

Gun식 가스버너의 연소실내 난류 선회유동장 고찰

김 장 권[†]

(2008년 10월 20일 접수, 2009년 7월 21일 수정, 2009년 7월 21일 심사완료)

Investigation on the Turbulent Swirling Flow Field within the Combustion Chamber of a Gun-Type Gas Burner

Jang Kweon Kim

Key Words: Combustion Chamber(연소실), Gun-Type Gas Burner(GTGB, 건식가스버너), Hot-Wire Anemometer(HWA, 열선풍속계), Slit(슬릿), Subsonic Wind Tunnel(아음속풍동), Swirl Flow(스월유동), Swirl Vane(스월베인), X-Type Hot-Wire Probe(X-probe, X형열선프로브)

Abstract

The turbulent swirling flow field characteristics of a gun-type gas burner with a combustion chamber were investigated under the cold flow condition. The velocities and turbulent quantities were measured by hot-wire anemometer system with an X-type probe. The turbulent swirling flow field in the edge of a jet seems to cause a recirculation flow from downstream to upstream due to the unbalance of static pressure between a main jet flow and a chamber wall. Moreover, because the recirculation flow seems to expand the main jet flow to the radial and to shorten it to the axial, the turbulent swirling flow field with a chamber increases a radial momentum but decreases an axial as compared with the case without a chamber from the range of about $X/R=1.5$. As a result, these phenomena can be seen through all mean velocities, turbulent kinetic energy and turbulent shear stresses. All physical quantities obtained around the slits, however, show the similar magnitude and profiles as the case without a chamber within the range of about $X/R=1.0$.

1. 서 론

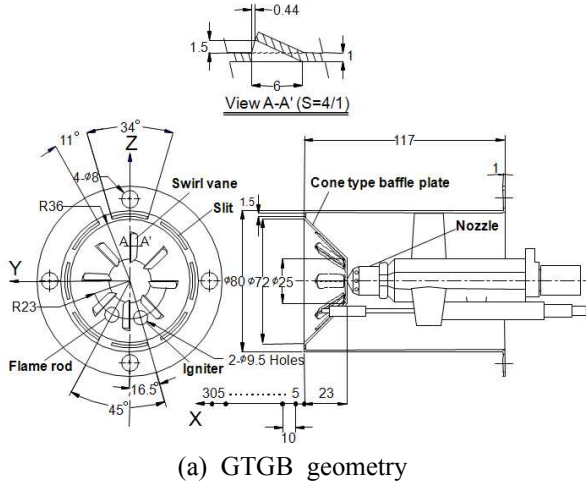
스월유동의 거동은 유선곡률, 원심가속 및 난류전달 등의 영향을 받아 유동 중심부에서 유동 축방향으로 역압력기울기를 발생시키므로, 유동 축방향의 속도성분이 급속히 감소되어 와(vortex) 분열을 일으키고, 역유동을 수반하는 재순환영역과 높은 난류를 형성시킨다고 잘 알려져 있다.^(1~5) 또 스월유동은 원심력에 의한 나선형의 간섭들에 의해 유동이 불안정해지므로, 화염면을 형성하는 재순환영역의 경계면에서 Entrainment을 및 연료

와 공기의 혼합을 급속도로 증대시켜 큰 확산능력을 제공하기 때문에, 결과적으로 화염의 길이를 짧게 하고, 화염을 안정화시켜 회박연소를 가능케 하는 효과가 있다고 알려져 있다.^(4~8) 이 같은 사실들을 Beer 등⁽¹⁾과 Lefebvre⁽²⁾는 동축분류버너(coaxial jet burner)에서, 그리고 Syred 등⁽³⁾은 스월연소기(swirl combustor)에서 각각 확인한 바가 있다.

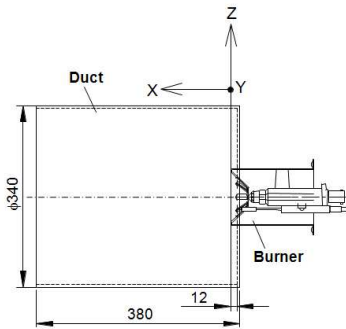
또, 스월유동은 연소과정으로부터 배출된 오염물질을 제어하거나 연소성능을 증가시키는 데에 있어 중심적인 역할을 하기 때문에, 가스터빈이나 산업용 보일러 및 로(furnace) 등에서 널리 이용되고 있다.^(4~8)

본 연구에서는 비교적 약선회 가스버너로 판단되는 기하학적 형상 스월수가 0.34, 스월베인의

[†] 회원, 군산대학교 동력기계시스템공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr
TEL : (063)469-1848 FAX : (063)469-1841



(a) GTGB geometry



(b) Chamber geometry

Fig. 1 Configuration of a GTGB and a duct

각도가 24°인 Gun식 가스버너(GTGB)⁽⁹⁻¹¹⁾ 출구에 원통형 연소실을 부착하여 비 연소조건하에서 연소실내 가스버너의 난류 선회유동장 특성을 X형 열선프로브(X-probe)를 사용하여 측정하였다.

한편, Beer 등⁽¹⁾과 Van der Lans 등⁽¹²⁾은 비 연소상태인 등온조건에서의 유동(cold flow)과 연소유동(hot flow) 사이에서 유동패턴들의 변화가 존재하더라도 관성력 대비 원심력의 비율이 일정하게 유지되는 한, 이들 사이에는 강한 유사성이 존재한다고 하였다. 따라서 등온상태의 유동조건에서 각종 물리적인 측정치는 모멘텀 비율에서의 차이가 고려될 때, 실제 연소기에서의 유동을 묘사하는데 훌륭한 자료들로 볼 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 비 연소조건인 등온조건에서 GTGB의 연소실내 난류 스윙유동장이 연소실로 인해 외부공기의 Entrainment가 제거되었을 때, 스윙유동장의 각종 물리적 특성들이 어떻게 영향을 받는가를 정확히 파악하는데 있으며, 이들을 향후 연소실을 설계하는데 있어 기초자료나 CFD에서 필요로 하는 비교자료로서 활용

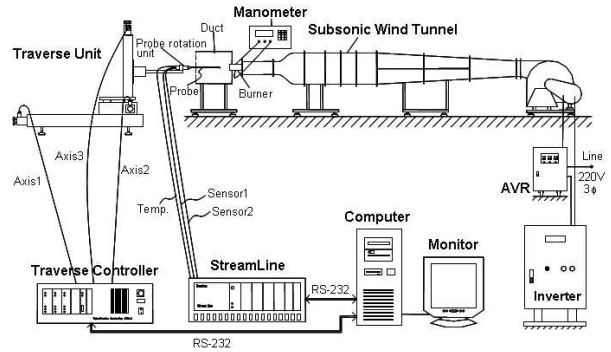


Fig. 2 Experimental apparatus diagram including hot-wire anemometer system

하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 GTGB와 연소실의 상세 구조를 나타내는 그림이다. 이 버너는 난방능력 15,000 kcal/hr의 가스난방기에 적용하고자 개발한 버너이다. 이 가스버너는 원통부 선단에 45°로 경사진 대형 배플판(baffle plate)과 배플판 외주에 45° 간격으로 배치된 8개의 공기분출 슬릿들로 구성되어 있다. 이 배플판은 중심에서 직경 25 mm까지는 막혀 있으며, 그 이후 직경 57.8 mm까지는 스윙베인 8개가 45° 간격으로 배치되어 있다. 한편, 외부공기를 차단하기 위해서 사용한 연소실은 투명한 아크릴재질로 외부직경이 340 mm이고, 길이가 380 mm이며, 두께가 5 mm인 원통형이다. 연소실 출구 쪽은 개방되어 있으며, 입구 쪽은 중심부에 가스버너의 선단부가 부착되는 공간 이외에는 모두 막혀 있으며, 본 연구에서는 버너 선단부가 연소실 안쪽으로 12 mm만큼 돌출되도록 설치하였다.

Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 연결된 GTGB 실험장치로부터 열선풍속계(HWA)를 이용하여 3차원 난류유동장을 측정하는 그림이다. 본 연구에서 사용한 아음속풍동은 5마력 AC모터를 갖는 원심형 송풍기와 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 각각 구성되어 있다. 풍동의 속도는 모터의 회전수를 인버터(inverter)로 제어하여 조정하였다. 시험부의 크기는 각각 폭 220 mm, 높이 220 mm, 길이 410 mm이며, 풍동의 최대풍속은 시험부에서 약 35 m/s이다. 또, 시험부 내의 난류

강도는 벽면으로부터 20 mm 떨어진 중심부 유동장에서 평균유속이 약 13 m/s일 때, 약 0.02% 이하의 크기를 보였다. 한편, 난류 유동장을 측정하기 위해서 사용한 3차원 HWA 시스템(Dantec 90N10 Streamline)은 정온도형 HWA와 속도 및 방향교정기(Dantec 90H01 & 90H02) 및 3차원 자동이송장치(Dantec 41T50 & 41T75) 그리고 컴퓨터로 구성되어 있으며, 모두 RS-232C에 의해 온라인(on-line)으로 연결되어 있다. 특히 속도 교정기(calibrator)에는 유효압력이 10 kg/cm²까지 발휘되는 공기압축기가 연결되어 있다. 또 압력 및 속도측정에는 정밀도 ±0.25%를 갖는 압력계(Furness, FC510)를 사용하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 3차원 유속 측정에 X-probe(Dantec, 55R51)를 사용하였으며, 실험실에서 미소한 온도변화가 발생하더라도 이에 대응하기 위해 속도보상용 온도센서(Dantec, 90P20)를 함께 사용하였다.

본 연구에서 사용한 아음속풍동의 속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력탭(tap)에서 실제 연소용 공기로 사용되는 공기량 450 l/min을 공급하였을 때 얻어지는 압력 164 Pa를 기준으로 하였다. 또 A/D 변환기의 샘플링(sampling) 주파수는 채널당 10 kHz, 샘플링 수는 채널당 102,400개, 신호조정기의 저주파통과필터(low-pass filter)는 30 kHz로 각각 설정하여 사용하였다. X-probe의 속도 교정에는 최대속도 30 m/s까지 실시하였으며, 그 결과를 4차 다항식으로 나타내었을 때, ±1% 이하의 정확도를 얻었다. 또, 회전유동에 대한 각 열선의 유동간섭영향을 제거하고자 방향성에 대한 교정은 10 m/s의 속도에서 ±45°에 걸쳐 5° 간격으로 실시한 결과, 각 열선에 대한 평균 요(yaw)계수들은 각각 $k_1^2=0.057$ 과 $k_2^2=0.068$ 이다. 이 모든 과정은 “Streamware”라는 소프트웨어에 의해 자동으로 처리하였다.^(13,14)

한편, GTGB는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 버너 선단부인 콘형 배플판 상에 화염봉(flame rod)과 점화플러그(igniter)가 장착되어 있어, 본 연구에서는 이들을 제거하고, 그 구멍들을 접착테이프(tape)로 막아 사용하였다. 이때 X-probe의 측정위치는 버너 형상이 축대칭을 이루고 있기 때문에, 주어진 풍량 조건에서 프로브를 Z=0인 X-Y평면

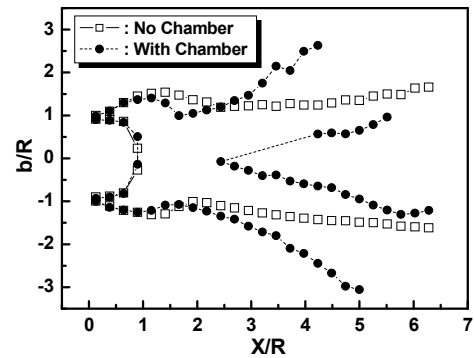


Fig. 3 Variation of half width

(수평면)내에서 X방향으로는 프로브를 보호하기 위해 버너 선단으로부터 5 mm 떨어진 위치부터 시작하여 10 mm씩 305 mm까지, 그리고 Y방향으로는 원점을 중심으로 -70 mm에서 +70 mm까지 5 mm 간격으로 설정하였다. 또, Y-Z평면(횡단면) 내에서는 X축 방향의 거리 30 mm와 55 mm에서 반지름(R) 방향으로는 0 mm에서 70 mm까지 5 mm간격으로, 회전각(θ) 방향으로는 0°에서 355°까지 5° 간격으로 프로브의 위치를 각각 설정하였다. 특히, 스윙베인 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿부에서 분출되는 빠른 속도는 1 mm씩 프로브를 미세하게 이송하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동장의 반폭 변화

Fig. 3은 연소실 유무에 따라 주 분류(jet)의 반폭(half-width, b)을 나타낸 그림이다. 여기서 반폭은 X축방향 평균속도성분의 절반 크기의 위치로 정의하였다. 약 X/R=1.0 이전의 주 분류영역에서는 반폭의 분포가 거의 유사하게 나타나, 이 영역에서는 연소실의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 반폭의 분포가 실제 버너를 가지고 속도를 측정하여 얻어진 관계로 버너 중심선(b=0)상에 대하여 비대칭성을 보여주므로 정확한 위치를 추정할 수는 없지만, 약 X/R=1.0 이후부터 서서히 차이를 보이기 시작하다가 약 X/R=2.5 이후에서는 연소실의 존재로 인해 주 분류가 반경방향으로 크게 확대되는 반면, 유동축 방향에서는 크게 소멸되는 현상을 볼 수 있다. 그 결과 유동중심부에서 분류반폭이 동일한 X/R의 위치에서도 2개 이상이 형성되고 있음을 알 수 있다.

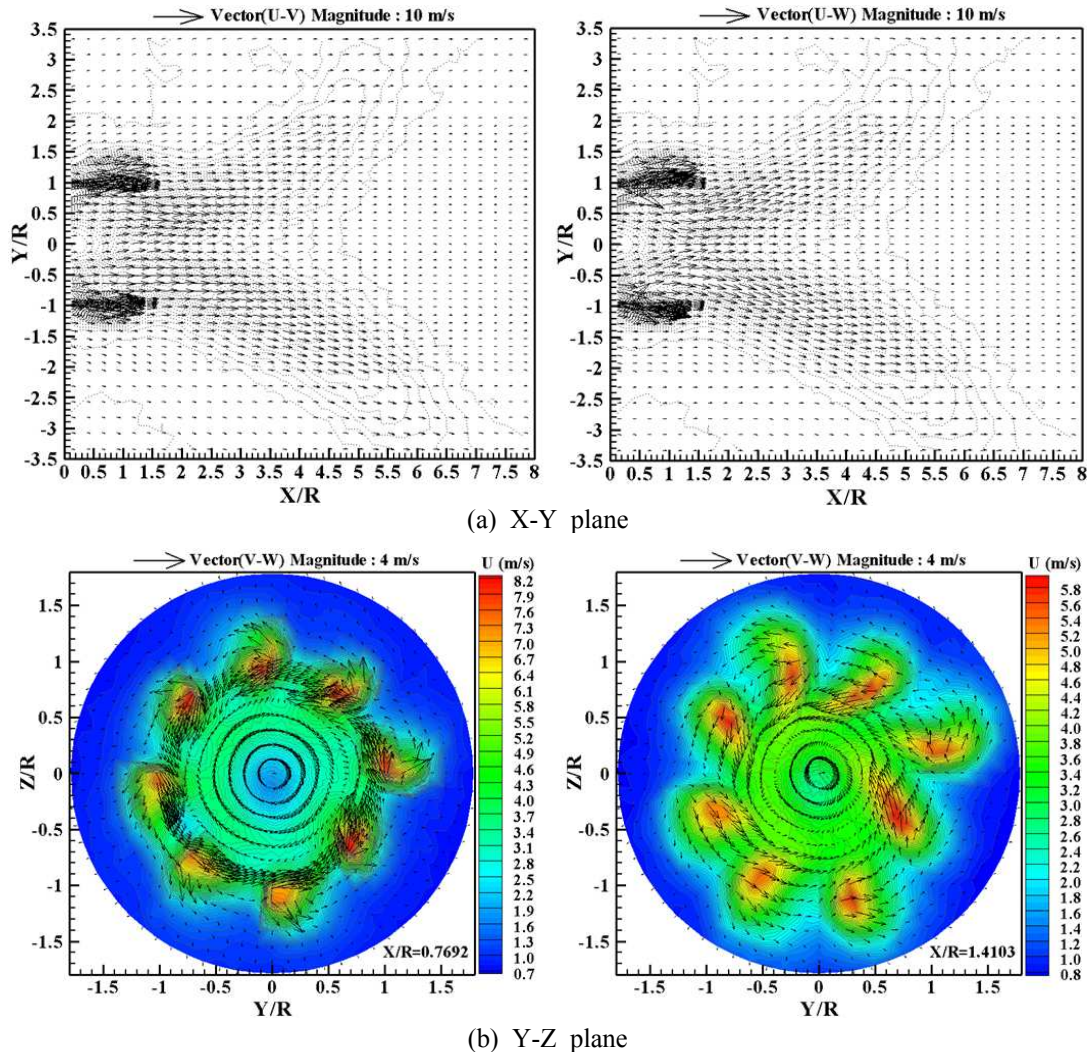


Fig. 4 Vector and contour plots of GTGB

3.2 벡터 및 평균속도분포

Fig. 4는 연소실 내의 유동장을 각각 X-Y평면과 Y-Z평면 내에서 측정된 각 방향 평균속도성분들을 가지고 벡터분포로 나타낸 그림들이다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 비교적 초기영역에 해당하는 약 $X/R=1.0$ 이전의 주 분류 영역에서는 슬릿부의 빠른 제트유동이 45° 로 경사진 콘형 배플판에 부착된 스월베인의 회전유동을 반경방향으로 확대되지 못하도록 에워싸기 때문에, 슬릿부를 중심으로 빠른 속도분포가 형성되고 있다. 반면, 스월베인의 회전유동은 슬릿부의 빠른 제트유동에 가로막혀 버너 외측으로는 확장하지 못하면서 $Y=Z=0$ 인 버너 중심선상을 향해 충돌하여 X축방향으로 발달하며, 그 충돌에 의한 관성력이 약 $X/R=1.5$ 근처까지 영향을 미치는 것으로 보인다.

다. 그러나 약 $X/R=1.5$ 이후부터는 연소실의 영향으로 슬릿부의 제트 속도가 상대적으로 크게 줄어들어 스월베인의 회전유동을 충분히 감싸지 못하므로, X축방향의 거리가 증가함에 따라 버너 중심선상에서의 벡터분포는 점차 크기가 줄어들며, 그 줄어드는 영역도 반경방향으로 점차 확대되어 나타난다. 스월베인부에서 형성된 벡터의 분포 역시 반경방향으로 현저히 확산되어 약 $X/R=5.5$ 이후에서는 전 영역에 걸쳐 거의 무시할 수 있는 작은 크기의 벡터분포를 보여주고 있다.

따라서 연소실은 축방향모멘텀을 현저히 감소시켜 유동장의 길이를 크게 줄이는 반면, 접선(회전)방향의 모멘텀은 현저히 증가시켜 유동장의 폭을 크게 늘어나게 한다. 이 같은 원인은 연소실이 존재함으로써 인해 빠른 제트유동에 의한 외부공기가 주 분류로 유입하는 Entrainment현상이

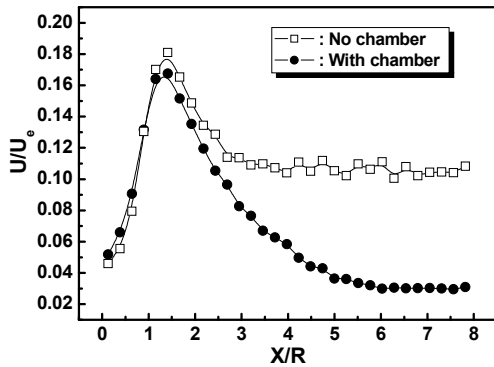
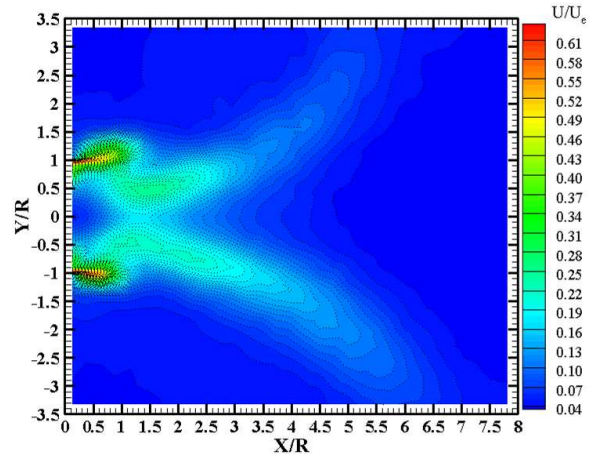


Fig. 5 Axial mean velocity profiles along the centerline

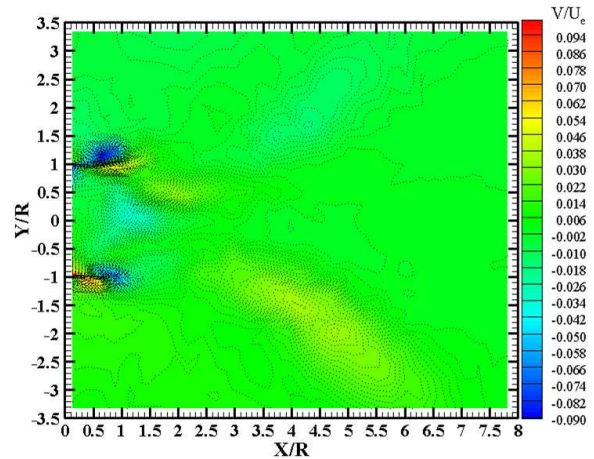
차단되어, 자체 분사된 제트유동 주변에서 정압력의 변동이 발생한 결과로 볼 수 있다. 즉, 버너 출구를 빠져나온 제트유동장에는 정압이 음(-)의 값으로 낮아지는 반면, 제트가 닿지 않는 상류측의 제트와 연소실 벽 사이 공간에서는 정압이 양(+)압으로 상대적으로 높게 형성된다. 따라서 이 높은 정압은 크기차이로 인해 주변의 분류를 상류의 주 분류로 다시 유입시키려는 재순환유동의 경향을 띄게 된다. 결국, 이 재순환유동은 반경방향으로 확산하려는 스월베인의 회전유동을 더욱더 연소실 벽 쪽으로 끌어당기게 하는 경향이 있으므로, 축방향모멘텀은 현저히 줄어드는 반면, 접선방향의 모멘텀은 크게 증가된다고 볼 수 있다. 이 같은 현상은 이미 Beer 등⁽¹⁾과 Van der Lans 등⁽¹²⁾이 언급하였던 내용들과 일치한다고 볼 수 있다.

Fig. 4(b)는 X/R=0.7692와 X/R=1.4103의 Y-Z평면 내에서 얻어진 회전방향 성분의 벡터분포와 X축방향성분의 평균속도 분포를 중첩해 나타낸 그림으로, 스월베인부에 의한 반시계방향의 회전유동이 잘 나타나 있다. X축방향성분의 평균속도 및 회전방향 벡터는 연소실의 영향으로 버너 중심부에서는 크기가 작게 형성되는 반면, 버너 외주영역에서는 현저히 더 넓게 큰 값을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이것은 연소실에 의한 주 분류와 벽주변의 유동장 사이에서 나타나는 정압차이와 Entrainment의 배제로 인해 유동장이 연소실 벽 쪽으로 폭이 확대되었음을 의미해 준다.⁽⁹⁻¹¹⁾

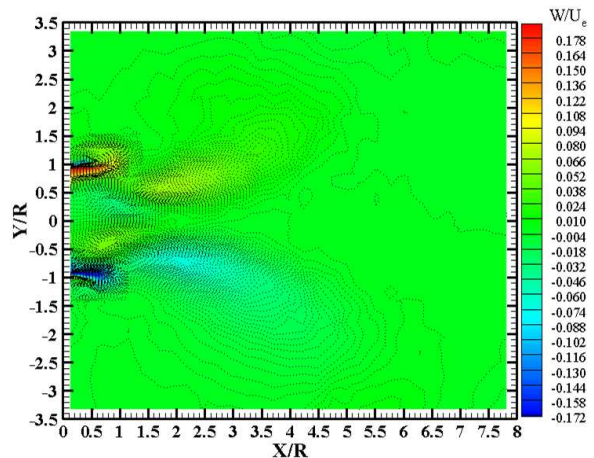
Fig. 5는 Y=Z=0인 버너 중심선상에 따라 측정된 평균속도 U의 분포를 버너출구속도(U₀)로 무차원화하여 연소실 유무에 따라 비교한 그림이



(a) Axial mean velocity



(b) Radial mean velocity



(c) Tangential mean velocity

Fig. 6 Mean velocity contours in the X-Y plane

다. 연소실 유무에 관계없이 하류영역의 증가에 따라 평균속도 U는 약 X/R=1.5 부근까지는 모두 급격히 증가하며, 약 X/R=1.5 부근에서 최대치를 보여주는데, 연소실이 있는 경우가 없는 경우보다 약간 작은 크기값을 보이고 있다. X/R=1.5 이후에는 하류영역의 거리가 증가함에 따라 연소실

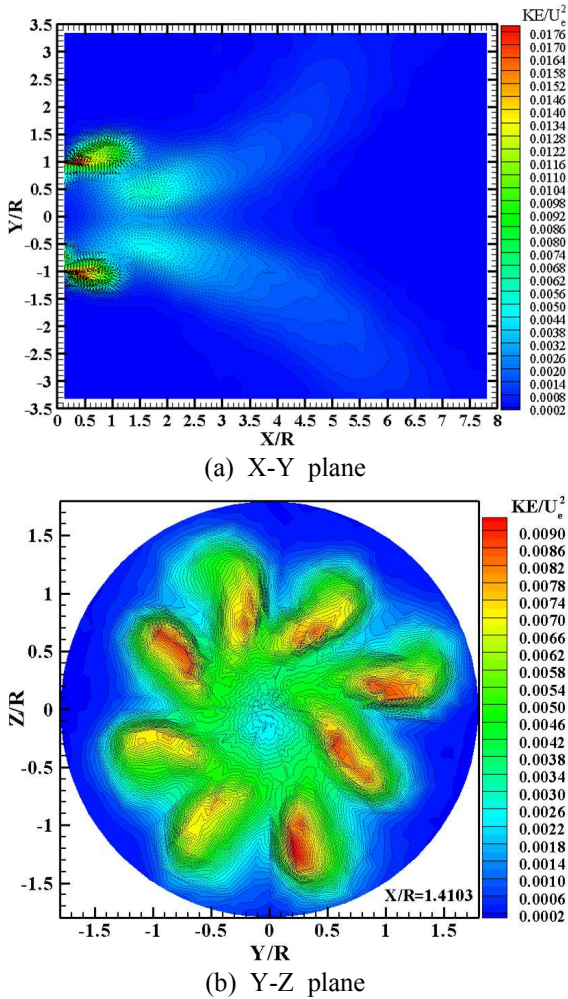


Fig. 7 Turbulent kinetic energy contours

이 없는 경우는 급격히 감소하다가 약 $X/R=3$ 이후에는 버너의 출구속도 대비 약 11%의 크기로 비교적 일정한 값을 유지하고 있다. 그러나 연소실이 있는 경우에는 스월베인에 의한 회전유동이 연소실 벽 쪽으로 휘어지기 때문에, 연소실이 없는 경우보다 현저히 작은 평균속도 값을 형성하면서 약 $X/R=6$ 까지는 급격히 감소하다가 그 이후부터는 버너출구속도대비 약 3%의 크기로 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서 연소실이 존재하게 되면, 축방향성분의 모멘텀은 현저히 줄어들 수 있다.

Fig. 6은 연소실 내의 유동장을 X-Y평면 내에서 X축방향의 거리에 따라 반경방향으로 측정된 평균속도 U, V, W 를 버너출구속도로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 모든 평균속도분포가 슬릿부를 중심으로 피크(peak)치를 형성하며, 슬릿부의 빠른 제트에 의한 관성력의 영향은 약 $X/R=$

1.0에 이르고 있다. 특히 평균속도 V 와 W 는 이 영역에서 슬릿부의 내측과 외측을 중심으로 크기 부호가 다른 양(+)과 음(-)의 피크치를 형성하고 있다. 반면, 평균속도 U 의 분포는 스월베인에 의한 회전유동의 영향이 크게 나타나는 $X/R=1.5$ 부근의 $Y/R \approx \pm 0.5$ 를 중심으로 비교적 큰 크기분포를 형성한다. 그러나 $X/R=1.5$ 이후부터는 스월베인의 회전유동이 슬릿부의 빠른 제트의 영향을 받지 못하기 때문에, Fig. 5에서도 알 수 있듯이 버너 중심부에서는 하류방향에 따라 속도성분이 급격히 감소하여 소멸된다. 반면, 반경방향으로는 Fig. 3의 유동반쪽분포에서도 알 수 있듯이 약 $X/R=2.5$ 이후 유동장이 상대적으로 크게 확대되어 나타남을 알 수 있다. 한편, 평균속도 V 와 W 는 평균속도 U 와는 달리 X축방향으로 다소 지연된 $X/R=2.0$ 부근의 $Y/R \approx \pm 0.5$ 를 중심으로 회전유동이 집중되어 나타나는 것을 제외하곤, 평균속도 U 와 유사한 유동발달모습을 보이고 있다. 특히, 약 $X/R=1.5$ 이후의 유동분포모습은 연소실이 없는 기 발표된 연구결과⁽⁹⁾와 비교할 때, 버너중심축방향으로는 상당히 짧아진 반면, 반경방향으로는 길게 늘어진 것을 알 수 있다.

3.3 난류운동에너지 및 전단응력분포

Fig. 7(a)는 연소실 내의 유동장을 X-Y평면 내의 각 X축방향의 거리에서 반경방향으로, 그리고 Fig. 7(b)는 X축방향의 한 위치인 $X/R=1.4103$ 의 Y-Z평면 내에서 각각 측정된 각 방향 난류속도성분들을 가지고 나타낸 난류운동에너지⁽⁹⁻¹¹⁾를 버너출구속도로 무차원화한 그림이다. 난류운동에너지의 분포 역시 비교적 초기영역에 해당하는 $X/R=1.5$ 이전까지는 슬릿부를 중심으로 버너 출구측부터 큰 크기가 집중 분포되며, 스월베인에 의한 회전유동의 영향이 크게 나타나는 $X/R=1.5$ 부근의 $Y/R \approx \pm 0.5$ 를 중심으로도 비교적 큰 크기의 난류운동에너지가 집중 분포되고 있음을 알 수 있다. 이 같은 현상은 Fig. 7(b)에서도 알 수 있듯이 측정위치가 $X/R=1.4103$ 이므로 이 영역은 슬릿부의 빠른 제트가 스월베인의 회전유동을 감싸는 영향이 다소 줄어들어 반시계방향으로 약간 틀어진 상태에서 스월베인의 회전유동을 중심으로 난류운동에너지의 피크치가 형성되고 있다. 그러나 $X/R=1.5$ 이후에서는 난류운동에너지의 크기가 하류영역으로 갈수록 버너 중심부에서는 현저히 감

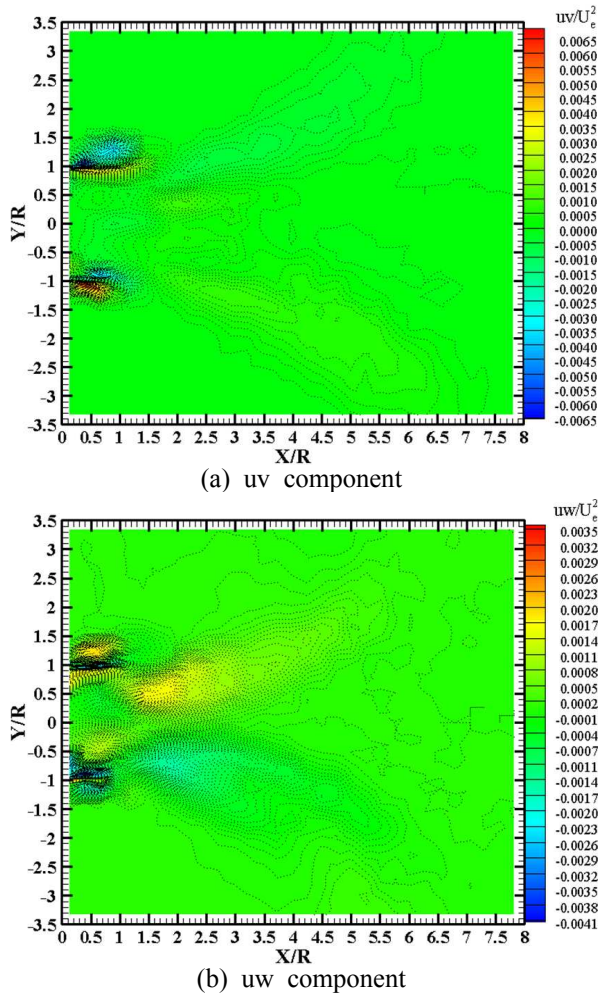


Fig. 8 Turbulent shear stress contours in the X-Y plane

소하여 소멸되나, 상대적으로 반경방향으로는 점차 확대되어 연소실 벽 쪽을 향해 크기가 감소하고 있어, 연소실에 의한 영향이 큼을 알 수 있다. 또, 난류운동에너지의 분포는 Fig. 6(a)에서의 평균속도 U 의 분포와 매우 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 8은 X-Y평면 내에서 각 X축방향의 거리에서 반경방향으로 측정된 난류전단응력 uv 와 uw 를 버너출구속도로 무차원화한 그림이다. 난류전단응력은 모두 슬릿부의 빠른 제트의 영향이 지배되는 비교적 초기영역인 약 $X/R=1.0$ 이전에서 슬릿부의 내측과 외측을 중심으로 피크치가 형성되어 있다. 또한 난류전단응력 uw 의 경우 슬릿부의 빠른 제트의 영향력이 떨어져 스월베인의 회전유동이 강하게 나타나는 약 $X/R=1.5$ 부근의 $Y/R \approx 0.5$ 에서도 비교적 큰 크기가 형성되나, 난류전

단응력 uv 의 경우는 불분명한 모습을 보여주고 있다. 그러나 약 $X/R=1.5$ 이후에서는 난류전단응력 역시 중심부에서는 그 크기가 현저히 감소하여 소멸되는 반면, 반경방향으로는 상대적으로 그 분포가 크게 확대되고 있다.

4. 결 론

연소실이 있는 GTGB의 난류유동장 특성을 비연소조건인 등온조건에서 검토하였다. 연소실 벽에 의해 외부공기가 유입되는 Entrainment현상이 근본적으로 차단되므로, 버너 출구로부터 자체 분사된 제트유동에 의해서만 전체 제트유동장이 영향을 받게 된다. 그 결과, 제트 주변에서 발생한 정압력의 변동 크기가 제트의 가장자리에서는 하류측으로 흐르는 유동을 연소실 상류측으로 재순환하려는 경향을 보인다. 따라서 연소실을 갖는 유동은 반경방향으로 확산하려는 스월베인의 회전유동을 더욱 더 연소실 벽 쪽으로 끌어당기게 하므로, 버너 중심부에서는 축방향모멘텀을 현저히 감소시켜 유동장의 길이를 크게 줄이는 반면, 접선(회전)방향의 모멘텀은 현저히 증가되어 유동장의 폭이 크게 늘어난다. 이 같은 현상은 약 $X/R=1.5$ 이후에서 평균속도, 난류운동에너지 및 난류전단응력분포에서 확인할 수 있다. 그러나 약 $X/R=1.0$ 이전의 상류영역에서 슬릿부를 중심으로 형성되는 각 물리량들의 크기 및 분포 양상은 연소실의 존재에 큰 영향을 받지 않는다.

후 기

본 논문은 2008년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley & Sons, pp. 102~146.
- (2) Lefebvre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, Hemisphere, pp. 126~135.
- (3) Syred, N. and Beer, J. M., 1974, "Combustion in Swirling Flows; A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, pp. 143~201.

- (4) Feyedelem, M. S. and Sarpkaya, T., 1998, "Free- and Near-Free-Surface Swirling Turbulent Jets," *AIAA J.*, Vol. 36, No. 3, pp. 359~364.
- (5) Gursul, I., 1996, "Effect of Nonaxisymmetric Forcing on a Swirling Jet with Vortex Break-down," *Trans. of the ASME (J. of Fluids Eng.)*, Vol. 118, pp. 316~323.
- (6) Shioji, M., Kim, I. S., Ikegami, M. and Murakami, K., 1998, "Flame Stability and NOx Formation in a High-Intensity Swirl Burner," *Trans. of JSME (Part B)*, Vol. 64, No. 621, pp. 222~227.
- (7) Hibara, H. and Sudou, K., 1999, "Swirling Jet along a Solid Surface," *Trans. of JSME (Part B)*, Vol. 65, No. 629, pp. 130~137.
- (8) Gupta, A. K., Lewis, M. J. and Qi, S., 1998, "Effect of Swirl on Combustion Characteristics in Premixed Flames," *Trans. of the ASME (J. of Eng. for Gas Turbines and Power)*, Vol. 120, pp. 488~494.
- (9) Kim, J. K., 2001, "Investigation of the Three-Dimensional Turbulent Flow Fields of the Gas Swirl Burner with a Cone Type Baffle Plate(I)," *KSME Int. J.*, Vol. 15, No. 7, pp. 895~905.
- (10) Kim, J. K., 2004, "Experimental Investigation on the Turbulence Augmentation of a Gun-type Gas Burner by Slits and Swirl Vanes," *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 10, pp. 1819~1828.
- (11) Kim, J. K., 2008, "Investigation of the Turbulence Characteristics in the Swirling Flow of a Gun-Type Gas Burner with Two Different Hot- Wire Probes," *J. of Mechanical Sci. and Tech.*, Vol. 22, No. 1, pp. 180~189.
- (12) Van der Lans, R. P., Glarborg, P., Dam-Johansen, K. and Larsen, P. S., 1997, "Residence Time Distributions in a Cold, Confined Swirl Flow," *Chemical Eng. Sci.*, Vol. 52, No. 16, pp. 2743~2756.
- (13) Dantec Dynamics, 2000, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms.
- (14) Bruun, H. H., 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132~163.