transmitted from tiles and the recirculation region may cause NO_x reduction.

1. 서 론

최근 대두되고 있는 에너지 절약형 연소기술로서는 고복사 연소, 축열 연소, 촉매 연소, 산소부하 연소기술들이 있는데, 이들 기술중 고복사 연소는 적열된 버너의 표면 및 노벽면으로부터 방출되는 높은 복사에너지를 이용함으로써 피열체에 신속한 열전달과 균일 가열이 가능하며 가열시간의 단축 및 열효율의 향상시킬 수 있다.

고복사 연소기중 Flat Flame Burner는 연료,

공기 혼합가스의 강한 선회를 수반하여 연소 시작 전 단계에서 완전한 예혼합이 이루어지므로 이론 당량비 부근에서도 완전연소가 가능하다. 또한 버너화염 전면에 후류 형성에 의한 배기가스 재순환영역이 존재하여 NO_x를 저감시킬 수 있다.

이런 선회류에 대한 유동가시화, 수치해석등 여러 실험적 측정 및 연구가 수행되었으나 선회류 현상은 3차원 난류로서 그 유동의 복잡성과 불규칙성으로 인해 현재까지도 선회 메카니즘에 대한 정확한 이론 및 실험자료가 불충분하다. 특히 고부하 연소에 사용되는 강선회류는 화염 안정 및 길이에 직접적인 영향을 미치는 재순환유동을 발생하는데 재순환되는 영역의 크기는 연소기의 기하학적인 구조와 밀접한 관계에 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 대학원 기계공학부

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig.1은 Flat Flame burner의 선회각에 따른 Round Tile 전면부의 유동장을 측정하기 위한 실험장치도이다. 주요 구성 부분으로는 광학장치부, 입자공급부, 화상취득장치와 유동장 해석을 위한 이미지 처리부로 구성되어 있다.

본 연구에서는 입자가 부유된 유동에 평행 레이저 sheet 빔을 조사하여 단일 프레임 이중 노출방식으로 이미지를 얻어 유동장을 해석하는 방법을 이용하였으며, 실제 버너와 동일한 형상의 아크릴 재질의 버너에 여러 가지 선회각(10° , 30° , 50°)의 노즐을 사용하여 연소기 주변의 유동장 특성을 관찰하였다.

광학장치는 수냉식 5W Ar-ion 레이저 (Coherent사)를 사용하였고, 가시 영역 514.5nm의 파장을 갖는 레이저 빔을 450mm의 초점거리를 갖는 원통형 렌즈를 통과하게끔 하여 평행 sheet 빔을 생성시켰다. 이 sheet 빔을 버너 출구의 상부에 조사하여 유동장을 관찰하였다.

산란 입자는 평균 직경이 $1\mu\text{m}$ 이하의 Al_2O_3 를 사용하였고 입자를 일정하게 공급하고 수밀도를 조절하기 위해 밸브와 바이 패스를 사용하였다.

2.2 버너와 선회기 형상 및 측정 영역

버너의 유동현상을 관찰하기 위해 버너의 재질은 아크릴로 제작하였으며, LPG 연소시 연소

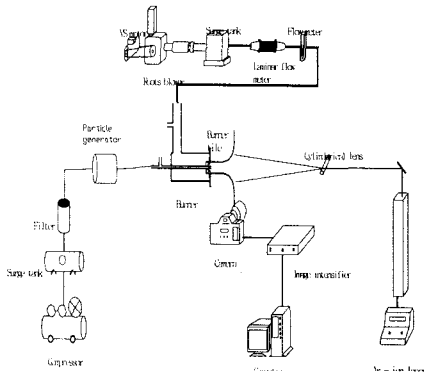


Fig.1 Schematic of experimental apparatus for measurement of flowfield

열량 3000Kcal/h에相当하는 scale를 가지고 있다. 크기는 Tile부 직경 246mm, throat 직경 34mm, throat 직관부 길이 65mm, 곡을 반경 56mm이다. Tile 형상은 throat 부위에서 점차적으로 직경이 확대되는 방사형모양을 하고 있다.

Fig.2는 버너 내부로 주입된 공기류에 선회를 가하기 위한 베인 형태의 축방향 선회기를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 난류 강도에 따른 재순환 영역 유동장의 크기를 알아보기 위해 10° , 30° , 50° 의 선회각을 가지고 있는 선회기를 사용하였으며, 선회기 출구 단면적은 $3\times 2\text{mm}$ 인 6개의 직사각형 형태로 구성되어 있다.

Fig.3은 화상을 취득하기 위한 측정 영역을 나타낸 것으로 중심으로부터 아래로 45mm 떨어진 지점에서 대칭 단면의 상부를 측정하였으며(180×180), 이중노출이 가능하도록 4개의 함수 발생기와 3개의 카운터 회로, 그리고 역전회로를 이용하여 시퀀스를 제어하였다. 획득된 유동 이미지는 필름 스캐너로 디지털 이미지로 변환하여 512×512 pixel의 해상도로 저장된다.

2.3 유속 산출 방법 및 타당성 검증

단일 프레임 이중노출법은 한 장의 필름에 시퀀스제어를 통해 이중노출시킨 입자영상이 담긴 필름을 현상한 후 스캐너를 이용하여 영상 디지털 정보를 얻어내는 방법이다.

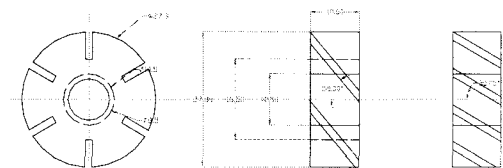


Fig.2 Detail of swirler

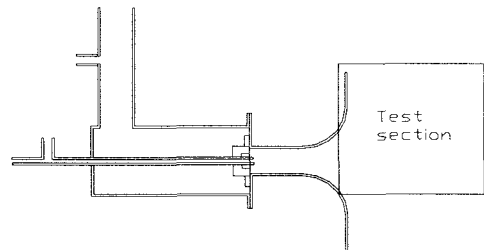


Fig.3 Schematic diagram of test section in front of burner

Fig.4는 위와 같은 과정을 도식화한 것이다. 먼저, 전처리 과정으로 원시화상은 노이즈와 입자의 불분명한 경계의 오차를 포함하고 있으므로 획득한 원시화상은 필름 스케너를 통해 265 gray level을 갖는 그림 파일로 변환시킨후, 경계를 명확하게 하기 위해 contrast, thresholding시킨 개선된 이미지를 여러개의 미소구간으로 나누고, 각각의 미소구간에서 gray level이 255와 0의 값만 갖도록 thresholding을 행하여 산란 입자 이미지와 배경을 구분한다. Thresholding한 화상의 데이터는 이진 데이터(Binary data)이므로, 이 데이터에서 입자가 갖는 값의 수로 계산함으로써 면적을 구해내어, 이 면적의 도심을 구한다. 주어진 시퀀스와 같이 동일한 면적비를 확인하여 그 도심으로부터 시작점과 끝점의 도심이 구해지면 각 도심을 연결함으로써 속도 벡터를 구한다. 계산되어진 속도 벡터에 거리 역수보간법을 적용시키면 전체 유동장에 대한 속도벡터를 구할 수 있다.

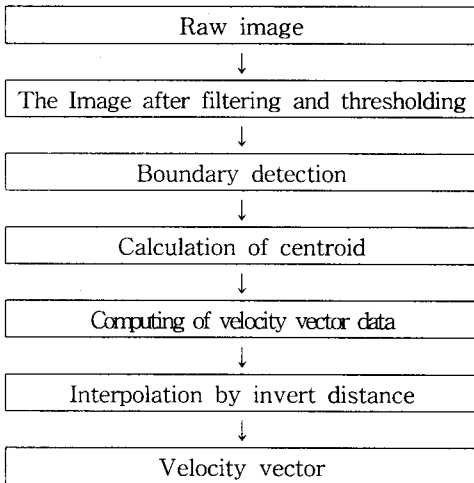


Fig.4 Block diagram of procedure of single frame double exposure method

속도벡터 크기와 방향계산 결과에 대한 신뢰도를 검증하기 위해 콘트롤러로 회전 속도를 조절할 수 있는 초퍼를 사용하였다. 초퍼에 입자를 부착한 후 콘트롤러가 정확한지를 스트로보스코프로 검증하고, 주어진 속도에 따라 입자의 입자에 대한 이미지를 획득하였다. 그 이미지로부터 속도의 크기를 계산하고 이 속도와 실제 속도의 크기를 비교하여 오차를 측정하였다.

Fig.5는 초퍼를 이용한 실제 속도와 계산속도와의 차이를 나타내었다. 실제 속도와 계산속도와의 차이는 곡률 반경에 의한 오차로써 초퍼에서는 호의 경로로 이동하지만 계산상으로는 Pixel간 이동인 현의 이동으로 인한 오차라고 생각되어진다.

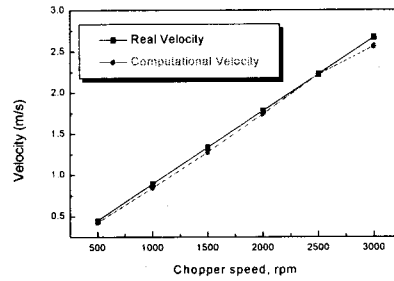


Fig.5 Comparison of computational velocity and real velocity

3. 결과 및 고찰

3.1 Smoke를 이용한 유동장 분석

버너, 공기공급장치는 동일한 장치를 사용하였고, Smoke를 발생시키기 위해 Smoke generator를 부착하였다.

Smoke를 버너의 연소용 공기 인입부로 공급하여 연소용 공기와 혼합이 된후 공기노즐로 분사되도록 하였다. 버너는 분류공기가 상부로 향하도록 수직으로 설치 하였다. 버너의 유동현상에 대한 직접사진은 Sheet형 Laser beam을 버너의 유동장에 조사하여 Smoke 입자로부터 산란되는 광을 Image intensifier로 증폭하여 Still camera로 촬영하였다.

Fig.6은 공기유량을 40 liter/min 로 버너에 공급하여 노즐분사 유속 13.5m/sec, throat 유속 0.73 m/sec 일 때, 선회각 10°, 30°, 50°로 변경하면서 smoke의 유동을 직접사진으로 촬영한 결과이다. Flat flame burner를 수직으로 설치하여 버너의 축 중심에서 반경방향으로 한쪽면에 대하여 유동의 단면을 촬영하였다. 이것은 버너의 형상이 대칭적이기 때문에 버너에서 일어나는 유체의 유동장 또한 대칭적인 것으로 가정을 하였기 때문이다.

직접사진의 결과로 선회각이 10° (a)일 경우는 주 유동이 버너의 축중심으로 직진하고 타일의 끝단부에서 와류가 형성되어 주 유동장으로 흡인되는 현상을 나타내고 있다. 이 결과는 유동이 버너타일을 따라 반경방향으로 흐르지 못하기 때문에 실제의 연소시 Flat Flame을 형성할 수 없다는 것을 나타내고 있다.

선회각이 30° (b)의 경우는 주 유동이 반경방향으로 일어나고 있고 버너의 중심부에 역류하는 약한 재순환류가 존재함을 나타내고 있다. 그러나 반경방향으로의 운동량이 적기 때문에 버너타일을 따라 끝까지 흐르지 못하고 있다. 또한 버너타일의 끝단부에서는 반경방향 운동량이 공기와의 마찰로 점차 소멸되어가는 것을 보여주고 있다.

선회각이 50° (c)의 경우는 반경방향으로의 운동량이 축방향으로의 운동량 보다 훨씬 크기 때문에 주 유동이 버너타일을 따라 형성되고 있으며 버너타일의 끝단부에서 와류현상은 나타나지 않는다. 버너의 중심부에는 상당히 넓게 분포하여 역류하는 재순환류가 강하게 일어나고 있다.

이 결과로부터 선회각이 50° 이상의 유동에서는 반경방향으로의 공기의 운동량이 크기 때문에 버너타일을 따라 Flat Flame이 형성될 수 있음을 알 수 있다. 즉 선회각이 증가할수록 반경방향의 운동량은 증가하게 되고 버너중심부의 재순환류는 강하고 넓게 분포하게 된다.

3.2 단일 프레임 이중노출법을 이용한 유속 특성

앞 실험에서 했던 동일한 조건하에서, 공기 선회각을 10°, 30°, 50° 로 변경하면서 공기 선회각

이 유속 분포를 단일 프레임 이중노출법을 이용하여 실험을 수행하였다.

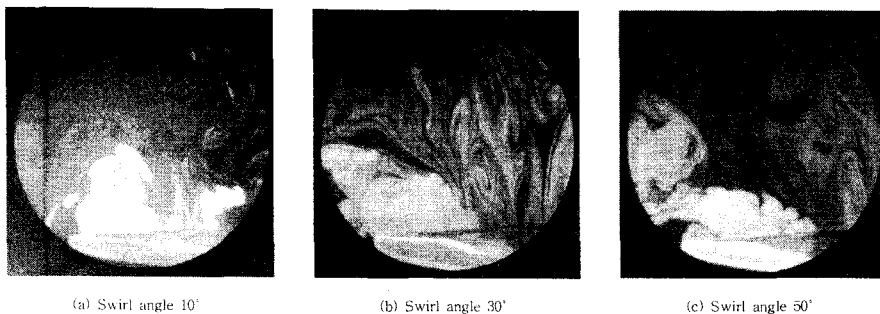
Fig.7, 8, 9에 (a)는 Raw image로부터 획득한 속도 벡터이고 (b)는 이것으로부터 거리역수보간법을 써서 전체 유동장의 속도 벡터들을 나타낸 것이다.

선회각이 10° 인 경우(Fig.7)는 유동장에서 연소기 벽면을 타고 흐르는 속도의 최대 크기가 0.80m/s 정도이고 최저속도는 0.05m/s 정도로 나타났다. 유동장의 왼쪽 상단부에서는 추적입자의 부족으로 Round tile 전면에 비하여 속도 산출량이 적게 나타나고 있으며, 전체적으로 유동의 확산각이 작고, 그 이후에는 점차 소멸되었다. 재순환 영역도 작게 나타났다.

선회각이 30° 인 경우(Fig.8)는 10° 에 비하여 최고속도가 0.90m/s 정도로 약간 증가하였다고 유동의 확산각이 더 크고 길어지며 재순환 영역이 더 넓게 분포하였다.

선회각이 50° 인 경우(Fig.9)는 10°, 30° 보다 원심력에 의해서 대부분의 공기는 연소실 벽면을 타고 흐르는 유동장을 관찰할 수 있으며 재순환 영역은 더욱더 크게 되는 영역을 나타내었다. 이것은 압력차에 의하여 연소실 중앙부로 재순환 영역이 형성된 것으로 보인다. 최고 속도도 반경 방향을 향하는 속도 성분이 1.07m/s 정도로 가장 크게 나타났다.

Fig. 10은 속도 분포 영역을 표시한 것으로 속도가 거의 0인 영역, 즉 반경방향 유동과 재순환 영역의 유동이 부딪치는 중심영역은 선회각이 10° 인 경우는 거의 노즐 선단에 작게 형성되었으며, 선회각이 30°, 50° 로 증가할수록 영역이 커지고 반경방향으로의 각도가 커짐을 볼 수 있다.

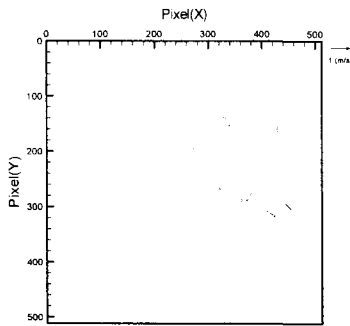


(a) Swirl angle 10°

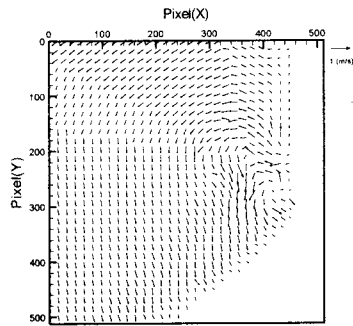
(b) Swirl angle 30°

(c) Swirl angle 50°

Fig.6 Photograph of smoke (10° , 30° , 50°)

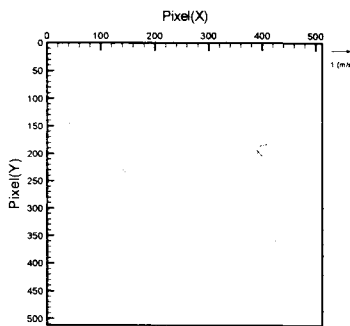


(a) Velocity vector

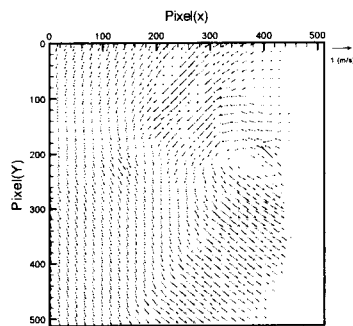


(b) Interpolated velocity vector

Fig.7 Velocity vector in swirl angle 10°

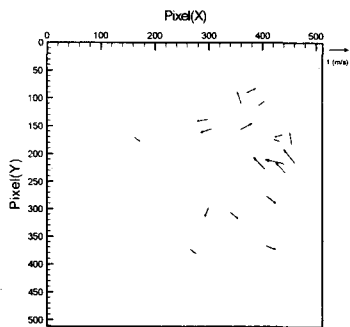


(a) Velocity vector

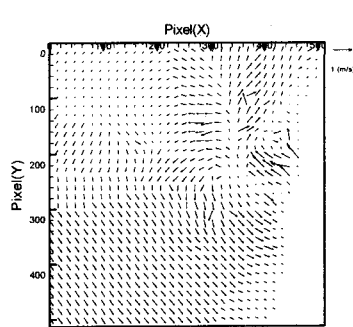


(b) Interpolated velocity vector

Fig.8 Velocity vector in swirl angle 30°

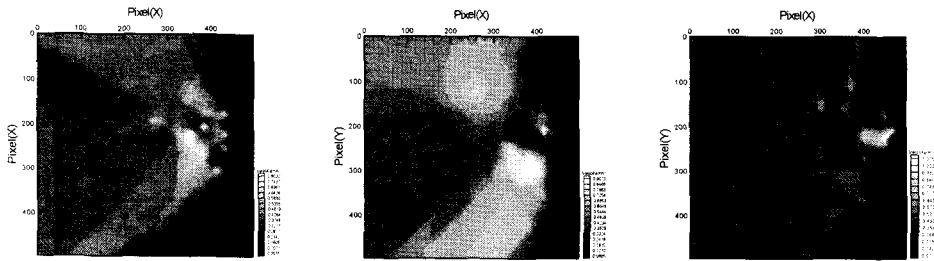


(a) Velocity vector



(b) Interpolated velocity vector

Fig.9 Velocity vector in swirl angle 50°



(a) Swirl angle 10°

(b) Swirl angle 30°

(c) Swirl angle 50°

Fig.10 Velocity distribution in swirl angle 10° ,30° ,50°

4. 결론

단일 프레임 이중노출법을 이용해서 Flat Flame burner에서의 각도의 따른 유동장 패턴을 파악함으로써 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. Smoke 유동 패턴 사진을 통해 선회각이 50° 이상이 되면 원심력에 의해 대부분의 공기는 연소실 벽면을 따라 유동하고, 재순환영역이 크게 나타남을 볼 수 있었다.
 2. 선회각이 50° 인 경우 최대속도, 최소속도가 각각 1.07m/s, 0.07m/s 정도로 나타났으며 선회각이 크면 클수록 최대속도가 증가하는 것으로 나타났다. 반경방향 유동과 재순환영역의 유동이 부딪치는 중심영역은 선회각이 10° , 30° , 50° 로 증가할수록 반경방향으로의 각도가 커지면서 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있었다.
 3. 이 실험의 결과로 선회각이 50° 이상이 되면 반경방향으로의 속도가 10° , 30° 의 선회각일 때보다 속도가 증가하고, Round Tile 벽면을 따라 유동하며, 재순환 영역이 크게 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그러므로 높은 복사 에너지를 이용하여 피열체에 신속한 열전달과 균일 가열이 가능하고, 배기가스가 저감될 것으로 예상된다.
- 이상에서 언급한 시스템으로 Burner에서의 유동장 해석이 가능한 것으로 예상되고 다른 유동장 분석 시스템과의 비교분석으로 많은 검토작업이 필요하고, 이 알고리즘과 시스템으로 다른 연소장에서의 유동해석이 가능할 것으로 예상된다.

후기

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

참고문헌

1. Chaturvedi, M.C., "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansions", Proceedings, J. of the Hydraulics Division, ASCE, VOL. 89, No. HY3, pp. 61-92, 1963,
2. Yoon, H.K and Lilley, D.G., "Further Time-Mean Measurements in Confined Swirling Flows", AIAA Journal, Vol. 22, No.4, pp. 514-515, 1984,
3. Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L., "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers", J. of The Institute of Fuel, Vol.41, pp. 238-240, 1976
4. R.J. Adirian, " Particle image techniques for experimental fluid mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp. 261-304, 1991
5. Sang-Nam Lee and Hyung-Kee Yoon, "Flowfield Characteristics of a High load Combustor", pp. 58-63, 1996