

# 덕트의 유무에 따른 Gun식 가스버너의 난류유동장 특성 고찰 Investigation on the Turbulent Flow Field Characteristics of a Gun-Type Gas Burner with and without a Duct

김 장 권·정 규 조  
J. K. Kim and K. J. Jeong

**Key Words** : Duct(덕트), 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 flow field characteristics of a gun-type gas burner with and without a duct were investigated under the isothermal condition of non-combustion. Vectors and mean velocities were measured by hot-wire anemometer system with an X-type hot-wire probe in this paper. The turbulent flow field with a duct seems to cause a counter-clockwise recirculation flow from downstream to upstream due to the unbalance of static pressure between a main jet flow and a duct wall. Moreover, the recirculation flow seems to expand the main jet flow to the radial and to shorten it to the axial. Therefore, the turbulent flow field with a duct increases a radial momentum but decreases a axial momentum. As a result, an axial mean velocity component with a duct above the downstream range of about  $X/R=1.5$  forms a smaller magnitude than that without a duct in the inner part of a burner, but it shows the opposite trend in the outer part.

## 1. 서 론

연소기에서 주로 사용되는 스월유동은 유동축방향으로 역압력기울기를 발생시켜 재순환영역과 높은 난류를 형성시킨다고 잘 알려져 있다.<sup>1-3)</sup> 이 스월유동의 거동은 유선곡률, 원심가속 및 난류전달 등의 영향을 받아 유동 중심부에서 급속한 유동축방향 성분의 감속으로 인한 와분열(vortex breakdown)을 일으켜 역유동을 수반하는 재순환영역을 형성한다.<sup>4,5)</sup> 또 스월유동은 원심력에 의한 나선형의 간섭들에 의해 유동이 불안정해지므로 화염면을 형성하는 재순환영역의 경계면에서 Entrainment율을 증대시키고, 연료와 공기의 혼합을 급속도로 증대시켜 큰 확산능력을 제공하기 때문에 결과적으로 화염의 길이를 짧게 하고, 화염을 안정화시켜 희박연소를 가능케 하는 효과가 있다고 알려져 있다.<sup>4-8)</sup> 따라서 스월유동은 연소과정으로부터 배출된 오염물질을 제어하거

나 연소성능을 증가시키는 데에 있어 중심적인 역할을 하기 때문에, 가스터빈이나 산업용 보일러, 로(furnace), 분무기 등에서 널리 이용되고 있다.<sup>4-8)</sup>

이 같은 스월링 유동현상들은 유동가시화나 입자 영상유속계(PIV) 그리고 수치해석(CFD)을 통해 직접적으로 측정하거나 분석할 수 있으며, 레이저유속계(LDV)나 열선풍속계(HWA) 그리고 다공압력 프로브(probe) 등을 통해서도 간접적으로 측정 분석할 수 있다. 그러나 등온유동에서 스월링유동을 포함한 3차원 유동장의 측정에 비교적 쉽게 사용할 수 있는 계측기구로서는 HWA가 있다. 현재까지도 스월유동에 대한 3차원속도 및 난류특성치들을 측정하는 경우, HWA가 자주 사용되는 이유는 HWA가 많은 종류의 유동장에 대해서도 높은 공간 분해능을 제공하고, 유동간섭을 적게 하며, 높은 주파수 응답과 낮은 속도에서도 좋은 감도와 유동장에 미치는 장애를 최소화하기 위해 작은 크기의 센서를 갖는 등 다른 어떤 계측기보다도 난류특성치들을 정확하고 경제적으로 측정하기 때문이다.<sup>9,10)</sup>

한편, 스월유동에 대한 HWA를 이용한 연구들을 살펴보면, Hibara 등<sup>7)</sup>은 경사형 I형 열선프로브(I-

접수일 : 2006년 8월 15일, 채택확정 : 2006년 9월 18일  
김장권(책임저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학전공  
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848  
정규조 : 군산대학교 동력기계시스템공학전공

probe)를 사용하여 선회분류가 고체벽에 접촉하여 분출할 경우 선회분류의 확산에 미치는 고체 벽의 영향을 검토하였다. 또, Aoki 등<sup>11,12)</sup>은 원통형 연소기내의 유동현상을 해석하기 위해 LDV와 HWA 그리고 5공압력프로브(FHPP)를 이용하여 스윙수를 0.35에서 1.35까지 변화시켜 가면서 시간평균 유속과 난류강도 등을 측정하여 역류영역, 와 중심영역, 보조순환영역의 위치와 크기, 형상 등 연소기 내부의 유동양식을 규명하였다. Holzapfel 등<sup>13)</sup>은 5개의 열선으로 구성된 프로브를 가지고 난류가 강한 스윙링유동에서 난류구조들을 측정하였으며, Wicker 등<sup>14)</sup>은 FHPP와 HWA를 사용하여 석탄가루를 연소시키는 보일러에서 스윙유동을 측정하였다. 또한 Fitouri 등<sup>15)</sup>은 많은 위치에 설치된 경사진 I-probe를 사용하여 볼텍스 챔버 내의 스윙유동을 측정하였으며, Kim<sup>16-19)</sup>은 콘(cone)형 배플판을 갖는 Gun식 가스버너(GTGB)를 통해 연소용 공기량에 대한 난류유동장의 확산폭과 길이 및 구조 등을 연구하고자 HWA를 이용하여 평균속도 및 난류특성치들을 분석한바 있다.

본 연구에서는 비교적 약선회 버너로 판단할 수가 있는 기하학적 형상 스윙수가 0.34이며, 스윙베인의 각도가 24°인 GTGB<sup>18)</sup> 출구에 연소실용 원통형 덕트(duct)를 부착하여 덕트내 가스버너의 난류유동장 특성을 살펴보고자 비 연소조건하에서 X형 열선프로브(X-probe)를 사용하여 평균유동장을 측정하였으며, 덕트가 없이 가스버너만으로 얻어진 유동장에 대해 기 발표된 연구결과들<sup>16-19)</sup>과도 비교 분석하였다.

특히 Beer 등<sup>1)</sup>과 Van der Lans 등<sup>20)</sup>은 비 연소상태인 등온조건 유동과 연소유동사이 유동패턴들의 변화들이 존재하더라도 관성력 대비 원심력의 비율이 일정하게 유지되는 한, 이들 사이에는 강한 상사성이 존재한다고 하였다. 따라서 등온의 유동조건에서 각종 물리적인 측정치는 모멘텀 비율에서의 차이가 고려될 때 실제 연소기에서의 유동을 묘사하는데 훌륭한 자료들이 된다고 할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 비 연소조건인 등온조건에서 GTGB의 유동장을 연소실용 덕트를 사용하여 외부공기와 차단하였을 때, 덕트로 인한 외부공기의 Entrainment 제거가 덕트내 난류유동장의 각종 물리적 특성들에 대해 어떻게 영향을 미치는가를 정확히 파악하는데 있으며, 이들을 향후 연소실용 덕트설계를 위한 기초 자료나 CFD에서 필요로 하는 입력 자료로서 활용하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 GTGB와 연소실용 덕트의 상세 구조를 나타내는 그림이다. 이 가스버너는 난방능력 15,000 kcal/hr의 가스난방기에 적용하고자 개발한 버너이다. 이 가스버너는 원통부 선단에 45°경사진 콘형 배플판(baffle plate)과 배플판 외주에 45°간격으로 배치된 8개의 공기분출 슬릿들로 구성되어 있다. 또 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 덕트는 투명한 아크릴재질로 외부직경이 340 mm이고, 길이가 380 mm이며, 두께가 5 mm인 원통형이다. 덕트 한쪽은 개방되어 있으며, 다른 한쪽은 중심부에 가스버너의 선단부가 부착되는 공간 이외에는 모두 막혀 있으며, 본 연구에서는 버너

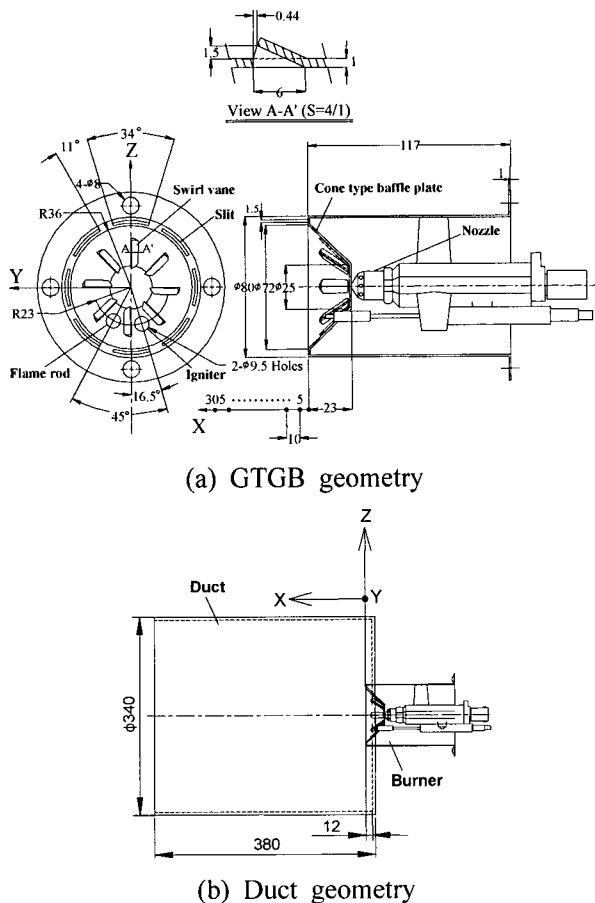


Fig. 1 Configuration of a GTGB and a duct

선단부가 덕트 안쪽으로 12 mm만큼 돌출되도록 설치하여 유동장을 측정하였다.

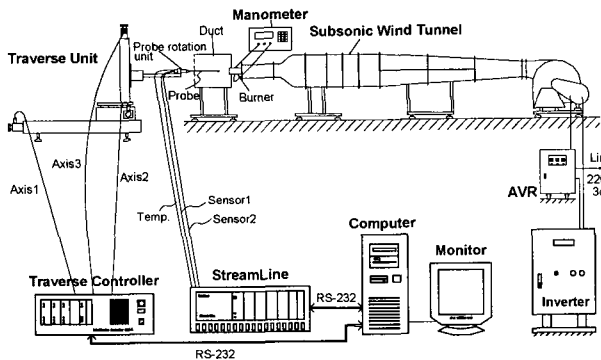


Fig. 2 Experimental apparatus diagram including hot-wire anemometer system

Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 연결된 GTGB 실험장치로부터 HWA를 이용하여 3차원 난류유동장을 측정하는 그림이다. 본 연구에서 사용한 아음속풍동은 5마력 AC모터를 갖는 원심형 송풍기와 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 각각 구성되어 있으며, 풍동의 속도는 송풍기의 회전수를 일정하게 유지하도록 인버터에 의해 조정하였다. 또 시험부는 폭 220 mm, 높이 220 mm, 길이 410 mm인 크기를 가지며, 약 35 m/s의 최대풍속이 발휘된다. 또, 시험부 내의 난류강도는 벽면으로부터 20 mm 떨어진 중심부의 유동장에 걸쳐 평균유속이 약 13 m/s일 때 약 0.02% 이하이다. 한편, 비연소시 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 있다. 또 이들 모두는 RS-232C에 의해 온라인으로 연결되어 활용되며, 속도 교정기에는 유효압력 10 kg/cm<sup>2</sup>까지 발휘되는 공기압축기가 연결되어 있다.

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 3차원 유속 측정에 X-probe (Dantec, 55R51)를 사용하였으며, 일정한 실험실의 온도조건하에서도 불구하고 미소한 온도변화가 발생할 때, 이에 대응하기 위해서는 속도보상용 온도 센서(Dantec, 90P20)를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 아음속풍동의 속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력탭(tap)에서 실제 연소용 공기로 사용되는 공기량 450ℓ/min을 공급하였을 때 얻어지는 압력 164 Pa를 기준으로 하여 사용하였다. 또 A/D 변환기의 샘플링(sampling) 주파수는 채널당 10 kHz, 샘플링 수는 채널당 102,400 개, 신호조정기의 저주파통과필터(low-pass filter)는 30 kHz로 각각 설정하여 사용하였다. X-probe의 속도 교정에는 최대속도 30 m/s까지 실시하였으며, 그 결과를 4차의 다항식에 의해 나타내었을 때, ±1% 이하의 정확도를 얻을 수 있었다. 한편, 회전유동에 대하여 각 와이어의 간섭으로 인한 영향을 제거하고자 방향성에 대한 교정은 10 m/s의 속도에서 ±45°에 걸쳐 5°간격으로 실시하였는데, 그 결과 각 와이어에 대한 평균 요(yaw)계수들은 각각  $k_1^2=0.057$ ,  $k_2^2=0.068$ 로 얻을 수 있었다. 이 모든 과정은 내장된 “Streamware”라는 소프트웨어에 의해 자동으로 처리할 수 있다.<sup>21,22)</sup>

원하는 측정위치의 설정과 난류유동장의 본격적인 측정은 X-probe를 교정기에 설치하였을 때와 동일한 방향성을 유지한 채 3차원 자동이송장치에 프로브를 위치시킨 후, 버너의 기하학적 측정기준인 원점을 참고로 하여 버너 선단의 좌우, 상하로 프로브를 미세하게 자동 이송한 다음 얻어지는 속도데이터들을 가지고 다시 정확한 원점을 잡아 실시하였다.

GTGB는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘형 배플판 상에 화염봉(flame rod)과 점화플러그(igniter)가 장착되어 있으므로, 본 연구에서는 이들을 제거하고, 그 구멍들을 접착테이프(tape)로 막아 사용하였다. 이때 측정위치는 버너 형상이 축대칭을 이루고 있기 때문에, 주어진 풍량 조건에서 프로브를 Z=0인 X-Y평면(수평면)상으로 이동하면서 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. Y-Z평면(횡단면) 내에서는 유동장에서 특별히 크기 차이 모습을 보여주는 X축 방향의 거리 90 mm에서 반지름(R) 방향으로는 0 mm에서 70 mm까지 5 mm간격으로, 회전각(θ) 방향으로는 0°에서 35°까지 5°간격으로 각각 측정하였다. 이때, 콘형 배플판 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁

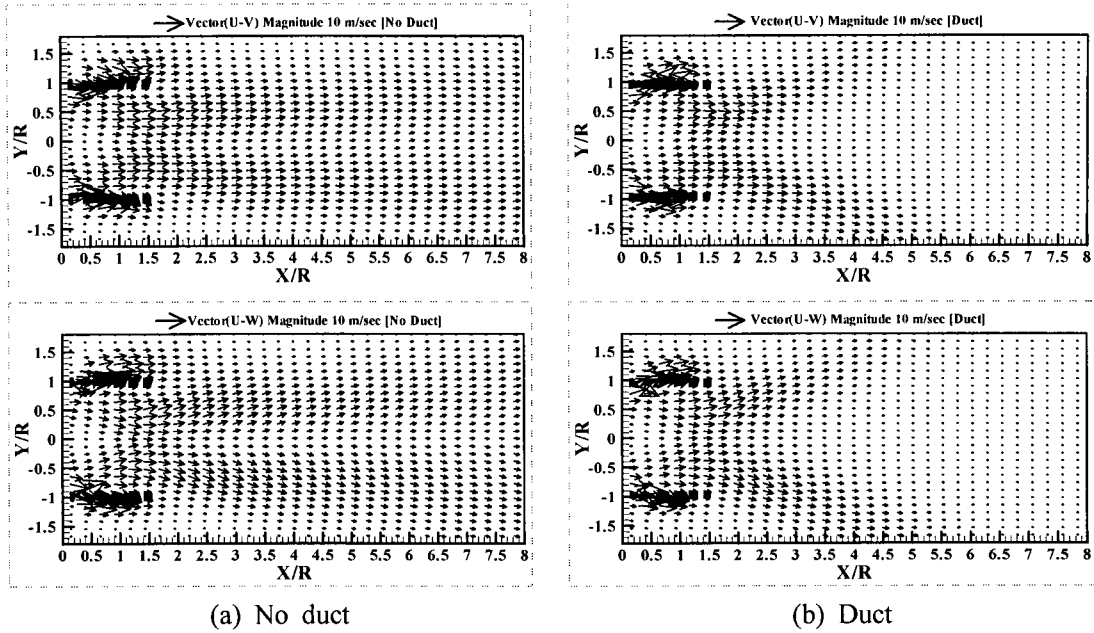


Fig. 3 Vector plots obtained in the X-Y plane

은 슬릿부에서 분출되는 빠른 속도는 1mm씩 프로브를 미세하게 이송하여 측정하였다. 한편, 유동장내의 실내온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 약  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 최대한 막기 위해서는 자동전압조정기(AVR)와 인버터(inverter)를 설치하여 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 연소실용 덕트의 유무에 따라 X-Y평면 내에서 측정된 각 방향 평균속도성분들을 가지고 벡터분포로 나타낸 그림들이다. 비교적 초기영역에 해당하는  $X/R=1.5$  이전의 영역까지는 덕트 유무에

상관없이 2종류의 벡터들은 매우 유사한 분포를 보여주고 있다. 이 영역에서는 슬릿부의 빠른 제트유동이  $45^\circ$ 로 경사진 콘형 배플판에 부착된 스윙베인의 회전유동을 반경방향으로 확대되지 못하도록 에워싸게 된다. 따라서 이 회전유동은 버너 중심부를 중심으로  $Y=0$ 인 중심선상으로 향해 충돌하며, X축 방향으로 발달하여 경사진 배플판에 의한 그 관성력이  $X/R=1.5$  근처까지 영향을 미치는 것으로 보인다. 그러나  $X/R=1.5$  이후부터는 덕트의 유무에 따라 확실히 다른 벡터분포를 보여주고 있다. 즉 덕트가 있는 경우에는 슬릿부의 제트 속도가 상대적으로 줄어들어 스윙베인의 회전유동을 충분히 감싸지 못하므로, X축방향의 거리가 증가함에 따라 버너 중심선상에서의 벡터분포는 점차 크기가 줄어

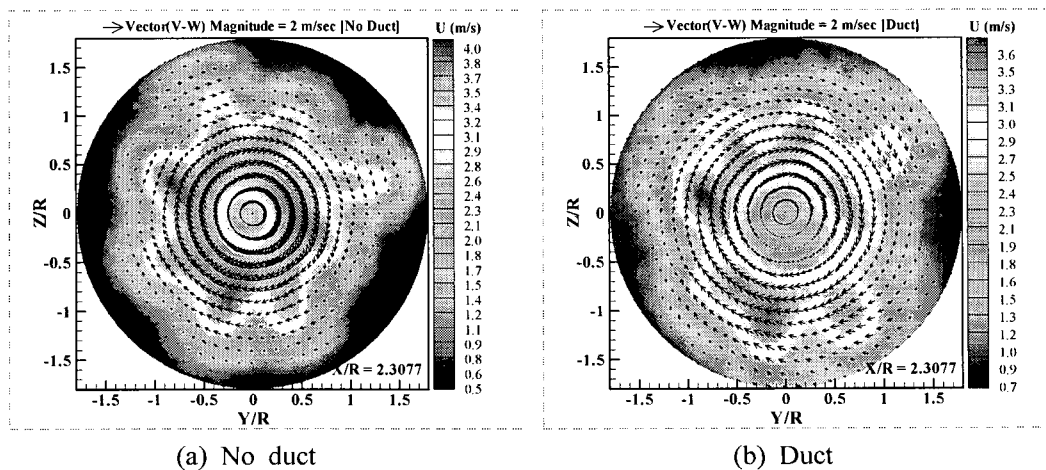


Fig. 4 Rotational vector plots and axial mean velocity contours obtained in the Y-Z plane

들며, 그 줄어드는 영역도 반경방향으로 점차 확대되어 나타난다. 스윙베인부에서 형성된 벡터의 크기 역시 반경방향으로 현저히 확산되어 약  $X/R=5.5$  이후에서는 전 영역에 걸쳐 거의 무시할 수 있는 작은 크기의 벡터분포를 보여주고 있다. 따라서 덕트를 갖는 유동은 축방향모멘텀을 현저히 감소시켜 유동장의 길이를 크게 줄이는 반면, 접선(회전)방향의 모멘텀은 현저히 증가되어 유동장의 폭이 크게 늘어나게 된다고 볼 수 있다. 이 같은 원인은 덕트가 존재함으로 인해 제트유동에 의한 외부공기가 주 분류로 유입하는 Entrainment 현상이 차단되어, 자체 분사된 제트유동에 의해 제트 주변에서 정압력의 변동이 발생한 결과로 볼 수 있다. 즉, 버너 출구를 빠져나온 제트유동장에는 정압이 음(-)의 값으로 낮아지는 반면, 제트가 닿지 않는 상류측의 제트와 덕트사이 공간에서는 정압이 양(+)압으로 상대적으로 높게 되므로, 이 높은 정압이 크기차이로 인해 주 분류로 다시 유입하려는 반시계방향의 재순환유동 경향을 띄게 된다. 따라서 이 재순환유동의 경향은 반경방향으로 확산하려는 스윙베인의 회전유동을 더욱 더 덕트 벽 쪽으로 끌어당기게 하므로, 축방향모멘텀은 현저히 줄어드는 반면, 접선방향의 모멘텀은 크게 증가된다고 볼 수 있다. 이 같은 현상은 이미 Beer 등<sup>1)</sup>과 Van der Lans 등<sup>20)</sup>이 언급하였던 내용들과 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 연소유동에서는 축방향의 모멘텀이 상대적으로 더 증가하는 반면 접선방향의 모멘텀은 더 감소하게 됨에 따라, 이 같은 상사성을 감안하면, 비 연소상태인 등온조건의 유동장에 대한 연구결과들도 충분히 연소유동연구에 응

용될 수 있음을 알 수 있다.

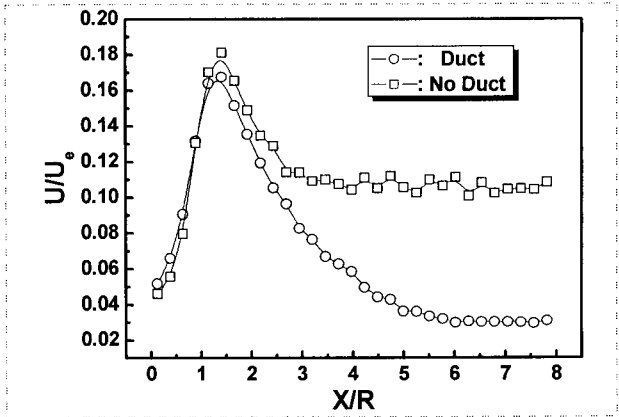


Fig. 5 Axial mean velocity profiles along the centerline

Fig. 4는  $X/R=2.3077$ 인 하류위치의 Y-Z 평면내에서 얻어진 회전방향 성분의 벡터분포와 X축방향 성분의 평균속도 분포를 덕트 유무에 따라 비교한 그림이다. Fig. 3에서도 보았듯이 덕트가 있는 경우 X축방향성분의 평균속도 및 회전방향 벡터는 덕트가 없는 경우보다 버너 중심부에서 크기가 작게 형성되는 반면, 외주영역에서는 현저히 더 큰 값을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이것은 역시 덕트로 인해 유동장이 덕트 쪽으로 폭이 확대되었음을 의미해 준다.

Fig. 5는  $Y=0$ 인 버너 중심선상에 따라 측정된 X축방향의 평균속도분포를 버너출구속도로 무차원화하여 덕트 유무에 따라 비교한 그림이다. 덕트 유무에 관계없이 하류영역의 증가에 따라 X축방향의 평균속도성분은 약  $X/R=1.5$  부근까지는 모두 급격히 증가하며, 약  $X/R=1.5$  부근에서 최대치를 보여

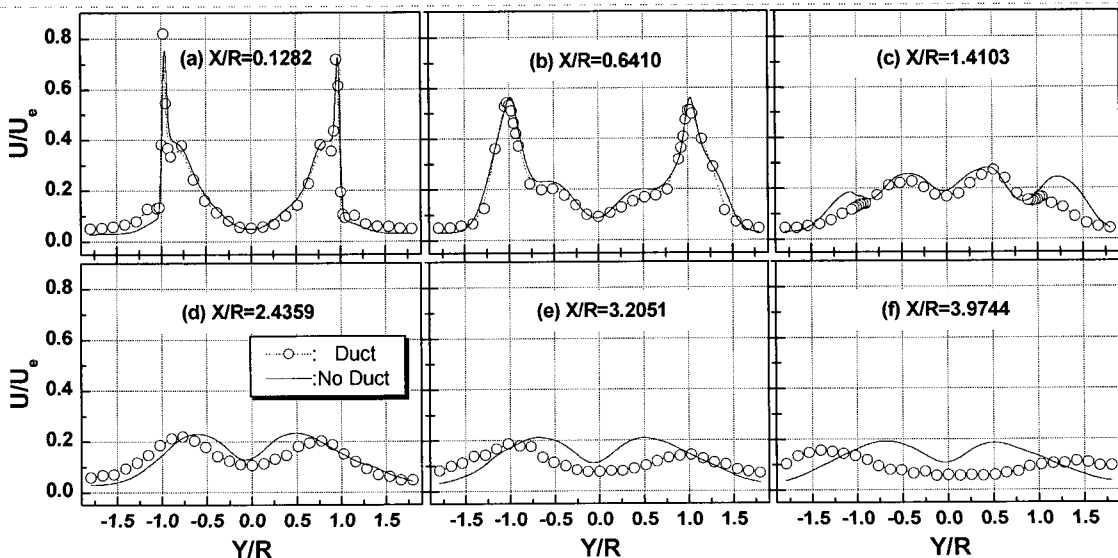


Fig. 6 Axial mean velocity profiles along the radial distance

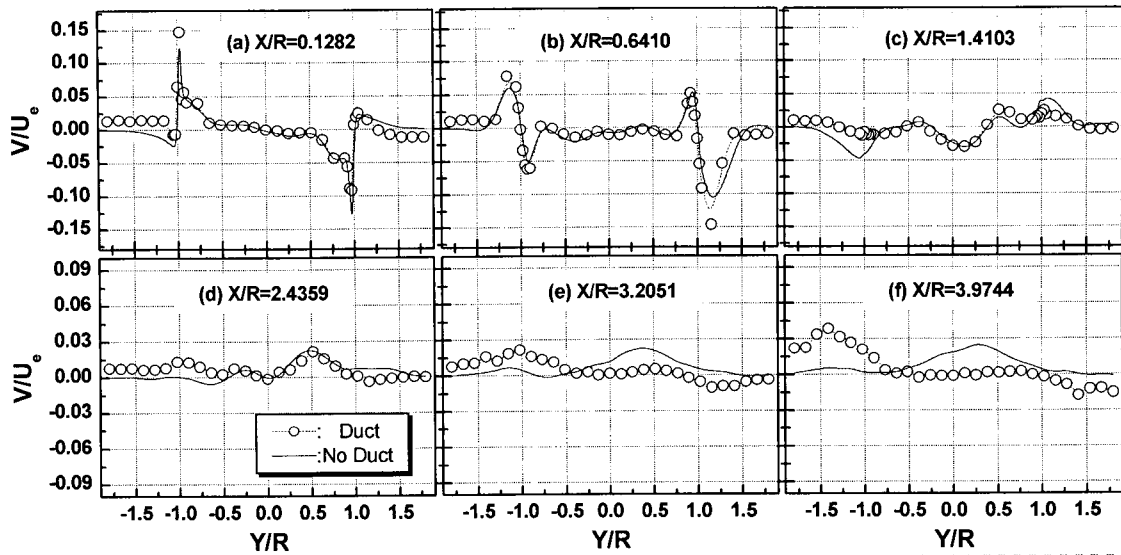


Fig. 7 Radial mean velocity profiles along the radial distance

주는데, 덕트가 있는 경우가 없는 경우보다 약간 작은 크기값을 보이고 있다.  $X/R=1.5$  이후에는 하류영역의 거리가 증가함에 따라 덕트가 없는 경우는 급격히 감소하다가 약  $X/R=3$  이후에는 버너의 출구속도 대비 약 11%의 크기로 비교적 일정한 값을 유지하고 있다. 그러나 덕트가 있는 경우에는 스윙베인에 의한 회전유동이 덕트 벽 쪽으로 휘어지기 때문에 덕트가 없는 경우보다 현저히 작은 평균속도 값을 형성하면서 약  $X/R=6$ 까지는 급격히 감소하다가 약  $X/R=6$  이후부터는 버너출구속도 대비 약 3%의 크기로 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서 여기서도 덕트가 존재하게 되면, 축방향성분의 모멘텀은 현저히 줄어들음을 알 수 있다.

Fig. 6은 하류영역의 6군데 위치에서 Y방향의 거

리(반경)에 따라 측정한 X축방향의 평균속도성분을 버너출구속도로 무차원화하여 덕트의 유무에 따라 비교한 그림이다.  $45^\circ$ 로 경사진 배플판에 위치한 스윙베인의 회전유동이 슬릿부의 빠른 제트에 의해 둘러싸여 반경방향으로 뺏지 못하고, X축방향으로 향하면서 충돌하는 관성력의 영향이 미치는 약  $X/R=1.5$  이전의 영역에서는 버너 외주 영역을 제외하고는 속도분포의 크기가 미소한 차이를 보이나, 거의 무시할 정도로 유사한 크기를 보인다. 다만 버너 외주 영역에서만 덕트가 있는 경우가 초기영역인데도 불구하고 약간 더 큰 속도크기를 보여주고 있다. 이것은 하류로 뺏어가는 유동이 정압차이로 인해 반경방향으로 확대되어 덕트 벽 쪽으로 치우치면서 재순환하려는 유동성격이 초기영역에까

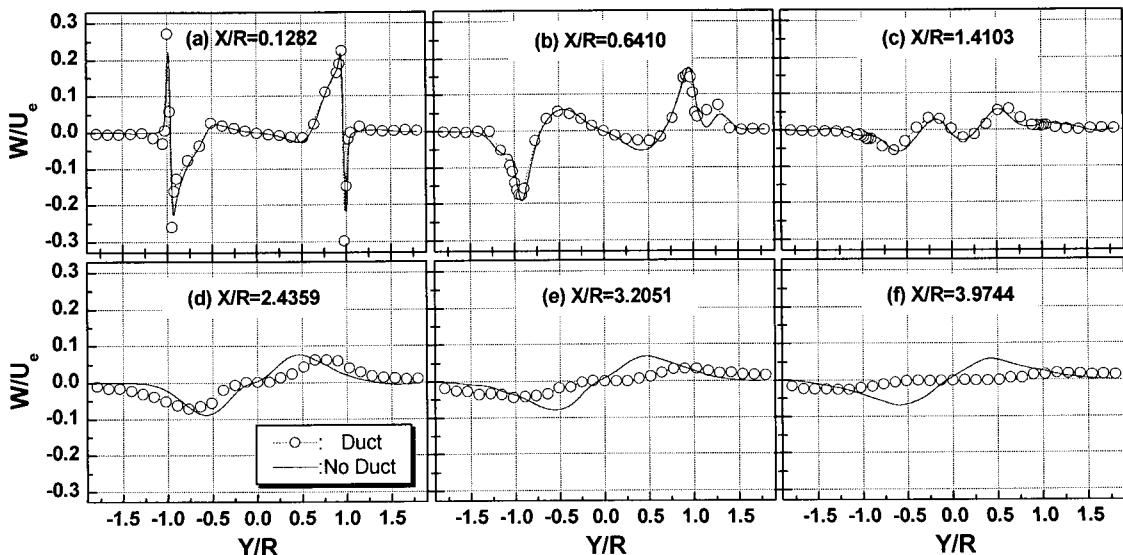


Fig. 8 Tangential mean velocity profiles along the radial distance

지 영향을 미치지 때문이다. 한편 약  $X/R=1.5$  이후부터는 Fig. 6(d)의  $X/R=2.4359$  이후에서도 알 수 있는 바와 같이, 덕트가 있는 경우는 버너 중심부에서의 속도크기가 덕트가 없는 경우보다 더 작게 형성되며, 하류로 갈수록 더 큰 차이를 보여준다. 반면에 버너 외주 영역에서는 덕트가 있는 경우의 속도분포가 덕트가 없는 경우보다 더 큰 크기를 보여주고 있으며, 하류영역으로 갈수록 그 크기 차이는 더 크게 벌어지고 있다. 이것은 그만큼 덕트가 있는 경우의 속도분포가 반경방향으로 더 크게 확대되었기 때문이다.

Fig. 7은 하류영역의 6군데 위치에서 반경방향의 거리에 따라 측정된 반경방향성분의 평균속도를 버너출구속도로 무차원화하여 덕트의 유무에 따라 비교한 그림이다. 비교적 초기영역에 해당하는  $X/R=1.5$ 이전의  $X/R=1.4103$ 까지는 덕트의 유무에 관계없이 슬릿부를 벗어난 버너 외주영역을 제외하고는 거의 유사한 크기 분포를 보여준다. 그러나 버너 외주영역에서는 덕트가 있는 경우에 반경방향 평균속도성분의 절대값이 덕트가 없는 경우보다 더 큰 크기분포를 가지고 있다. 그러나  $X/R=1.5$ 를 벗어나도 Fig. 7(d)의  $X/R=2.4359$ 에서는  $-0.5 < Y/R < 0.5$  부근의 버너 중심부에서는 덕트의 유무에 관계없이 유사한 크기분포가 유지되고 있으나, 그 밖의 하류영역에서는 전혀 다른 크기분포 양상을 보여주고 있다.

Fig. 8은 하류영역 6군데에서 반경방향의 거리에 따라 측정된 접선방향의 평균속도 성분을 버너출구속도로 무차원화하여 덕트의 유무에 따라 비교한 그림이다. 비교적 초기영역에 해당하는  $X/R=1.4103$ 까지 접선방향 성분의 평균속도는 덕트의 유무에 관계없이 거의 유사한 크기분포를 보여주나,  $X/R=2.4359$ 부터는 특히 버너의 내주영역에서 큰 크기 차이를 보여주고 있다. 이것은 덕트가 있는 경우 접선방향 성분의 평균속도가 반경방향 쪽으로 더 일찍 확장 발달한 탓으로 버너중심부에서는 일찍 소멸하기 때문이다.

#### 4. 결 론

GTGB의 비 연소조건인 등온조건에서 난류유동장의 특성을 덕트 유무에 따라 비교 검토하였다.

덕트가 있는 경우에는 제트유동에 의한 외부공기가 주 분류로 유입하는 Entrainment현상이 차단되

어, 버너 출구로부터 자체 분사된 제트유동에 의해서만 유동장이 영향을 받게 된다. 따라서 버너 출구를 빠져나온 제트유동장 내에는 정압이 음(-)의 값으로 낮아지는 반면, 제트가 닿지 않는 상류측의 제트와 덕트사이의 공간에는 정압이 양(+)압으로 상대적으로 높게 되므로, 제트 주변에서 정압력의 변동이 발생하여 이 정압력의 크기차이가 덕트 상류와 하류에서 반시계방향의 재순환유동을 형성하는 경향을 띄게 된다. 따라서 덕트를 갖는 유동은 반경방향으로 확산하려는 스월베인의 회전유동을 더욱 더 덕트 벽 쪽으로 끌어당기게 하므로, 축방향모멘텀을 현저히 감소시켜 유동장의 길이를 크게 줄이는 반면, 접선(회전)방향의 모멘텀은 현저히 증가되어 유동장의 폭이 크게 늘어나게 된다고 볼 수 있다. 결과적으로 X축방향성분의 평균속도는 약  $X/R=1.5$  이후의 하류영역에서는 덕트가 있는 경우가 버너 내주영역에서는 덕트가 없는 경우보다 더 작은 값을 형성하는 반면, 버너 외주에서는 반대의 경향을 나타내고 있다.

#### 후 기

이 논문은 2005년도 군산대학교 교수장기해외연수경비의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고 문헌

1. J. M. Beer and N. A. Chigier, 1972, Combustion Aerodynamics, John Wiley & Sons, pp. 102 ~ 146.
2. A. H. Lefebvre, 1983, Gas Turbine Combustion, Hemisphere, pp. 126 ~ 135.
3. N. Syred and J. M. Beer, 1974, "Combustion in Swirling Flows; A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143 ~ 201.
4. M. S. Feyedelem and T. Sarpkaya, 1998, "Free-and Near-Free-Surface Swirling Turbulent Jets", AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, pp. 359 ~ 364.
5. I. Gursul, 1996, "Effect of Nonaxisymmetric Forcing on a Swirling Jet with Vortex Breakdown", Trans. of the ASME (J. of Fluids Eng.), Vol. 118, pp. 316 ~ 323.
6. M. Shioji et al., 1998, "Flame Stability and

- NO<sub>x</sub> Formation in a High-Intensity Swirl Burner", *Trans. of JSME (Part B)*, Vol. 64, No. 621, pp. 222 ~ 227.
7. H. Hibara and K. Sudou, 1999, "Swirling Jet along a Solid Surface", *Trans. of JSME (Part B)*, Vol. 65, No. 629, pp. 130 ~ 137.
  8. A. K. Gupta et al., 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. A. E. Perry, 1982, *Hot-wire Anemometry*, Clarendon Press Oxford.
  10. I. Lekakis, 1996, "Calibration and Signal Interpretation for Single and Multiple Hot-Wire/Hot-Film Probes", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 1313 ~ 1333.
  11. K. Aoki et al., 1988, "Study on the Cylindrical Combustor Flow with Swirling Flow (1st Report, Characteristics of Flow Pattern for Swirling Number)", *Trans. of JSME (Part B)*, Vol. 51, No. 468, pp. 2759 ~ 2766.
  12. K. Aoki et al., 1989, "Study on the Cylindrical Combustor Flow with Swirling Flow (2nd Report, Characteristics of Turbulence for Swirling Number)", *Trans. of JSME (Part B)*, Vol. 52, No. 476, pp. 1617 ~ 1625.
  13. F. Holzapfel et al., 1999, "Quintuple Hot-Wire Measurements of the Turbulence Structure in Confined Swirling Flows", *Trans. of the ASME (J. of Fluids Eng.)*, vol. 121, pp. 517 ~ 525.
  14. R. B. Wicker and J. K. Eaton, 2001, "Structure of a swirling, recirculating coaxial free jet and its effect on particle motion", *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 949 ~ 970.
  15. A. Fitouri et al., 1995, "A Multiposition Hot-Wire Technique for the Study of Swirling Flows in Vortex Chambers", *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 142 ~ 151.
  16. J. K. Kim, 2001, "Investigation of the Three-Dimensional Turbulent Flow Fields of the Gas Swirl Burner with a Cone Type Baffle Plate(I)", *KSME Int. Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 895 ~ 905.
  17. J. K. Kim, 2001, "Investigation of the Three-Dimensional Turbulent Flow Fields of the Gas Swirl Burner with a Cone Type Baffle Plate(II)", *KSME Int. Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 906 ~ 920.
  18. J. K. Kim, 2001, "An Experimental Study on Three Dimensional Turbulent Flow Characteristics of Swirl Burner for Gas Furnace", *Trans. of the KSME (Part B)*, Vol. 25, No. 2, pp. 225 ~ 234.
  19. J. K. Kim, 2004, "Experimental Investigation on the Turbulence Augmentation of a Gun-type Gas Burner by Slits and Swirl Vanes", *KSME Int. Journal*, Vol. 18, No. 10, pp. 1819 ~ 1828.
  20. R. P. van der Lans et al., 1997, "Residence time distributions in a cold, confined swirl flow", *Chemical Eng. Science*, vol. 52, No. 16, pp. 2743 ~ 2756.
  21. Dantec Dynamics, 2000, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms.
  22. H. H. Bruun, 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132 ~ 163.