

# 슬릿과 스월베인이 Gun식 가스버너의 주 유동장에 미치는 영향 Effects of Slits and Swirl Vanes on the Main Flow Fields of a Gun-Type Gas Swirl Burner

김장권 · 정규조

J. K. Kim and K. J. Jeong

**Key Words :** Axial Mean Velocity(축방향 평균속도), Gun-Type Gas Burner(건식가스버너), Hot-Wire Anemometer(열선풍속계), Main Flow Fields(주 유동장), Rotational Flow(회전유동), Subsonic Wind Tunnel(아음속 풍동), Slit(슬릿), Swirl Vane(스월베인), Vector(벡터)

**Abstract :** This paper is studied to investigate the effect of slits and swirl vanes on the main flow fields of a gun-type gas burner through X-Y plane and Y-Z plane respectively by using X-probe from hot-wire anemometer system. This experiment was carried out with flow rate 450 l/min in respective burner models installed in the test section of a subsonic wind tunnel. The burner models with only slits and only swirl vanes respectively were made by modifying original gun-type gas burner. The fast jet flow spurted from slits played a role such as an air-curtain because it encircled rotational flow by swirl vanes and drives mixed main flow to axial direction. As a result, the gun-type gas burner had a wider flow range up to about  $Y/R=1.5$  deviated from slits and maintains a comparatively large velocity in the central part of burner within the range of about  $X/R=2.5$ . Therefore, it was very desirable that swirl vanes were installed within slits in gun-type gas burner in order to control the main flow fields effectively.

## 1. 서 론

현재 가정용 소형 보일러 및 온풍난방기 등에 장착되어 있는 가스 연소기는 대부분이 장치가 비교적 간단하고, 가격이 저렴한 가압 분사방식인 건(gun)식 가스버너를 채택하고 있다. 이 같은 건식 가스버너는 통풍관(draft-tube)내에 설치된 가스노즐을 통해 연료가 가압 분사되어 송풍기에 의해 공급된 연소용 공기와 통풍관내에서 일부 혼합된 다음 버너 선단부에 보염을 위해 설치된 배플판(baffle plate)과 스월베인(swirl vane)에 의해 나머지 혼합이 이루어지는 부분예혼합연소 및 난류연소방식을 채택하는 경우가 많다. 특히 가스 연료와 연소용 공기와의 혼합정도가 연소상태의 가장 중요한 변수가 되기 때문에 이를 위해 스월 유동이 매우 효과적인 수단으로 부각되어져 왔다<sup>1)</sup>. 따라서 스월베인에 의한 스월유동은 배플판과 더

불어 그 큰 확산능력으로 가스연료와 연소용공기의 급속한 혼합을 촉진시켜 화염을 안정화시키고, 화염길이를 짧게 하며, 높은 연소강도를 제공하기 때문에 지난 수십 년 동안 연구되어져 가스터빈, 램 제트(ram jet), 보일러, 산업용 로(furnace), 제트믹서(jet mixer) 등에서 광범위하게 사용되고 있다<sup>1-7)</sup>.

가스버너에서 흔히 사용되고 있는 스월유동의 연구는 정지유체 중에 분출하는 단순한 동축스월 제트(coaxial swirl jet)로부터 복잡한 실제 가스 연소기내의 스월유동에 이르기까지 매우 다양하게 수행되고 있다. 이 연구들을 통하여 스월유동의 일반적인 특성이 규명되었고, 버너의 기하학적 형상이 변화된 상태에서 화염안정성을 촉진하고, 연소효율을 증가시키며, 연소오염물질을 제어하는데 있어 스월이 갖는 중요성도 밝혀 왔다<sup>8)</sup>.

한편, 가스버너의 스월유동에 대한 연구동향을 살펴보면, Beer 등<sup>3)</sup>과 Lefebvre<sup>4)</sup>는 동축분류버너의 주위공기유동에 강한 스월을 주게 되면 축방

접수일 : 2002년 7월 26일

김장권, 정규조 : 군산대학교 기관공학전공

향에 거꾸로 향하는 압력구배가 생겨 재순환영역과 고난류가 형성된다는 것을 밝혔으며, Syred 등<sup>5)</sup>은 스윙연소기 노즐 출구 주위에서 와(vortex) 분열에 의해 형성된 재순환영역은 주위 유체의 혼입(entrainment)율을 증가시키고, 연료와 공기의 급속한 혼합을 촉진하며, 화염길이를 짧게 함으로써 화염이 안정화됨을 밝혔다. Leuckel 등<sup>9)</sup>은 중앙에는 비스윙제트가 위치하고 환상부에는 스윙공기제트가 위치하는 비예혼합 싱글스윙버너를 사용하여 다양한 실험들을 수행하였으며, Chen 등<sup>10)</sup>은 스윙유동에 있어서 증가된 혼합 특성들을 중심부에서 형성되는 Toroidal 재순환영역의 결과로 분석함으로써 비예혼합 화염내에서 일어나는 물리적인 과정들을 이해할 수 있는 정보를 제공하였다. Gupta 등<sup>11)</sup>은 2중의 동심스윙버너를 통해 두 개의 환상통로에서 스윙유동을 도입하여 제트의 축방향모멘텀과 각모멘텀을 제어함으로써 반경방향의 스윙분포의 변화를 시도하였으며, 그 결과 상당히 다른 화염안정성한계, 난류레벨, 체적열발생률 그리고 연소특성을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍난방기에 적용할 수 있는 콘(cone)형 배플판을 갖는 건(gun)식 가스 스윙버너를 연구 대상으로 하였다. 이 가스버너는 기하학적으로 스윙베인과 슬릿이 원통형 선단부에 배치되어 있기 때문에, 슬릿부와 스윙베인부가 각각 갖는 유동장 특성을 살펴보고 과연 이들이 가스버너의 주 유동장 구조에 어떤 영향을 미치는가를 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 이 가스버너를 토대로 각각 슬릿부와 스윙베인부만을 갖는 버너형상으로 변형시켜 주 가스버너를 포함한 3가지 버너 모델을 고려하여 실험하였다. 이들로부터 얻어진 난류유동장을 X-Y평면 및 Y-Z평면에서 각각 비교 분석하고자 연소실이 배제된 자유공간내에서 형성되는 3차원 난류유동장을 일차적으로 열선풍속계를 활용하여 평균속도 등을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 콘형 배플판을 갖는 건식 가스버너의 상세 구조를 나타내는 그림이다. 이 가스버너는 원통부 선단에 약 45°경사지게 콘형 배플판이 부착되어 있으며, 이 배플판 경사면에는 스윙베인 8개가 있고, 배플판 바로 위쪽에는 방사상으로 8개의 공기분출 슬릿(slits)이 위

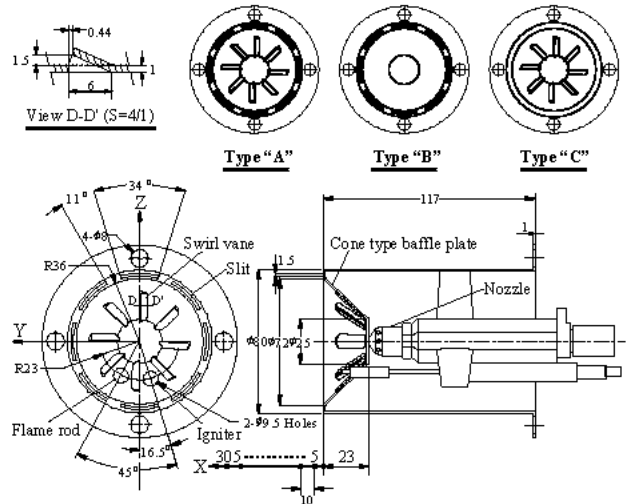


Fig. 1 Configuration of gas burner model

치해 있다. Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 설치한 가스버너로부터 열선풍속계를 이용하여 3차원 난류유동장을 측정하는 그림이다. 본 연구에서 사용한 아음속풍동은 원심형 송풍기와 3.75 kW인 DC 모터, 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 구성되어 있다. 시험부의 성능은 단면 크기 220 mm(폭)×220 mm(높이)×410 mm(길이)에서 약 35 m/s의 풍속이 얻어지고, 평균유속 15 m/s에서 약 0.02% 미만의 난류강도가 얻어진다. 또 비연소시 난류유동장을 측정하기 위해서 사용한 3차원 열선풍속계 시스템(hot-wire anemometer system, Dantec 90N10 Streamline)은 크게 정온형 열선풍속계, 속도 및 방향교정기(calibrator, Dantec 90H 01 & 90H02), 3차원 자동이송장치(automatic traversing system, Dantec 41T50 & 41T75) 그리고 PC로 구성되어 있다. 또 이들 모두 RS-232C에 의해 온라인(on-line)으로 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 이용하였다. X-probe를 만족하는 교정속도 및 Yaw 계수들은 먼저 열선풍속계와 온라인으로 연결된 교정기를 통해 속도와 방향에 대한 교정작업(calibration)을 실시한 후 얻을 수 있었다<sup>12,13)</sup>. 이때 속도교정에는 최대속도 20 m/s까지 실시하였는데, 그 결과를 5차의 다항식에 의해 나타내었을 때, 본 연구에서는 ±0.4% 이하의 정확도를 얻을 수 있었다. 또 방향성에 대한 X-probe 교정은 10 m/s의 속도로 -40°에서 40°까지 10°간격으로 실시하였는데, 그 결

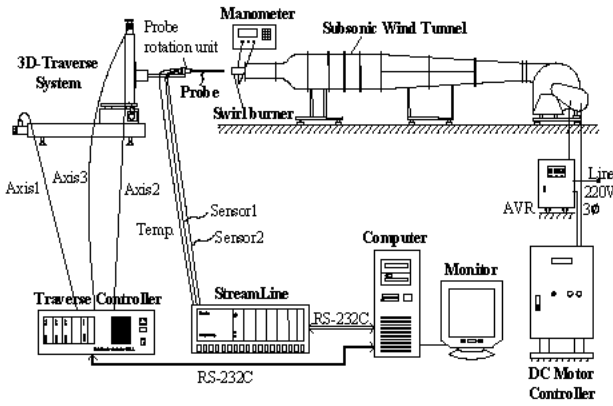


Fig. 2 Schematic diagram including hot-wire anemometer system

과 각 채널별 평균 Yaw계수는 Fig. 1에서 Type A 실험의 경우<sup>14,15)</sup> 각각  $k_1^2 = 0.064$ ,  $k_2^2 = 0.074$ 로 그리고 Type B와 Type C의 실험에는 각각  $k_1^2 = 0.088$ ,  $k_2^2 = 0.106$ 을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 A/D 변환기의 샘플링 주파수를 채널당 20 kHz, 샘플링 수를 채널 당 102,400개, 신호조정기의 Low-pass 필터를 30 kHz로 각각 사용하였다. 또 아음속풍동의 운전속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력 탭(tap)에서 얻어지는 압력 164 Pa을 기준으로 조정하였다. 이 압력은 팬테스터(fan tester) 출구에 버너모델들을 설치하고 공기량을 450 l/min로 보냈을 때 버너 압력 탭에서 얻어지는 압력과 같다.

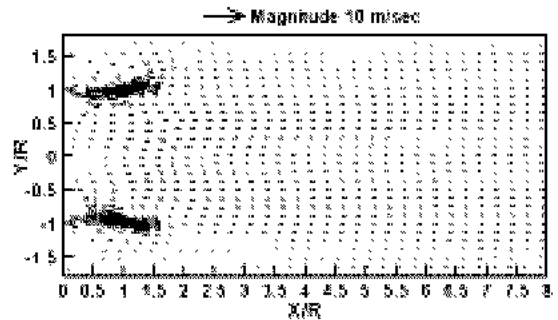
본 연구에서 고려한 3개의 버너 샘플은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘형 배플판을 갖는 건식 가스 스윙버너에서 화염봉(flame rod)과 점화장치(igniter)를 제거하고, 그 구멍들을 접착테이프로 막은 다음 각각 슬릿부와 스윙베인부만을 갖는 버너형상으로 변형시켜 주 가스버너를 포함한 Type A, Type B, Type C로 3가지 모델을 준비하였다.

한편 측정위치는 버너 형상이 확대칭을 이루고 있기 때문에 Probe를 X-Y평면(수평면) 내에 이동하면서 X축 방향으로 Probe를 보호하기 위해 버너 선단으로부터 5 mm 떨어진 위치부터 시작하여 10 mm씩 305 mm까지, Y축 방향으로는 원점을 중심으로 -70 mm에서 70 mm까지 5 mm 간격으로 설정하였다. 또 Y-Z평면 내에서는 유동장에서 특별한 모습을 보여주는 X축 방향의 거리 5, 30, 55, 90 mm에서 반지름(R) 방향에 대해서는 0에서 70 mm까지 5 mm 간격으로, 회전각( $\theta$ ) 방향으로는 0°에서 355°까지 5°간격으로 각각 측정하였다. 여기서 콘형 배플판 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿으로부터 분출되

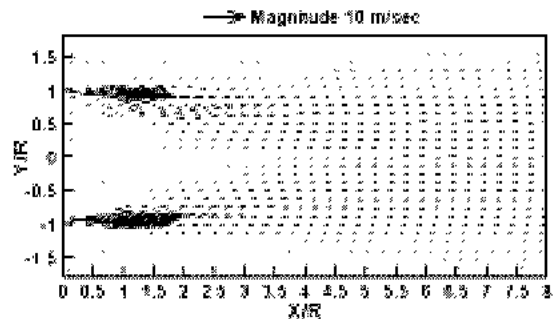
는 속도의 크기가 가장 크기 때문에 이 부근에서는 상세한 유속 측정을 위해서 1 mm씩 Probe를 이송하여 상세하게 측정하였다. 이때 유동장내의 실내 온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 약  $19 \pm 0.5$  °C로 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 AVR을 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

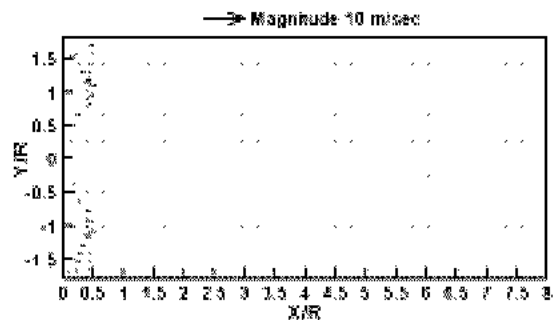
Fig. 3은 X-Y평면(수평면) 내에서 측정된 X축 방향 평균속도 성분 U와 Y방향 평균속도 성분 V로 그려진 3가지 버너 모델에 대한 벡터(vector) 그림들이다.



(a) Type A (complete model)

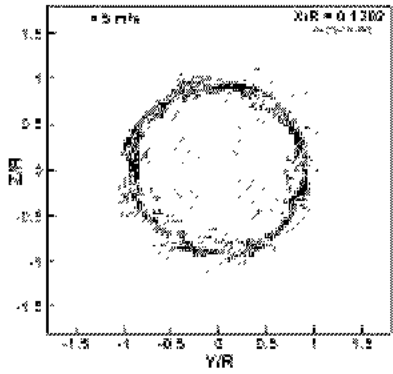


(b) Type B (model with only slits)

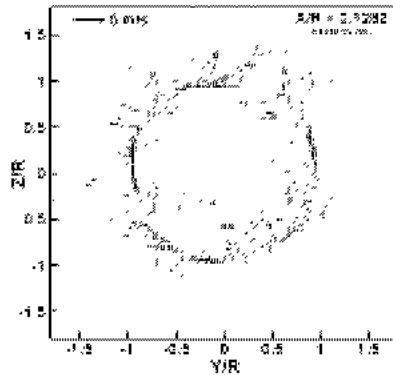


(c) Type C (model with only swirl vanes)

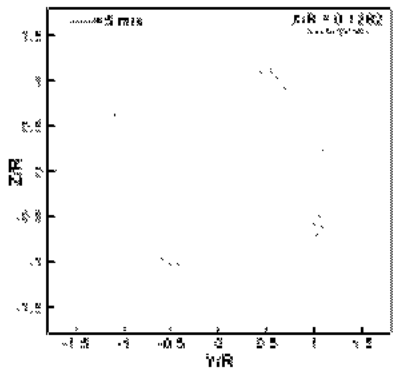
Fig. 3 Vector plots by mean velocity U-V in the X-Y plane



(a) Type A(complete model)



(b) Type B(model with only slits)

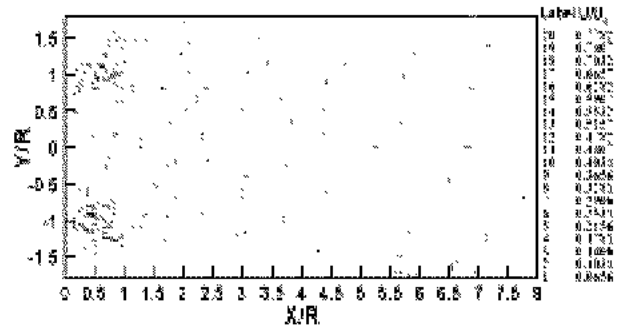


(c) Type C(model with only swirl vanes)

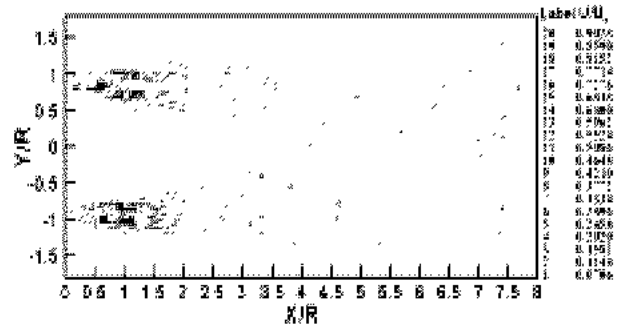
Fig. 4 Vector plots by mean velocity  $V-W$  in the  $Y-Z$  plane

슬릿부만을 갖는 Type B 모델의 벡터 분포는 버너 중심부쪽으로 향하려는  $Y$ 축 방향 속도성분  $V$ 에 의해 각 슬릿부에서 독립적으로 분사된 빠른 제트유동이 하류영역으로 갈수록 합류되어 약  $X/R=6$ 부터는 단일노즐제트의 속도분포처럼 완전히 혼합된 모습을 보여주고 있다. 반면에 스월베인만을 갖는 Type C의 경우에는 버너 선단의 초기영역에서만 스월베인 바깥쪽을 중심으로 빠른 속도가 존재하지만 하류지역으로 조금만 진행되어

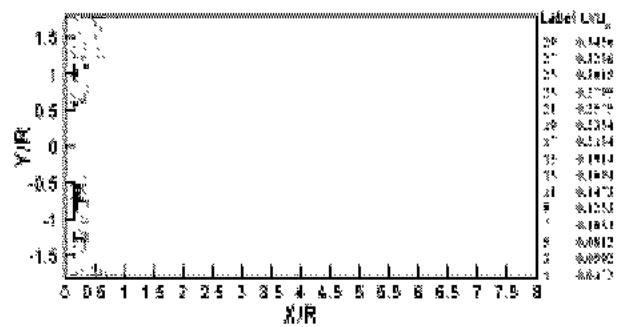
도 속도가 전혀 존재하지 못하는 결과들을 보여주고 있다. 이것은 스월베인에 의한 회전유동이 방사상으로 형성되기 때문에 상대적으로  $X$ 축 방향으로 향하는 속도성분이 초기영역에서조차도 존재하지 않게 된다. 그러나 슬릿부와 스월베인부로 구성된 Type A에서 벡터분포는 약  $X/R=3.5$ 이전의 버너 중심부 영역에서 상대적으로 큰 속도분포를 보여주고 있는데, 이것은 방사상으로 분출하는 스월베인부의 회전유동을 빠른 슬릿부의 제트유동이 마치 에어커튼(air-curtain)처럼 에워싸아 회전유동을  $X$ 축 방향으로 안내하기 때문에 초기영역 인데도 불구하고 다른 모델에 비해 버너 중심부에서 비교적 큰 속도가 존재하게 된다. 그리고 측정된 전 영역에 걸쳐서 Type B의 경우보다도 더



(a) Type A(complete model)



(b) Type B(model with only slits)

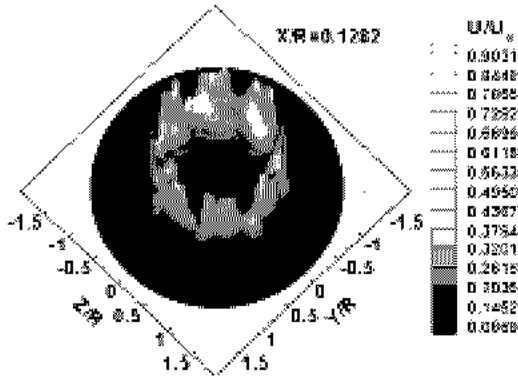


(c) Type C(model with only swirl vanes)

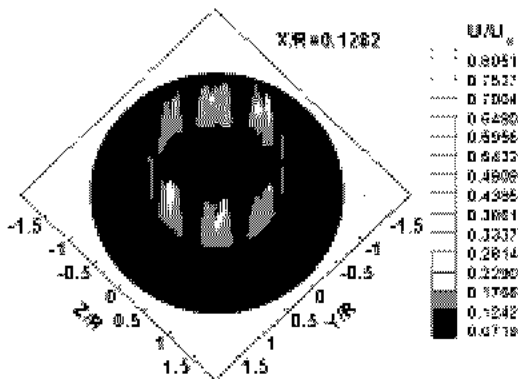
Fig. 5 Axial mean velocity contours in the  $X-Y$  plane

큰 속도분포가 더 넓게 확산되어 나타남을 알 수 있으며, 약  $X/R=8$ 부터 단일노즐제트의 속도분포처럼 완전히 혼합된 모습을 보여주고 있다.

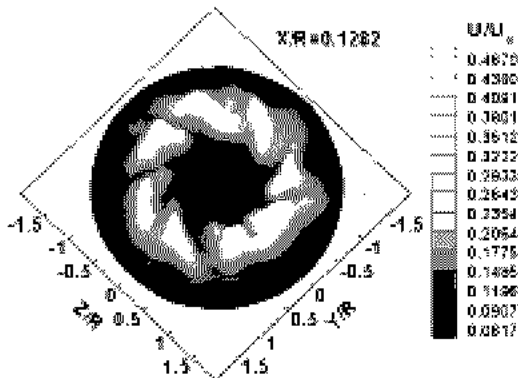
Fig. 4는 버너선단에 근접한 초기영역인  $X/R=0.1282$ 의 Y-Z평면내에서 측정된 Y방향 평균속도 성분 V와 Z방향 평균속도 성분 W로 그려진 세가지 버너 모델에 대한 벡터(vector) 그림들이다.



(a) Type A(complete model)



(b) Type B(model with only slits)



(c) Type C(model with only swirl vanes)

Fig. 6 Axial mean velocity contours in the Y-Z plane

슬릿부만을 갖는 Type B에서는  $Y/R=Z/R=\pm 0.97$ 에 해당하는 슬릿부 내측의 버너중심부쪽으로 유동방향을 갖는 평균속도 V와 슬릿부 내외측 영역에 따라 각각 버너 중심부쪽과 바깥쪽으로 유동방향을 갖는 평균속도 W에 의해 슬릿부를 중심으로 비교적 큰 속도의 매우 무질서한 분포를 보여주고 있지만, 스월베인부만을 갖는 Type C의 경우에는 속도가 크게 줄었지만 Y, Z방향으로 크게 확산된 분포를 보여주며, 특히 스월베인을 빠져나오는 회전유동이 반시계 방향으로 잘 나타나 있다.

반면에 슬릿부와 스월베인부를 동시에 갖고 있는 Type A의 경우에는 반경방향으로 확산하려는 스월베인의 회전유동이 슬릿부를 빠져나오는 빠른 제트유동과 슬릿부 근처에서 충돌하기 때문에 버너 외곽으로 향하는 벡터보다는 슬릿부 근처에서 넓게 중첩된 모습을 보여주고 있다.

Fig. 5는 X-Y평면내에서 3가지 버너 모델에 대하여 측정된 X방향 평균속도성분 U를 버너출구 속도  $U_e$ 로 무차원화하여 나타낸 그림들이다.

슬릿부와 스월베인부를 동시에 갖추고 있는 Type A에서 다른 모델들과 현저히 차이를 보이는 특징은 슬릿부를 중심으로 약  $Y/R=\pm 1.5$ 위치까지 큰 속도가 분포되며, 슬릿부만을 갖는 Type B에서와 같이 약  $X/R=2.5$ 이전의 버너 중심부 영역에서 거의 존재하지 않던 속도가 상당히 큰 속도를 형성하고 있으며, 하류영역에 있어서도 주위로 확산되는 유동폭이 Type B보다는 훨씬 더 크게 형성됨을 알 수 있다.

이것은 버너 선단의 초기영역에서 상대적으로 축방향보다는 반경방향으로 더 현저히 확산되어 속도가 느린 스월베인부만을 갖는 Type C의 회전유동을 슬릿부의 빠른 제트유동이 감싸므로 약  $Y/R=\pm 1.5$ 위치까지는 회전유동의 관성력이 작용하나, 더 이상은 반경방향으로 향하지 못하고 X축 방향으로 유동방향을 틀기 때문이다.

Fig. 6은  $X/R=0.1282$  위치의 Y-Z평면 내에서 측정된 X방향 평균속도성분 U를 버너출구 속도  $U_e$ 로 무차원화하여 나타낸 그림들이다.

슬릿부만을 갖는 Type B 모델에서는 오로지 8개의 슬릿부에서만 빠른 속도가 분출되지만 스월베인부만을 갖는 Type C 모델의 경우에는 속도 크기가 현저히 줄어들어 반시계 방향으로 회전하는 회전유동이 8개의 스월베인부 바깥쪽에서 형성되는 Peak치와 더불어 훨씬 넓은 영역을 형성하고 있다.

따라서 슬릿부와 스월베인부를 동시에 구성하고

있는 Type A 모델에서는 슬릿부의 빠른 제트유동과 스윙베인부의 회전유동이 동시에 결합되면서 슬릿부에서는 여전히 빠른 제트유동이 형성되고 있으며, 스윙베인부의 회전유동이 슬릿부 사이를 제외하고는 외측으로 벗어나지 못하고 있어 Type C보다도 버너 중심부까지 더 확산되어 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

큰형 배플판을 갖는 가스 스윙버너의 3차원 난류유동장을 열선유속계의 X-probe를 이용하여 X-Y평면 및 Y-Z평면에서 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 건식 가스버너에서 슬릿부의 빠른 제트유동은 스윙베인부의 회전유동을 감싸는 에어커튼의 역할을 한다.
2. 건식 가스버너에서는 반경방향으로 향하는 회전유동의 관성력과 슬릿부의 에어커튼 효과로 인해서 슬릿부를 벗어난 약  $Y/R=1.5$ 까지 더 넓은 유동폭을 형성하며, 약  $X/R<2.5$ 의 버너 중심부에서도 상당히 큰 속도가 유지된다.
3. 건식 가스버너에서 유동장을 효과적으로 제어하기 위해서는 스윙베인부를 Type A 모델과 같이 슬릿부 안쪽에 위치시켜야 한다.

#### 후 기

본 연구는 2002년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. H. Hibara and K. Sudou, "Swirling Jet along a Solid Surface", Transactions of JSME (Part B), Vol. 65, No. 629, pp. 130~137, 1999
2. M. Shioji, I. S. Kim, M. Ikegami and K. Murakami, "Flame Stability and NOx Formation in a High-Intensity Swirl Burner", Transactions of JSME (Part B), Vol. 64, No. 621, pp. 222~227, 1998
3. J. M. Beer and N. A. Chigier, Combustion Aerodynamics, John Wiley &

- Sons, pp. 102~104, 1972
4. A. H. Lefebvre, Gas Turbine Combustion, pp. 126~135, 1983
5. N. Syred and J. M. Beer, "Combustion in Swirling Flows : A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143~201, 1974
6. D. Froud, T. O'doherty and N. Syred, "Phase Averaging of the Precessing Vortex Core in a Swirl Burner under Piloted and Premixed Combustion Conditions", Combustion and Flame, Vol. 100, pp. 407~412, 1995
7. J. M. Tsao and C. A. Lin, "Reynolds Stress Modelling of Jet and Swirl Interaction Inside a Gas Turbine Combustor", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol. 29, pp. 451~464, 1999
8. A. K. Gupta, D. G. Lilley and N. Syred, Swirl Flows, Abacus Press, Tunbridge, England, 1984
9. I. W. Leuckel and N. Fricker, "The Characteristics of Swirl-Stabilized Natural Gas Flames", J. Inst. Fuel, Vol. 49, pp. 103, 1976
10. R. H. Chen and J. F. Driscoll, "The Role of Recirculation Vortex in Improving Fuel-Air Mixing Within Swirling Flames", 22nd Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 531~540, 1988
11. A. K. Gupta, J. M. Beer and J. Swithenbank, "Concentric Multi-Annular Swirl Burners: Stability Limits and Emission Characteristics", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 79~91, 1976
12. H. H. Bruun, Hot-Wire Anemometry, Oxford Science Publications, pp. 132~163, 1996
13. Dantec, Streamline User's Reference Manual, Chapter 8.3 Algorithms
14. J. K. Kim, "Investigation of the Three-Dimensional Turbulent Flow Fields of the Gas Swirl Burner with a Cone Type Baffle Plate(I)", KSME International

Journal, Vol. 15, No. 7, pp. 895~905,  
2001

15. J. K. Kim, "Investigation of the Three-Dimensional Turbulent Flow Fields of the Gas Swirl Burner with a Cone Type Baffle Plate(II)", KSME International Journal, Vol. 15, No. 7, pp. 906~920, 2001