

콘형 가스 스윙버너의 3차원 난류 유동장 구조

The Structure of Three-dimensional Turbulent Flow Fields of a Cone Type Gas Swirl Burner

김장권 · 정규조

J. K. Kim and K. J. Jeong

Key Words : Axial Mean Velocity(축방향 평균속도), Gas Swirl Burner(가스 스윙 버너), Hot-Wire Anemometer(열선 풍속계), Subsonic Wind Tunnel(아음속 풍동), Swirl Number(스윙 수), Turbulent Kinetic Energy(난류 운동에너지)

Abstract : This paper represents axial mean velocity, turbulent kinetic energy and swirl number based on momentum flux measured in the X-Y plane and Y-Z plane respectively of a cone type gas swirl burner by using X-probe from the hot-wire anemometer system. This experiment is carried out at flow rates 350 and 450 ℓ/min respectively, which are equivalent to the combustion air flow rate necessary for heat release 15,000 kcal/hr in gas furnace, in the test section of a subsonic wind tunnel. Axial mean velocities and turbulent kinetic energies show that their maximum values exist centering around narrow slits situated radially on the edge of and in the forefront of a burner until X/R≅1.5, but they have a peculiar shape like a starfish diffusing and developing into inward and outward of a burner by means of the mixing between flows ejected from narrow slits, an inclination baffle plate and swirl vanes respectively according to downstream regions. Moreover, they show a relatively large value in the inner region of 0.5<r/R<1 until X/R<3. Consequently the combustion reaction is anticipated to occur actively near these regions. On the other hand, the swirl number S_m obtained by integration of velocity profiles shows a characteristic that has an inflection point composing of the maximum and minimum value until X/R<3, but shows close agreement with the geometric swirl number after a distance of X/R=3.

기호설명

향의 평균속도 성분 [m/s]

- D_i : 콘형 보염기의 내주직경 [m]
- D_o : 콘형 보염기의 외주직경 [m]
- KE : 난류운동에너지 [m^2/s^2]
- k_1, k_2 : 방향성 교정에 따른 평균 Yaw계수 [-]
- p : 유동장내 정압 [Pa]
- Q : 버너의 공기량 [$ℓ/min$]
- R : 버너의 외주반경 [m]
- S_g : 형상 스윙수 [-]
- S_m : 모멘텀비에 의한 스윙수 [-]
- U, V, W : 직교좌표계를 만족하는 X, Y, Z방

- $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$: 직교좌표계를 만족하는 X, Y, Z방향의 난류변동속도의 레이놀즈 (Reynolds) 수직응력성분 [m^2/s^2]
- $\overline{u'w'}$: X방향 및 Z방향 성분의 난류전단 응력 [m^2/s^2]
- U_o : 버너입구로 유입되는 평균유속 ($= Q/\pi R^2$) [m/s]
- U_1, U_2 : 열선좌표계에서 열선 1, 2에 반응하는 유동속도 [m/s]
- U_{1cal}, U_{2cal} : 열선좌표계에서 열선 1, 2의 유동 속도 U_1, U_2 에 대한 교정 속도[m/s]
- X, Y, Z : 직교좌표계의 방향 및 거리

접수일 : 2001년 2월 1일

김장권, 정규조 : 군산대학교 기관공학과

α : 스윙베인 각도 [°]
 α_1, α_2 : 열선 1과 2가 Probe 좌표계와 이루는 각도 [°]

1. 서론

가스버너를 사용하는 연소기의 연소상태는 연료 가스(fuel gas)의 성분, 분사가스의 확산, 연료가스와 공기와의 혼합 등 여러 변수에 의해 좌우되고 있으나, 그중 연료가스와 공기와의 혼합 정도가 연소상태의 가장 중요한 변수가 된다. 또 버너설계에 대한 최적화 설계변수로는 보염기 형상과 스윙베인(swirl vane) 각도, 내주반경, 외주반경 등을 들 수 있다. 한편 버너의 기하학적 형상 변화에 따라 연소특성을 개선하기 위한 노력은 실험적 연구¹⁻⁹⁾와 이론적 연구^{10,11)}로 구분되어 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 국외에서는 오일(oil) 버너의 분무 및 유동장에 대한 연구²⁻⁶⁾가 활발하여 이 Data를 바탕으로 가스버너에 적용하고 있지만 국내에서는 오일버너¹⁾는 물론 가스버너에 대한 연구⁷⁻¹⁰⁾ Data가 매우 부족한 실정이다.

Ikeda 등³⁾과 Kurihara 등⁴⁾은 분무연소로에서 상용 Gun형 오일버너의 분무연소 특성을 파악코자 속도분포들을 연소시와 비연소시로 나누어 레이저 유속계를 이용하여 측정하였는데, Baffle Plate 후류측에서 연소시 및 비연소시 연소용공기의 유동특성이 음압으로 나타나 순환류가 존재하고, 반경방향 속도는 외측에 강한 음의 Peak치가 나타남을 확인하였다. Aoki 등^{5,6)}은 원통형 연소기내의 유동현상을 해석하기 위해 LDV와 열선풍속계 그리고 5공 피토판을 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.

본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍 난방기에 적용되고 있는 콘(cone)형 가스 스윙버너로부터 연소실이 없는 자유공간내에 공기량 350, 450 l/min으로 각각 분사되어 형성되는 3차원 난류 유동장을 열선풍속계를 활용하여 X-Y 평면 및 Y-Z평면에서 평균속도 및 난류강도 등을 측정하였는데, 본 연구에서는 공기량 450 l/min에서 얻어진 축방향 평균속도와 난류운동에너지 및 스윙수에 대해 다루고자 한다. 이를 통해 콘형 스윙버너의 특징 및 문제점을 파악하고 기존 모델

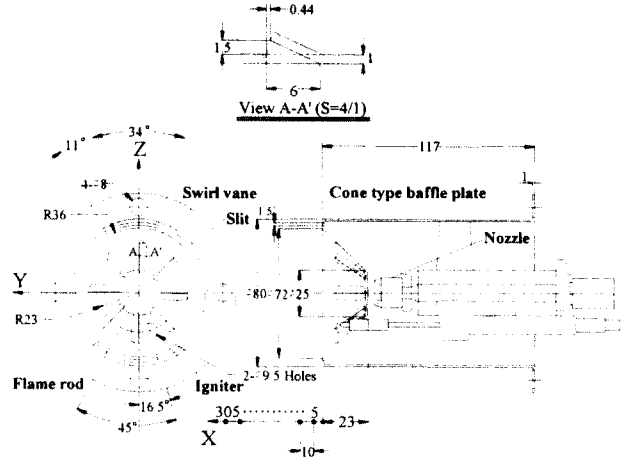


Fig. 1 Configuration of a cone type swirl burner

의 최적화된 설계데이터를 확보한 다음, 향후 신모델 개발 등에 응용할 수 있는 설계 자료로 활용하고자 한다.

2. 콘형 스윙버너의 구조

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 콘형 가스 스윙버너의 상세 구조를 나타내는 그림이다. 이 스윙버너는 난방능력 15,000 kcal/hr의 가스난방기에 적용하고자 개발한 가스버너이다.

본 연구의 콘형 스윙버너는 원통부 선단에 약 45° 경사를 갖는 콘형 보염판이 부착된 형태를 특징으로 하고 있다. 또 이 보염판은 경사면에 위치한 스윙베인 8개와 스윙베인 바로 위에 방사상으로 위치한 8개의 공기분출 슬릿(slits)으로 구성되어 있다.

따라서 본 콘형 스윙버너는 콘형 보염기의 경사면 스윙베인과 외곽의 좁은 방사상 슬릿에 의해

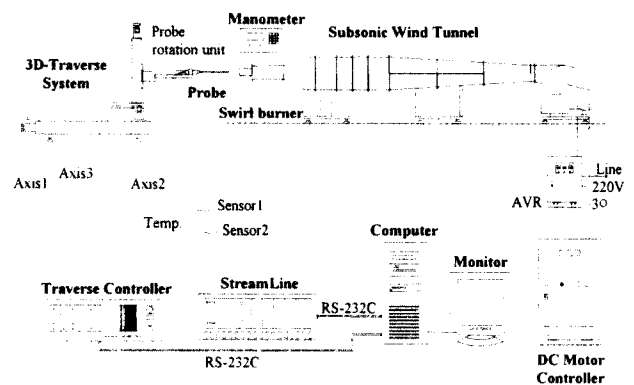


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for data acquisition using hot-wire anemometer system.

순환류(circulation flow)와 스윙을 동시에 유도하지만 스윙베인보다는 좁은 방사상 슬릿으로부터 분출되는 평균속도의 기울기 차이를 크게 유도하여 얻어진 강한 난류강도 발생을 통해 가스연료와 산소가 효과적으로 상호 혼합(mixing)이 이루어지도록 하는 형상을 채용하고 있다고 볼 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 2는 아음속 풍동 출구의 시험부에 설치한 Cone형 스윙 버너로부터 열선풍속계를 이용하여 3차원 난류 유동장을 측정하는 그림을 보여준다. 본 연구에서 사용한 아음속 풍동은 5마력 원심형 송풍기와 DC 모터, 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 구성되어 있으며, 시험부 단면 크기 220(폭) mm × 220(높이) mm × 410(길이) mm에서 약 35 m/s의 최대풍속이 얻어지고 난류강도는 15 m/s의 속도 기준시 약 0.02% 미만인 얻어지는 성능을 갖는다. 또 비연소시 난류 유동장을 측정하기 위해서 사용한 3차원 열선 풍속계 시스템(hot-wire anemometer system, Dantec 90N10 Stream-Line)은 크게 정온형 열선풍속계, 속도 및 방향교정기(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.

3.2 실험방법

3.2.1 X-probe에 의한 속도 연산방법^{14,15)}

본 연구에서 수행된 3차원 유속 측정에는 X-probe(Dantec, 55R51)를 이용하여 열선풍속계와 컴퓨터로부터 다음과 같이 측정된다. 즉 X-probe의 Wire 1, 2에 대한 좌표시스템을 만족하는 속도를 U_1 과 U_2 라고 하고, 이에 대응되는 교정속도를 각각 U_{1cal} 과 U_{2cal} 라고 하면, 평균 Yaw계수 k_1 , k_2 와 함께 이들 사이에는 식(1)과 같은 관계식을 만족하게 된다. 여기서 α_1 과 α_2 는 열선 1과 2가 Probe

$$\begin{aligned} U_{1cal}^2 \cdot (1 + k_1^2) \cdot \cos^2(90 - \alpha_1) &= k_1^2 \cdot U_1^2 + U_2^2 \\ U_{2cal}^2 \cdot (1 + k_2^2) \cdot \cos^2(90 - \alpha_2) &= U_1^2 + k_2^2 \cdot U_2^2 \end{aligned} \quad (1)$$

좌표시스템과 이루는 각도로서 모두 45°로 구성되어 있다. 또 Wire 좌표시스템의 속도 U_1 과 U_2 에 대응되는 Probe 좌표시스템의 속도 U 와 V 사이에는 다음 식이 만족된다.

$$\begin{aligned} U &= U_1 \cdot \cos \alpha_1 + U_2 \cdot \cos \alpha_2 \\ V &= U_1 \cdot \sin \alpha_1 - U_2 \cdot \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 식(1)과 식(2)를 만족하는 교정속도 및 Yaw 계수들을 구하기 위해서 먼저 열선풍속계와 On-line으로 연결된 교정기를 통해 X-probe의 속도와 방향에 대한 교정작업(calibration)을 실시하였다. 이때 속도 교정에는 최대속도 20 m/s까지 실시하였는데 그 결과를 5차의 다항식에 의해 나타내었을 때, 본 연구에서는 $\pm 0.4\%$ 이하의 정확도를 얻을 수 있었다. 또 방향성에 대한 X-probe교정은 10m/s의 속도에서 -40°에서 40°까지 10° 간격으로 실시하였는데 그 결과 Yaw 계수는 각각 $k_1^2 = 0.064$, $k_2^2 = 0.074$ 로 얻을 수 있었다. 따라서 이 결과들을 식(1)과 식(2)에 각각 대입하면 Probe 좌표계에서 만족하는 속도 U 와 V 를 계산할 수 있다. 한편 속도 U 와 W 를 측정하기 위해서는 유동장내에 설치된 X-probe를 반시계 방향으로 90° 회전시켜 얻을 수 있었다. 이 모든 과정은 내장된 소프트웨어 "StreamWare"에 의해 자동으로 처리된다.

3.2.2 유동장내 속도 측정방법

본 연구에서 사용된 아음속풍동의 속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력탭(tap)에서 얻어지는 압력 98, 164 Pa을 기준으로 조정하였다. 이때 이 압력들은 실제 연소용 공기로 사용되는 공기량 350, 450 l/min에 일치한다. 정상적인 속도 측정은 풍동으로부터 얻어지는 속도 변동이 거의 사라진 후 비로소 X-Y평면 및 X-Z평면내 각 위치의 난류 유동장으로부터 충분히 많은 데이터 수를 샘플링(sampling)함으로써 가능하게 하였다. 본 연구에서 사용된 A/D 변환기의 샘플링 주파수는 채널당 10 kHz, 샘플링 수는 채널당 102,400개, 신호조정기의 Low-pass 필터는 30 kHz로 각각 설정하였다.

본 연구에서 채택한 콘형 스윙버너는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘형 보염기에 있는 Flame Rod와 Igniter를 제거하고 그 구멍을 접착테이프(tape)로 막아 사용하였다. 이때 버너 형상이 축대칭을 이루고 있기 때문에 X-Y평면 내에서는 각각의 풍량 조건에서 Probe를 이동하면서 X방향으로는 Probe를 보호하기 위해 보염기 선단으로부터 5 mm 떨어진 위치부터 시작하여 10 mm씩 305 mm까지, Y방향으로는 원점을 중심으로 -70 mm에서 70

mm까지 5 mm 간격으로 3차원 난류속도 분포들을 측정하였다. 또 Y-Z평면 내에서는 유동장에서 특별한 모습을 보여주는 X방향 거리 5, 30, 55, 90 mm에서 R방향에 대해서는 0에서 70 mm까지 5 mm 간격으로, θ 방향으로는 0° 에서 355° 까지 5° 간격으로 측정하였다. 여기서 콘형 보염기 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿으로부터 분출되는 속도의 크기가 가장 크기 때문에 이 부근에서의 상세한 유속 측정을 위해서 이 구간에서는 1mm씩 Probe를 이송하여 상세하게 측정하였다. 이때 유동장내의 온도는 온도변화에 따른 속도 오차를 최대한 억제하기 위해 약 $19 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, 전압변화에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 AVR을 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 축방향 평균속도 분포

Fig. 3은 X-Y평면내에서 측정된 X방향 평균속도 U 를 버너입구로 유입되는 평균유속 U_0 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 여기서 평균속도 U 는 X-Y평면에서 U-V를 측정하기 위해서 설치한 X-probe의 조건하에서 얻어진 X방향 평균속도와 X-probe를 반시계방향으로 90° 돌려서 측정된 X방향 평균속도를 산술평균하여 얻어진 속도이다. Fig. 3의 평균속도 U 는 버너의 콘형 보염기 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿으로부터 분사된 유동속도에 의해 X방향 평균속도 U 가 $Y/R = \pm 0.97$, $X/R=1.5$ 이전까지의 영역에서는 등고선이 매우 밀집되어 나타나 이 영역에서 평균속도가 가장 크게 형성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이 속도는 반경방향으로 확산하려는 경사진 보염기의 스월베인을 빠져 나오는 회전유동을 에워싸게 된다. 따라서 스월베인의 회전유동은 반경방향의 버너 밖으로 뺏어나가지 못하고 분류 중심축상으로 수축되어 버너 중심부 축방향 쪽으로 유동이 발달되며, 하류로 갈수록 유동이 반경방향으로 확산되면서 소멸되어 가고 있다

Fig. 4는 X-Y평면내에서 측정된 Fig. 3으로부터 버너의 중심선상에서 형성된 X방향 무차원 평균속도 U/U_0 를 축방향거리에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 3에서도 언급하였듯이 $Y=0$ 인 버너 중심축상에서 평균속도 U 는 축방향 거리의 증가에 따라 약 $X/R=1.5$ 이전까지는 버너 중앙부가 막혀 있고 또 버너 좌우에 설치된 콘형 배플판의 스월베인을 빠져나오는 유동의 확산과 충돌력에 의해 급속히

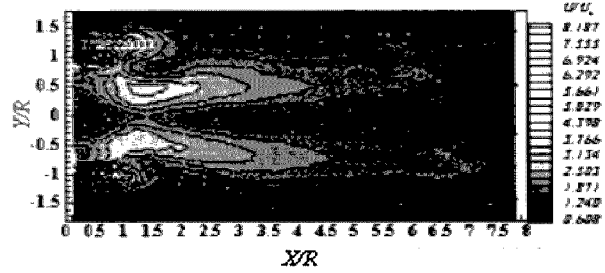


Fig. 3 Mean velocity U profiles in the X-Y plane

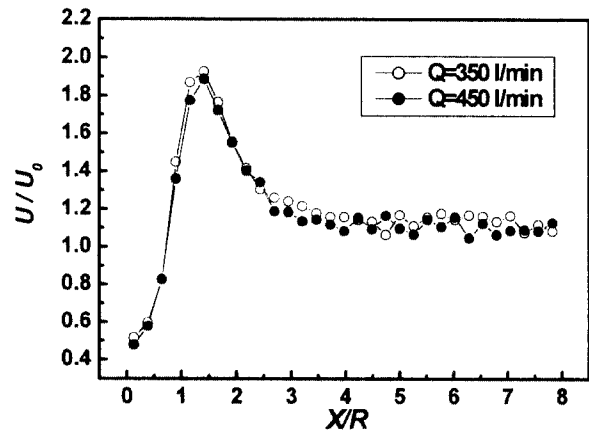


Fig. 4 Mean velocity U profiles along the centerline in the X-Y plane

증가하여 버너 평균 유입속도보다 약 1.9배 가속된 최대크기를 보이다가 $X/R=1.5$ 이후부터는 급속히 감소하여 약 $X/R=4$ 이후부터는 약 $U/U_0=1.1$ 의 값으로 비교적 일정한 크기분포를 나타내고 있다.

Fig. 5는 $X/R=0.1282, 0.7692, 1.4103, 2.3077$ 의 위치의 Y-Z평면내에서 측정된 X방향 평균속도 U 를 버너입구로 유입되는 평균유속 U_0 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)에서 보여주는 버너출구의 초기영역에서 측정된 평균속도 U 는 버너 원점에 대해서 대칭인 분포를 보이며, $r/R=0.97$ 에 해당하는 버너외측에 방사상으로 설치된 8개의 좁은 슬릿을 중심으로 가장 크게 형성되어 버너 상류측 평균속도 U_0 대비 약 9.7배 가속된 속도 크기를 나타낸다. 또 이 방사상의 슬릿에 대한 윤곽도 Fig. 5(a)에서 뚜렷이 볼 수 있다. 그리고 버너 외곽부 근처와 버너 중심방향으로 $0.5 < r/R < 1$ 까지는 슬릿을 빠져 나오는 빠른 속도와 콘형 배플판의 스월베인을 빠져 나오는 유동속도에 의해 주변으로 확산 발달되면서 평균속도 U 가 비교적 크게 형성되어 버너 중심부 쪽으로 갈수록 속도의 크기가 감소하고 있다. 특히 $0 < r/R < 0.5$ 의 버너 중심부에서는 경사진 배플판의 스월베인에 의해서 측정

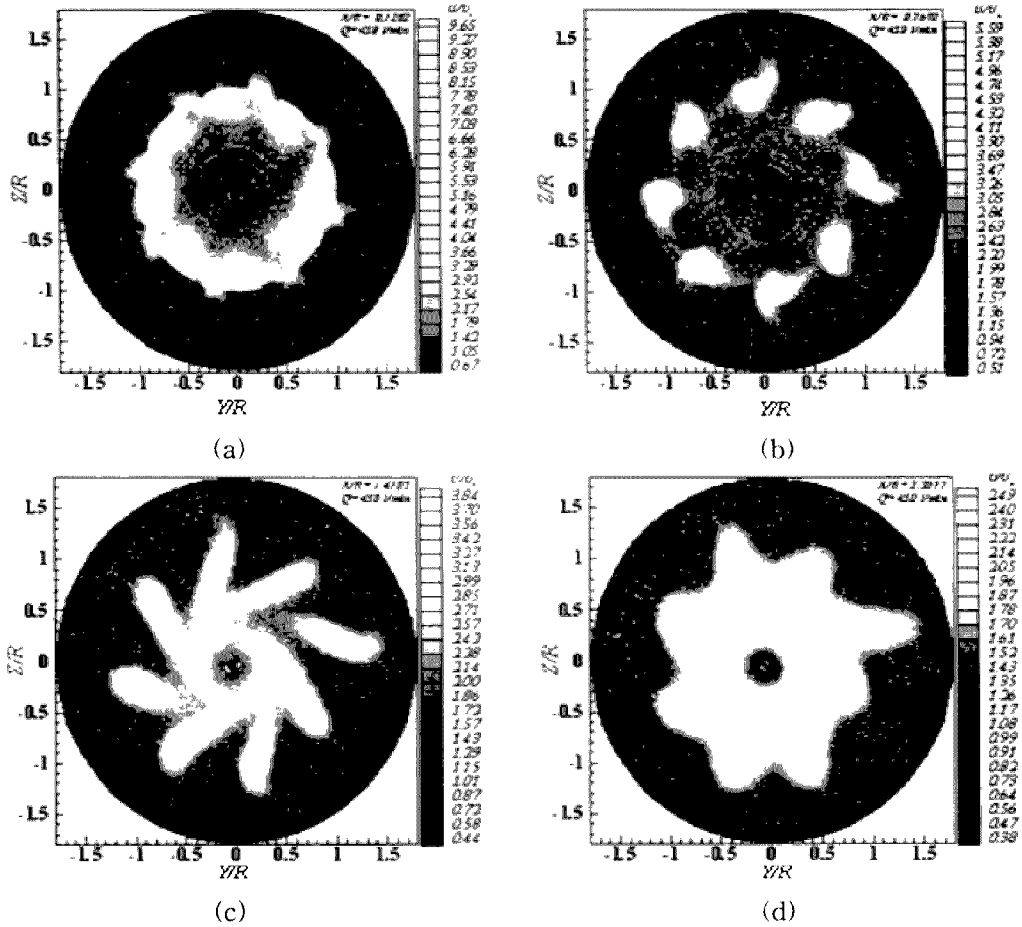


Fig. 5 Mean velocity U profiles in the $Y-Z$ plane

점을 기준으로 볼 때 버너 원점이 가장 먼 거리를 보이기 때문에 여기서 측정되는 유동속도가 가장 작은 속도크기를 보이고 있다. 한편 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)의 경우 최대 평균속도의 크기가 각각 버너 상류측 평균속도 대비 약 5.6배, 3.8배로 감소하지만, 그 범위가 각각의 슬릿부를 중심으로 확장되어지는 것을 볼 수 있다. 게다가 X 방향 측정위치가 하류방향으로 증가할수록 최대 평균속도 U 의 분포는 중심부 쪽으로 향하는 유동의 확산과 발달에 의해서 스윙베인의 회전방향 쪽으로 신장된 유동구조를 보여주고 있으며, 이 현상은 Fig. 5(c)에서 특히 잘 볼 수 있다. Fig. 5(d)의 경우에는 축방향 거리 증가에 따라 유동의 혼합현상이 슬릿부와 스윙베인 사이의 영역에서 크게 활성화되어 평균속도의 최대크기가 버너의 상류측 평균속도 대비 약 2.5배로 형성되어 있다. 그리고 버너 중심부에서 형성되는 평균속도 U 의 분포는 마치 불가사리와 같은 모습을 보여주고 있다.

4.2 스윙 수(swirl number)

일반적으로 선회강도를 나타내는 스윙수는 여러

가지 식으로 제시되지만 크게 스윙베인의 기하학적 형상에 따라 결정되는 형상스윙수 S_g 와 속도분포들로부터 적분하여 얻어지는 모멘텀 비에 의해서 제시되는 스윙수 S_m 으로 대별할 수 있다.¹²⁾ 본 큰형 스윙버너에서는 이 두가지의 스윙수를 비교하고자 한다. 먼저 형상스윙수¹³⁾는 식(3)으로 정의되는데, 본 버너는 스윙수가 약 $S_g=0.34$ 를 갖는 선회 버너임을 확인할 수 있다. 여기서 내주직경 $D_i = 25$ mm, 외주직경 $D_o = 57.8$ mm, 스윙베인각도 $\alpha=24^\circ$ 이다.

$$S_g = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_i/D_o)^3}{1 - (D_i/D_o)^2} \right] \tan \alpha \quad (3)$$

한편, 모멘텀비에 의한 스윙수는 선형모멘텀(linear momentum)의 축방향 유동(flux)과 각모멘텀(angular momentum)의 축방향 유동이 스윙베인의 길이에 걸쳐 보존된다는 가정하에 Chigier 등¹²⁾에 의해 처음 도입되었다. 여기서 난류 축대칭 스윙유동에 대한 지배방정식은 중심선상에서 경계조건과 분류의 경계를 사용하여 적분함으로써 보다 포괄적인 이론적 해석이 가능하게 된다.¹²⁾ 따라서

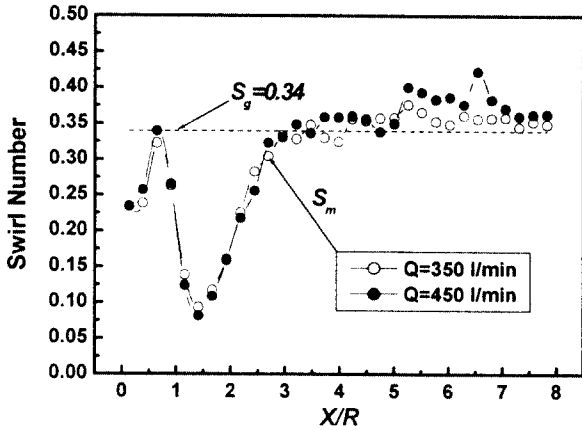


Fig. 6 Swirl number profiles of a cone type swirl burner

난류유동장에 대한 선형운동량의 축방향 유동과 각운동량의 축방향 유동은 속도의 변동성분들을 고려하면 식(4)와 식(5)를 각각 만족하게 된다. 즉

$$G_x = 2\pi \int_0^\infty (\rho u^2 + p) r dr$$

$$= 2\pi \rho \int_0^\infty \left[(U^2 + \overline{u'^2}) - \frac{1}{2} (W^2 + \overline{w'^2} + \overline{v'^2}) \right] r dr \quad (4)$$

$$G_\phi = 2\pi \int_0^\infty \rho u w r^2 dr$$

$$= 2\pi \rho \int_0^\infty (UW + \overline{u'w'}) r^2 dr \quad (5)$$

이때 운동량 비에 의해 주어지는 스월수는 식(6)으로 정의된다.

$$S_m = \frac{G_\phi}{G_x \cdot R} \quad (6)$$

Fig. 6은 형상스월수와 운동량에 의해 얻어진 스월수를 비교한 그림이다. 본 연구에서는 식(6)을 만족하는 스월수를 계산함에 있어서 적분치는 사다리꼴(trapezoid) 적분방식에 의해 구하였으며, 반경 R 은 스월베인의 내주반경과 외주반경의 평균치를 사용하였다. 여기서 보통 주 유동이 스월베인의 외주반경에서 집중되기 때문에 스월수를 계산하는데 있어 이 외주반경을 사용해야 한다는 논란이 있으나, 스월베인의 각도가 작은 경우 스월유동에 대한 내주반경의 영향도 외주반경 못지 않게 중요한 인자로 부각된다.¹²⁾ 먼저 운동량에 의한 스월수 S_m 은 유량의 변화에 관계없이 하류지역 일부를 제외하곤 비교적 유사한 크기분포와 형상을 나타내고 있다. 특히 스월수 S_m 은 축방향 거리 증가에 따라 약 $X/R=0.6$ 까지는 반경방향으로 크게 영향

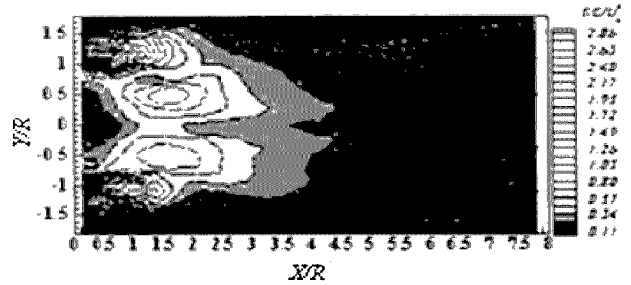


Fig. 7 Turbulent kinetic energy profiles in the X-Y plane

을 미치는 스월베인에 의한 회전모멘텀이 줄어들면서 상대적으로 축방향 쪽으로 영향을 증가시킴으로 급속히 증가하여 약 0.34의 최대값을 보이고 있다. 또 약 $X/R=1.5$ 까지는 급격히 감소하여 최소치 약 0.08을 보이는데, 이것은 슬릿부와 스월베인을 빠져 나오는 유동의 확산 발달에 의해 중심선 상에서 외곽으로 식(5)에서 평균속도 W 및 난류전단응력의 기울기가 양, 음으로 동시에 분포되는데 유동 중심부에서 음의 크기가 상대적으로 크게 지배하기 때문에 회전방향의 운동량에 대한 축방향 성분의 적분치가 감소되어 나타나는 현상이다. 그러나 $X/R=1.5$ 이후부터 $X/R=3$ 까지는 중심부에서 형성된 음의 크기의 영향이 줄어들면서 스월수가 다시 급격히 증가하고 있다. 그러나 $X/R=3$ 이후부터는 하류영역 일부에서는 약간 산만한 크기 분포를 보이는 것을 제외하곤 비교적 일정한 크기를 보이고 있으며, 형상스월비와 비교할 때 거의 일치 또는 약간의 편차를 보이고 있다. 이것은 Kihm 등¹²⁾의 연구 결과에서도 이미 언급된바 있다. 특히 Kihm 등은 이들 결과들을 계산함에 있어서 적분치에 미칠 수 있는 영향들이 속도측정이나 평균과정, Probe의 위치 및 분류(jet) 경계위치 등의 정확성에 달려 있다고 하였다.¹²⁾

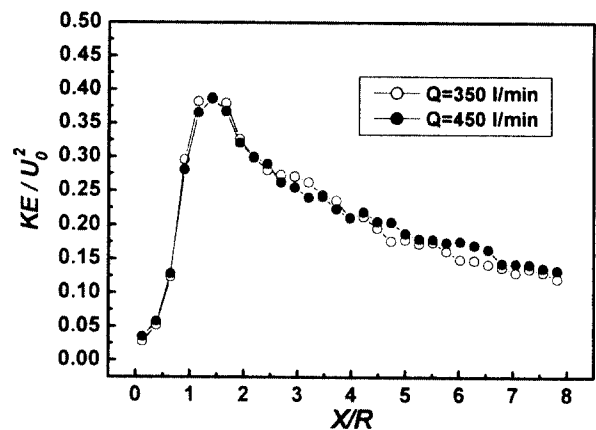


Fig. 8 Turbulent kinetic energy profiles along the centerline in the X-Y plane

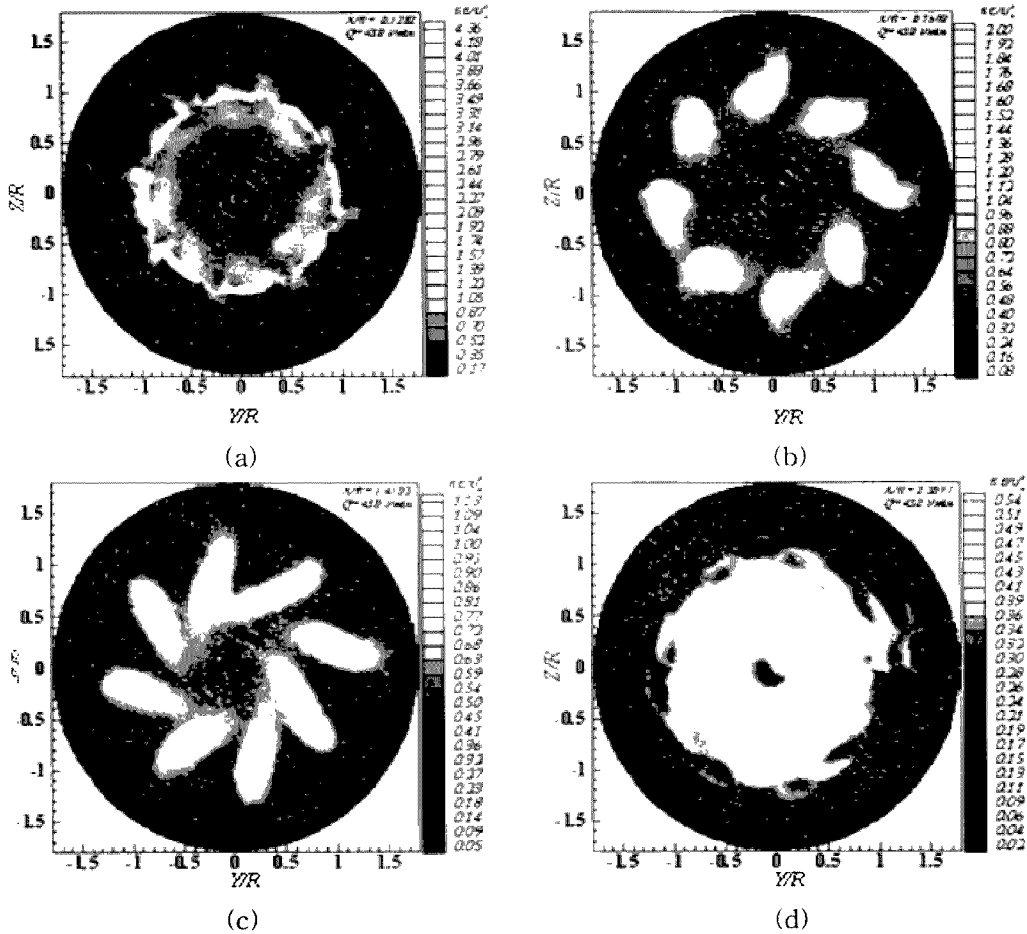


Fig. 9 Turbulent kinetic energy profiles in the Y-Z plane

4.3 난류운동에너지 분포

Fig. 7은 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 X, Y, Z방향 난류변동속도의 RMS(root-mean-square) 값들을 각각 제공한 후 식(7)로 정의된 난류운동에너지를 버너 입구로 유입되는 평균유속 U_0^2 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다.

$$KE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (7)$$

Fig. 7의 난류운동에너지는 중심선상에 대해서는 비교적 대칭인 분포모습을 보여주고 있으며, $Y/R = \pm 0.97$, $X/R = 1.5$ 의 경우 좁은 슬릿부 내부와 외부에서 약 73% 이상의 매우 큰 크기를 보여주고 있다. 특히 난류운동에너지는 비교적 초기영역에 해당하는 $X/R = 3$ 까지는 약 34% 이상의 비교적 큰 크기가 분포되어 있어 이 영역을 중심으로 난류가 활성화되어 있는 것으로 판단된다. 따라서 이 영역은 실제 연소시 양호한 연소조건을 제공하여 고온도 영역이 형성될 것으로 생각된다.¹⁰⁾

Fig. 8은 X-Y평면내에서 측정된 Fig. 7로부터

얻어진 버너의 중심선상에서 형성된 난류운동에너지 KE/U_0^2 을 축방향거리에 따라 나타낸 그림이다. 버너의 중심선상에서 난류운동에너지는 축방향 거리 증가에 따라 급속히 증가하다가 약 $X/R = 1.5$ 에서 약 39%의 크기로 최대치를 보이다가 $X/R = 1.5$ 이후부터는 서서히 감소해 가는 모습을 보여준다.

Fig. 9는 $X/R = 0.1282, 0.7692, 1.4103, 2.3077$ 위치의 Y-Z평면내에서 측정된 식(7)으로 정의되는 난류운동에너지를 버너입구로 유입되는 평균유속 U_0^2 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 버너 선단에서 얻어진 Fig. 9(a)에서의 난류운동에너지는 좁은 슬릿부에 해당하는 $r/R = 0.97$ 주변에서 가장 큰 크기 분포를 나타내고 있으며, 두 번째 큰 크기는 스왈베인과 슬릿부 사이의 영역에 해당하는 $0.5 < r/R < 1$ 영역에서 형성되고 있다. 그러나 난류운동에너지는 축방향 거리의 증가에 따라서 슬릿부를 중심으로 감소하지만, 그 크기는 넓게 확장되어 감을 알 수 있다. 이것은 특히 Fig. 9(b)에서 확인할 수 있다. 그러므로 Fig. 9(c)의 경우 난류운동에너지는 스왈베인을 빠져 나오는 회전유동과 슬

릿부를 빠져 나오는 유동이 이 지역에서 발달하면서 상호 혼합하기 때문에 회전유동 방향으로 향하는 신장된 형상을 보여주고 있다. 한편, 축방향 거리가 더욱 증가함에 따라 Fig. 9(d)의 경우 난류운동에너지는 버너의 전영역에 걸쳐서 균일한 값의 크기로 넓게 분포되어 있다.

5. 결론

콘형 배플판을 갖는 가스 스윙버너의 3차원 난류유동장을 열선유속계의 X-probe를 이용하여 X-Y평면 및 Y-Z평면에서 얻어진 지금까지의 결과들로부터 축방향 평균속도와 난류운동에너지는 약 $X/R=1.5$ 까지는 $Y/R=\pm 0.97$ 및 $r/R=0.97$ 에 해당하는 방사상으로 배치된 슬릿부에서 각각 가장 큰 크기로 분포되어 있다. 또 축방향 평균속도와 난류운동에너지는 슬릿부의 가장 빠른 축방향속도가 반경방향으로 확산하려는 스윙베인의 회전유동에 위싸기 때문에 $X/R=3$ 까지 버너 중심부에서는 경사진 배플판과 스윙베인 사이에서 형성된 유동의 확산과 혼합현상을 축방향쪽으로 유도하여 상대적으로 큰 값을 보여주고 있다. 따라서 이 영역은 실제 연소시 이 영역을 중심으로 가스연료와 산소의 강한 혼합현상이 고 온도 영역을 형성하기 때문에 좋은 연소조건을 형성한다고 볼 수 있다.^{3,4)} 또 Y-Z평면에서 축 방향 평균속도와 난류운동에너지는 각각 축방향 거리 증가에 따라 슬릿부를 중심으로 유동이 확산, 발달하면서 스윙베인의 회전유동과 만나 버너중심부 쪽으로 신장된 모습을 갖다가 하나의 유동구조로 변하고 있다. 한편 운동량 비에 의해 얻어진 스윙수 S_m 은 $X/R=3$ 이후부터는 형상스윙비와 비교적 일치하고 있다. 그러나 $X/R<3$ 의 영역에서는 최대치와 최소치를 갖는 변곡점이 존재하는 특징을 보이고 있다.

후 기

본 연구는 2001년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. 김인규, "Gun Type Burner의 보염기 형상에 따른 화염구조 특성에 관한 연구", 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 43~46, 1997
2. Y. Mizutani, "Visualization and Image Analyses of Combustion Fields", JSME

- International Journal, Series II, Vol. 32, No. 1, pp. 1~26, 1989
3. Y. Ikeda, N. Kawahara and T. Nakayima, "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, 1995
4. N. Kurihara, Y. Ikeda and T. Nakajima, "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, 1994
5. K. Aoki, Y. Nakayama and M. Wakatsuki, "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, 1988
6. K. Aoki, M. Shibata and Y. Nakayama, "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, 1989
7. 김석우, "가스난방기용 스윙버너에서 3차원 난류유동장의 고찰", 군산대학교 대학원 석사학위논문, 2000
8. 김장권, 정규조, 김석우, 김인규, "난방기용 콘형 가스버너에서 3차원 난류유동장 고찰(벡터장 및 평균속도에 대하여)", 한국동력기계공학회지, 제4권, 제4호, pp. 25~31, 2000
9. 김장권, "가스난방기용 스윙버너의 3차원 난류유동 특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제25권, 제2호, pp. 225~234, 2001
10. 윤옥현, "가스 스윙 버너의 유동 및 연소특성에 관한 수치적 연구", 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 7~39, 1999
11. H. T. Jeong, "A Study on the Turbulent Diffusion Combustion Model for Analysis of a Combustion Burner", 포항공대 대학원 석사학위논문, pp. 22~34, 1996
12. K. D. Kihm, N. Chigier and F. Sun, "Laser Doppler Velocimetry Investigation of Swirler Flowfields", J. Propulsion, AIAA, Vol. 6, No. 4, pp. 364~374
13. J. M. Beer and N. A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Applied Science, pp. 100~146, 1972
14. H. H. Bruun, "Hot-Wire Anemometry", Oxford Science Publications, pp. 132~163, 1996
15. Dantec, "Streamline User's Reference Manual", Chapter 8.3 Algorithms