

콘형 가스버너의 난류유동장에 대한 슬릿과 스월베인의 역할

김 장 권* · 정 규 조

The Role of Slits and Swirl Vanes on the Turbulent Flow Fields in Cone Type Gas Burner

Jang-kweon Kim and Kyu-jo Jeong

Key Words: Gas Swirl Burner(가스 스월버너), Slit(슬릿), Swirl Vane(스월베인), Hot-Wire Anemometer(열선풍속계), Subsonic Wind Tunnel(아음속풍동), Turbulent Flow Characteristics(난류유동특성)

Abstract

The gun-type gas burner adopted in this study is generally composed of some slits and swirl vanes. Therefore, this paper is studied to investigate the effect of slits and swirl vanes on the turbulent flow fields in the horizontal plane of gas swirl burner with a cone type baffle plate measured by using X-probe from hot-wire anemometer system. This experiment is carried out at flow rate 450 l/min, which is equivalent to the combustion air flow rate necessary for heat release 15,000 kcal/hr in gas furnace, in the test section of subsonic wind tunnel. When the burner has only swirl vanes, the axial mean velocity component shows the characteristic that spreads more remarkably toward radial direction than axial one, but when it has only slits, that is developed spreading more toward axial direction than radial one. Therefore, because the biggest speed is spurted in slits and it derive main flow toward axial direction encircling rotational flow that comes out from swirl vane that is situated on the inside of slits, both slits and swirl vanes composing of cone type gas burner act role that decreases the speed near slits and increases the flow speed in the central part of a burner. Moreover, because rotational flow by swirl vanes and fast jet flow by slits increase turbulent intensities effectively coexisting, the turbulent kinetic energy is distributed with a bigger size fairly near slits than burner models which have only slit or swirl vanes within $X/R < 0.6410$.

1. 서 론

최근 들어 생활수준의 급속한 향상과 경제규모의 증가에 따라 에너지 소비는 과거에 비해 크게 증가하고 있다. 특히 에너지 과다 소비는 지구환경 문제에 직접적인 문제를 일으키고 있다. 따라서 에너지 수급 문제와 환경문제를 해결하기 위해 국내에서도 예전에 등유를 연료로 사용하던 난방기기를 LNG, LPG 등 청정연료를 사용하는

고효율·저공해의 연소기로 개발하는 노력이 활발히 이루어지고 있다.^(1,2,4)

가스버너(gas burner)를 사용하는 연소기의 연소상태는 연료가스의 성분, 분사 가스의 확산, 연료가스와 공기와의 혼합 등 여러 가지 변수에 의해 좌우되고 있으나, 그중 연료가스와 공기와의 혼합 정도가 연소상태의 가장 중요한 변수가 된다. 따라서 국내외에서 수행되고 있는 버너연구는 주로 버너의 기하학적 형상을 변화시켜 연료가스와 공기가 연소실내에서 가장 혼합이 잘 될 수 있도록 연소특성을 개선하기 위해 유동장 분석을 바탕으로 한 이론적 연구^(1~3)와 실험적 연구^(4~9)로

* 회원, 군산대학교 기관공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr
TEL : (063)469-1848 FAX : (063)469-1841

구분되어 행해지고 있다.

본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍 난방기에 적용할 수 있는 콘(cone)형 배플판을 갖는 건(gun)식 가스 스월버너를 연구대상으로 하였다. 이 가스버너는 기하학적으로 스월베인과 슬릿이 원통형 선단부에 배치되어 있기 때문에, 본 연구에서는 슬릿부와 스월베인부가 가스버너의 난류유동장에 어떤 영향을 미치는가를 파악하기 위해 가스버너에서 각각 슬릿부와 스월베인부만을 갖는 버너형상으로 변형시켜 주 가스버너를 포함한 3가지 버너모델을 고려하였다. 이들로부터 얻어진 난류유동장을 비교 분석하고자 연소실이 배제된 자유공간내에서 연소용 공기량 450 l/min으로 분사되어 형성되는 3차원 난류 유동장을 열선풍속계를 활용하여 평균속도, 난류강도 및 레이놀즈 전단유력 등을 측정하였다.

본 연구의 목적은 건식 가스버너의 특징을 파악하고 기존 버너를 대체할 수 있는 최적화된 설계조건들을 확보하여 향후 신모델 개발 등에 필요한 기초설계자료로 활용코자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 콘형 배플판을 갖는 건식 가스버너의 상세 구조를 나타내는 그림이다. 이 가스버너는 원통부 선단에 약 45° 경사 지게 콘형 배플판이 부착되어 있으며, 이 배플판 경사면에는 스월베인 8개가 있고, 배플판 바로 위쪽에는 방사상으로 8개의 공기분출 슬릿(slit)이 위치해 있다. Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 설치한 가스버너로부터 열선풍속계를 이용하여 3차원 난류유동장을 측정하는 그림이다. 본 연구에서 사용한 아음속풍동은 5마력 원심형 송풍기와 DC 모터, 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 구성되어 있으며, 시험부의 단면 크기 220 mm(폭) × 220 mm(높이) × 410 mm(길이)에서 약 35 m/s의 풍속이 얻어지고, 난류강도는 평균유속 15 m/s에서 약 0.02% 미만인 것이 얻어지는 성능을 갖는다. 또 비연소시 난류 유동장을 측정하기 위해서 사용한 3차원 열선 풍속계 시스템(hot-wire anemometer system, Dantec 90N10 Streamline)은 크게 정온형 열선풍속계, 속도 및 방향교정기

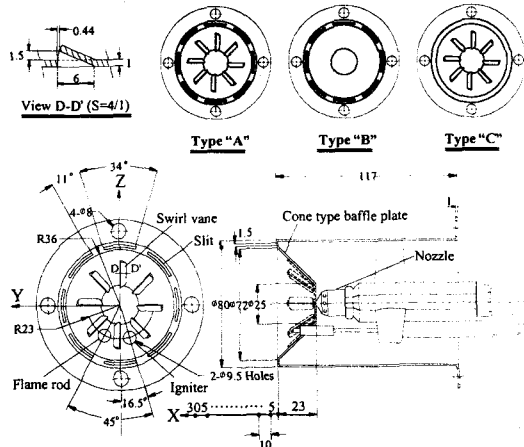


Fig. 1 Configuration of gas swirl burner

(calibrator, Dantec 90H01 & 90H02), 3차원 자동이송장치(traverse system, Dantec 41T50 & 41T75) 그리고 PC로 구성되어 있다. 또 이들 모두 RS-232C에 의해 On-line으로 연결되어 활용되며, 속도 교정기에는 유효압력 10 kg/cm²까지 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 On-line으로 연결된 교정기를 통해 속도와 방향에 대한 교정작업(calibration)을 실시한 후 얻을 수 있었다.^(10,11) 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 속도에서 -40°에서 4

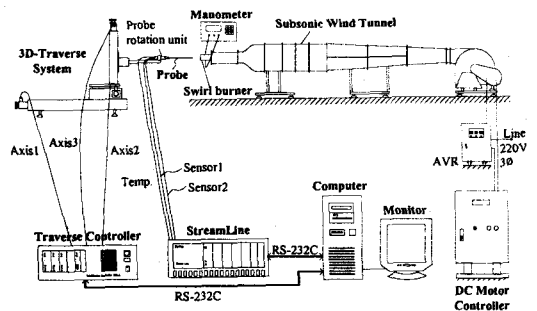


Fig. 2 Experimental apparatus diagram including hot-wire anemometer system

0° 까지 10° 간격으로 실시하였는데, 그 결과 평균 Yaw 계수는 Fig. 1의 Type A 실험의 경우⁽⁴⁾ 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 채널당 102,400개, 신호조정기의 Low-pass 필터를 30 kHz로 각각 사용하였다. 또 아음속풍동의 운전속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력탭(tap)에서 얻어지는 압력 164 Pa을 기준으로 조정하였다. 이 압력은 실제 연소용 공기로 사용되는 공기량 450 l/min에 일치하는 것이다.

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 접촉테이프를 막은 다음 각각 슬릿부와 스윙베인부만을 갖는 버너형상으로 변형시켜 주 가스버너를 포함한 Type A, Type B, Type C로 준비하였다.

한편 측정위치는 버너 형상이 측대칭을 이루고 있기 때문에 Probe를 X-Y평면(수평면) 내에 이동하면서 X방향으로는 Probe를 보호하기 위해 버너 선단으로부터 5 mm 떨어진 위치부터 시작하여 10 mm씩 305 mm까지, Y방향으로는 원점을 중심으로 -70 mm에서 70 mm까지 5 mm 간격으로 설정하였다. 여기서 콘형 배플판 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿으로부터 분출되는 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 ± 0.5 °C로 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 AVR을 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 3가지 종류의 버너에 대해 X-Y평면내에서 측정된 X방향 평균속도성분 U를 버너출구의 속도 U_m 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 축방향의 초기 영역에서 슬릿부만을 갖는 Type B의 평균속도 U는 약 $Y/R = \pm 0.97$ 위치에 있는 방사상의 좁은 슬릿으로부터 분사된 빠른 제트속도에 의해 반경방향의 확산보다는 축방향으로 현

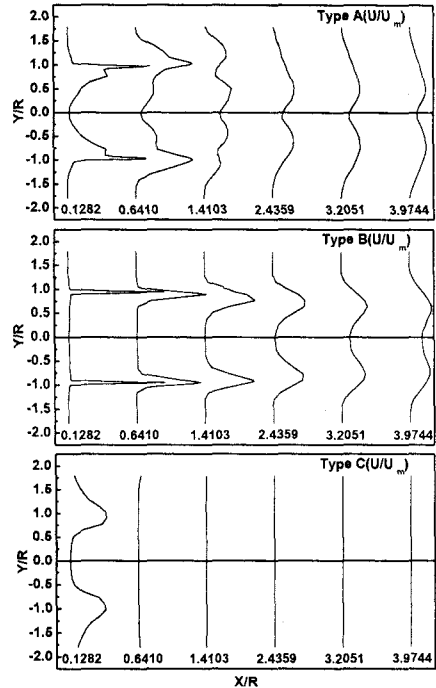


Fig. 3 Mean velocity U profiles measured in the horizontal plane of a burner

저히 발달된 유동분포를 보이나, 스윙베인부만을 갖는 Type C의 경우 축방향보다는 반경방향으로 유동이 현저하게 확산되므로 초기영역에서조차 축방향 평균속도성분이 상대적으로 작은 크기로 분포되어 있으며, $X/R=0.6410$ 이후에서는 거의 0에 가까운 크기로 소멸된다. 따라서 주 버너인 Type A의 경우 슬릿부와 스윙베인이 동시에 존재함에 따라 축방향 초기영역에서 약 $Y/R = \pm 0.97$ 위치에 있는 방사상의 좁은 슬릿부에서 형성된 축방향 평균속도는 반경방향으로 확산되는 스윙베인의 영향으로 Type B의 경우보다 감소되어 나타나고 있다. 또 이 스윙베인은 슬릿부 근처에서 형성된 축방향 평균속도의 Peak치를 축방향 거리 증가에 따라 Type B의 경우보다 감소된 크기로 버너중심부쪽으로 접근시키고, 버너 중심부에서의 축방향 속도성분을 증가시키는 역할을 한다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 3가지 버너의 수평면 상에서 중심선상을 따라 측정된 X방향 평균속도성분 U를 버너출구의 속도로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 슬릿부만을 갖는 Type B의 경우 $Y/R = \pm 0.97$ 에서 분사되는 빠른 제트유동이 버너 중심부쪽으로 확

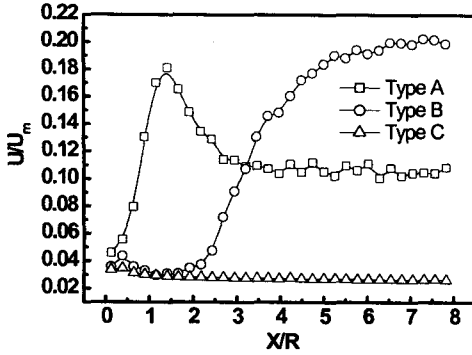


Fig. 4 Mean velocity U profiles along the centerline in the horizontal plane

산되면서 약 $X/R=1.5$ 이후부터 중심선상의 평균속도 U 는 축방향 거리 증가에 따라 현저히 증가하는 모습을 보여주나, 스윙베인만을 갖는 Type C의 경우 축방향의 초기영역을 제외하고는 거의 0에 가까운 속도분포를 보이고 있다. 반면에 슬릿부와 스윙베인을 동시에 갖는 주 버너인 Type A의 경우 약 $X/R=1.5$ 부근에서 버너출구속도의 약 18%에 해당하는 최대치를 가지며, 약 $X/R=3.5$ 이후부터는 버너출구속도의 약 11%에 해당하는 일정한 값을 보여주고 있다. 이와같이 슬릿부와 스윙베인이 공존하면서 약 $X/R \leq 3.5$ 에서는 중심부의 속도를 증가시키는 역할을 하며, 약 $X/R \geq 3.5$ 이후부터는 슬릿부만을 갖는 Type B의 속도를 감소시키는 역할을 동시에 하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 3가지 버너의 수평면 상에서 X 방향의 거리 증가에 따라 측정된 X 방향 평균속도 U 를 버너출구 속도로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 축방향 평균속도는 모두 $Y=0$ 에 대하여 비교적 대칭 분포를 나타내고 있다. 초기영역인 $X/R=0.1282$ 에서는 스윙베인의 회전유동에 의해 반경방향으로 속도가 현저히 확산하는 현상으로 스윙베인만을 갖는 Type C의 경우 버너의 배플판 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿의 위치인 약 $Y/R \pm 0.97$ 에서 버너출구속도대비 약 40%의 최대치를 보이며, 버너 외측에서도 상대적으로 큰 속도를 보여주고 있다. 그러나 슬릿부와 스윙베인을 동시에 갖는 주 버너인 Type A의 경우에는 Type C와는 달리 버너 외곽부에서 거의 속도가 존재하지 않는데, 이것은 스윙베인의 회전유동에 의해 반경방향으로 버너 외곽부까지 확산되

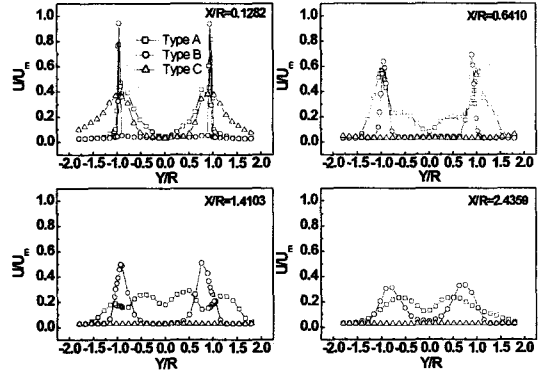


Fig. 5 Distributions of mean velocity U measured in the horizontal plane

는 속도를 슬릿부에서 분사된 빠른 제트가 막기 때문이다. 따라서 Type A의 평균속도 U 는 버너 외곽부에서는 슬릿부만을 갖는 Type B와 유사한 분포를 보여주지만, 버너 중심부에서는 스윙베인만을 갖는 Type C와 유사한 분포를 보여주고 있다. 한편 축방향의 거리가 증가함에 따라서는 스윙베인만을 갖는 Type C의 경우 속도는 Y 방향의 거리에 관계없이 거의 0에 가까운 크기로 일정하게 나타나는 반면 슬릿부만을 갖는 Type B의 경우 슬릿부에서 나타나는 Peak치는 감소하지만 버너 외곽부와 중심부쪽으로 확산하는 경향을 보이고 있다. 따라서 Type A의 경우 슬릿부에서 형성된 Peak치는 Type B의 경우보다 더 감소된 크기를 보여주지만, 버너 중심부쪽에서는 더 큰 속도 크기를 보여주고 있다.

Fig. 6은 3가지 버너 종류에 대해 X - Y 평면내에서 X 방향 거리 증가에 따라 측정된 X , Y , Z 방향 난류속도의 RMS값들을 각각 제공한 후 식 (1)로 정의하여 이 값을 버너출구 속도로 무차원화하여 나타낸 난류운동에너지의 그림이다.

$$KE = \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \quad (1)$$

여기서 u^2 , v^2 , w^2 은 각각 X , Y , Z 방향의 난류속도를 평균 제공한 값으로 레이놀즈(Reynolds) 수 직응력(normal stress)을 나타낸다. 슬릿부만을 갖는 Type B의 난류운동에너지는 버너 선단으로부터 초기영역인 $X/R=0.1282$ 에서는 비교적 매우 작은 크기로 분포되어 있으며, $X/R=0.6410$ 에서는 슬릿부인 $Y/R \pm 0.97$ 을 중심으로 그 크기가 크게 증가하나 $X/R=1.4102$ 이후부터는 슬릿부에서 형성

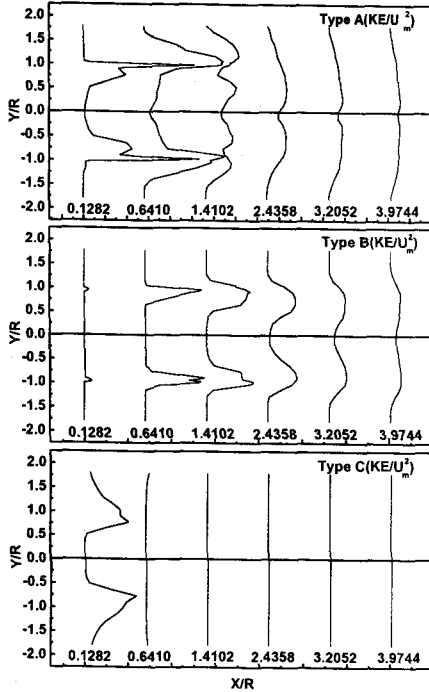


Fig. 6 Turbulent kinetic energy profiles in the horizontal plane

된 난류운동에너지의 크기가 서서히 감소하면서 버너 중심부측에서의 크기는 증가하고 있다. 반면에 스월베인만을 갖는 Type C의 경우 초기영역인 $X/R=0.1282$ 에서만 회전유동에 의해 난류강도가 증가하기 때문에 난류운동에너지의 크기가 상대적으로 크게 분포되어 나타나고 있으나 그 이후부터는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 주 버너인 Type A에서 난류운동에너지는 슬릿부와 스월베인이 동시에 존재하면서 초기영역인 $X/R=0.1282$ 에도 불구하고 상당히 큰 크기로 분포되어 있다. 이것은 스월베인에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하면서 효과적으로 난류강도를 증가시키기 때문이다. 또 축방향의 거리가 증가함에 따라 $X/R=1.4102$ 부터는 슬릿부근에서 형성된 Peak치가 현저히 감소하면서 버너 중심부측의 크기를 증가시켜 $X/R=2.4358$ 부터는 버너 중심부측에서 상대적으로 난류운동에너지가 크게 분포되어 있다.

Fig. 7은 3가지 버너에서 축방향 중심선상을 따라 얻어진 난류운동에너지의 분포를 나타낸 그림이다. 동일한 축방향 위치의 중심선상에서 형성된 슬릿부와 스월베인으로 이루어진 Type A의

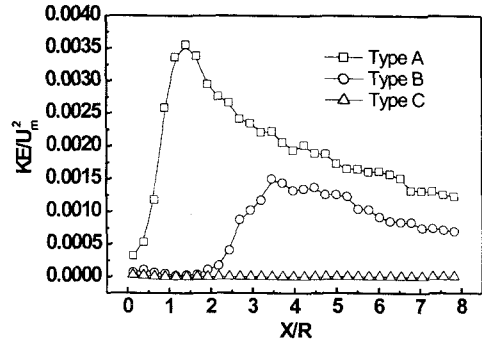


Fig. 7 Turbulent kinetic energy profiles along the centerline in the horizontal plane

난류운동에너지가 각각 슬릿부와 스월베인 단독으로 있을때보다는 가장 크게 분포되어 있으며, 특히 $X/R=1.5$ 부근에서 약 0.35%로 가장 큰 크기를 보여주며, $X/R=1.5$ 부근을 전후로해서 상승, 하강하는 특징을 보여주고 있다.

Fig. 8은 3가지 형상의 버너로부터 난류운동에너지를 직접 비교하기 위해 나타낸 그림이다. 초기영역인 $X/R=0.1282$ 에서 주 버너인 Type A의 난류운동에너지는 슬릿부근에서 약 2.7%로 가장 큰 크기를 보여주며, 배플판 내측에서는 스월베인의 회전유동에 의해 주 버너인 Type A와 스월베인만을 갖는 Type C가 동일한 분포를 보여주는 반면, 슬릿부만을 갖는 Type B의 난류운동에너지는 슬릿부근에서만 약간 존재할 뿐 그 외의 Y방향 위치에서는 거의 존재하지 않는다. 축방향 거리가 증가함에 따라 Type B의 경우 난류운동에너지가 거의 존재하지 않으나, Type A의 경우 슬릿부근의 위치에서 형성된 Peak치는 감소하

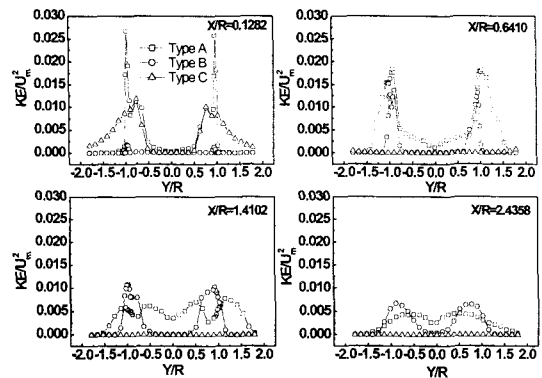


Fig. 8 Distributions of turbulent kinetic energy in the horizontal plane

고, 중심부쪽의 크기들은 상대적으로 증가하고 있다. 또 Type B의 경우 $X/R=1.4102$ 부터 슬릿부 근에서 형성된 Peak치는 스윙베인의 영향이 배제되기 때문에 Type A보다 더 크게 분포되어 있다.

4. 결 론

3종류의 형상을 갖는 가스버너의 3차원 난류유동장에서 얻어진 유동속도의 3차원 평균속도 및 난류 특성치들을 분석한 결과 다음과 같다.

(1) 슬릿부와 스윙베인부로 구성된 콘형 가스버너에서는 슬릿부에서 가장 큰 속도가 분사되고, 이 제트가 슬릿부 안쪽에 위치한 버너 내측의 스윙베인에서 반경방향으로 분사하려는 회전유동을 에워싸아 축방향쪽으로 유도하기 때문에 축방향 거리 증가에 따라 슬릿부근에서 감소된 유속을, 버너 중심부에서 증가된 속도를 각각 보여주고 있다. 따라서 슬릿부와 스윙베인은 약 $X/R \leq 3.5$ 에서는 슬릿부만을 갖는 Type B의 경우보다도 중심부의 속도를 증가시키는 역할을 하여 약 $X/R=1.5$ 에서 버너출구속도대비 약 18%의 Peak 크기를 보여주며, 약 $X/R \geq 3.5$ 이후부터는 슬릿부만을 갖는 Type B보다도 속도를 감소시키는 역할을 하여 약 11%의 일정한 크기분포를 보이고 있다.

(2) 콘형 가스버너의 난류운동에너지는 스윙베인에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하여 효과적으로 난류강도를 증가시키기 때문에 $X/R \leq 0.6410$ 의 초기영역에서 슬릿부나 스윙베인부만을 갖는 버너모델의 경우보다 슬릿부 근처에서 상당히 큰 크기로 분포되어 있다.

참고문헌

- (1) 김인규, 윤옥현, 하만영, 김양호, 1998, "Gun-Type 가스버너의 유동 및 연소특성 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 284~289
- (2) 윤옥현, 1999, "가스 스윙 버너의 유동 및 연소특성에 관한 수치적 연구," 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 7~39
- (3) 김인규, 1997, "Gun Type Burner의 보염기 형상에 따른 화염구조 특성에 관한 연구," 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 43~46
- (4) 김장권, 2001, "가스난방기용 스윙버너의 3차원 난류유동 특성에 관한 실험적 연구," 대한기

- 개학회논문집 B권, 제25권 제2호, pp. 225~234
- (5) Aoki K., Nakayama Y. and Wakatsuki M., 1988, "旋回流を伴う圓筒形燃焼器内流れの研究(第1報, スワール數に對する流動特性)," 日本機械學會論文集(B編), 51卷, 468号, pp. 2759~2766
- (6) Aoki K., Shibata M. and Nakayama Y., 1989, "旋回流を伴う圓筒形燃焼器内流れの研究(第2報, スワール數に對する亂流特性)," 日本機械學會論文集(B編), 52卷, 476号, pp. 1617~1625
- (7) Ikeda Y., Kawahara N. and Nakayama T., 1995, "噴霧燃焼爐内の流れ場とガス成分のフラックス測定," 日本機械學會論文集(B編), 61卷, 581号, pp. 332~338
- (8) Kurihara N., Ikeda Y. and Nakajima T., 1994, "ガンタイプバーナにおける噴霧と流れ場との相互作用," 日本機械學會論文集(B編), 60卷, 570号, pp. 656~661
- (9) Kihm, K. D., Chigier, N., and Sun, F., 1990, "Laser Doppler Velocimetry Investigation of Swirler Flowfields," *J. Propulsion*, Vol. 6, No. 4, pp. 364~374
- (10) Bruun H. H., 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132~163
- (11) Dantec, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms