

# 난방기용 콘형 가스버너에서 3차원 난류 유동장 고찰 — 난류특성치에 대하여 —

## Investigation of the Three-dimensional Turbulent Flow Fields in Cone Type Gas Burner for Furnace — On the Turbulent Characteristics —

김장권 · 정규조 · 김석우 · 김인규

J. K. Kim, K. J. Jeong, S. W. Kim and I. K. Kim

**Key Words** : Gas Burner(가스 버너), Hot-Wire Anemometer(열선 풍속계), Reynolds Shear Stress(레이놀즈 전단 응력), Subsonic Wind Tunnel(아음속 풍동), Swirl Number(스윙수), Turbulent Intensity(난류 강도), Turbulent Kinetic Energy(난류 운동에너지)

**Abstract** : This paper represents the turbulent intensity, the turbulent kinetic energy and Reynolds shear stress in the X-Y plane of cone type swirl gas burner measured by using X-probe from the hot-wire anemometer system. The experiment is carried out at flowrate 350 and 450 l/min respectively in the test section of subsonic wind tunnel. The turbulent intensity and the turbulent kinetic energy show that the maximum value is formed in the narrow slits distributed radially on the edge of a cone type swirl burner, hence, the combustion reaction is anticipated to occur actively near this region. And the turbulent intensities  $v$  and  $w$  are disappeared faster than the turbulent intensity  $u$  due to the inclined flow velocity ejecting from the swirl vanes of a cone type baffle plate of burner. Moreover, the Reynolds shear stress  $uw$  is distributed about three times as large as the Reynolds shear stress  $uw$  in the outer region of the cone type gas burner.

### 기 호 설 명

- |            |  |                      |  |
|------------|--|----------------------|--|
| $D_i$      | : 콘형 보염기의 내주직경 [m]                           | $U_{1cal}, U_{2cal}$ | : 열선좌표계에서 열선 1, 2의 유동속도 $U_1, U_2$ 에 대한 교정속도 [m/s] |
| $D_o$      | : 콘형 보염기의 외주직경 [m]                           | $X, Y, Z$            | : 직교좌표계의 방향 및 거리                                   |
| $k_1, k_2$ | : 방향성 교정에 따른 평균 Yaw계수 [-]                    | $\alpha$             | : 스윙배인 각도 [°]                                      |
| $R$        | : 버너의 외주반경 [m]                               | $\alpha_1, \alpha_2$ | : 열선 1과 2가 Probe 좌표계와 이루는 각도 [°]                   |
| $S$        | : 형상 스윙수 [-]                                 |                      |  |
| $U, V, W$  | : 직교좌표계를 만족하는 X, Y, Z방향의 평균속도 성분 [m/s]       |                      |  |
| $u, v, w$  | : 직교좌표계를 만족하는 X, Y, Z방향의 난류변동속도의 RMS성분 [m/s] |                      |  |
| $U_o$      | : 버너입구로 유입되는 평균유속(= $Q/\pi R^2$ ) [m/s]      |                      |  |
| $U_1, U_2$ | : 열선좌표계에서 열선 1, 2에 반응하는 유동속도 [m/s]           |                      |  |

### 1. 서 론

21세기를 맞이하여 인류는 에너지자원의 고갈과 환경파괴라는 큰 문제에 봉착하고 있다. 이에 따라 각국은 고효율·저공해의 연소기 개발에 박차를 가하고 있다. 국내에서도 역시 예전에는 화석 연료를 사용하는 난방기가 주가 되었으나, 최근에는 LNG, LPG 등 청정연료를 사용하는 난방기로의 전환이 활발히 이루어지고 있다.

가스버너(gas burner)를 사용하는 연소기의 연소 상태는 연료Gas의 성분, 분사 Gas의 확산, 연료가

접수일 : 2000년 11월 24일  
김장권, 정규조 : 군산대학교 기관공학과  
김석우 : 군산대학교 대학원  
김인규 : LG전자 디지털 어플라이언스 연구소

스와 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 연구<sup>1,6)</sup>와 이론적 연구<sup>7,8)</sup>로 구분되어 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 국외에서는 오일버너(oil burner)의 분무 및 유동장에 대한 연구가 활발하여 이 Data를 바탕으로 가스버너에 적용하고 있지만 국내에서는 오일버너는 물론 가스버너에 대한 연구 Data가 매우 부족한 실정이다.

Ikeda 등<sup>3)</sup>과 Kurihara 등<sup>4)</sup>은 분무연소로에서 상용 Gun형 오일버너의 분무연소 특성을 과악코자 속도분포들을 연소시와 비연소시로 나누어 레이저 유속계(LDV)를 이용하여 측정하였는데, 배플판(baffle plate) 후류측에서 연소시 및 비연소시 연소용공기의 유동특성이 陰影으로 나타나 순환류가 존재하고, 반경방향 속도는 외측에 강한 陰의 Peak치가 나타남을 확인하였다. Aoki 등<sup>5,6)</sup>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 콘형 가스 스윙버너로부터 연소실이 없는 자유공간내에 공기량 350, 450 ℓ/min으로 각각 분사되어 형성되는 3차원 난류 유동장을 열선풍속계를 활용하여 평균속도, 난류강도, 난류운동에너지 및 레이놀즈 전단응력 등을 측정하였는데, 본 연구에서는 공기량 450 ℓ/min에서 얻어진 난류강도, 난류운동에너지 및 레이놀즈 전단응력에 대해 다루고자 한다. 이를 통해 콘형 스윙버너의 특징 및 문제점을 파악하고 기존 모델의 최적화된 설계데이터를 확보한 다음, 향후 신모델 개발 등에 응용할 수 있는 설계 자료로 활용하고자 한다.

## 2. Cone형 스윙 버너의 구조

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 콘형 가스 스윙버너의 상세 구조를 나타내는 그림이다. 이 콘형 스

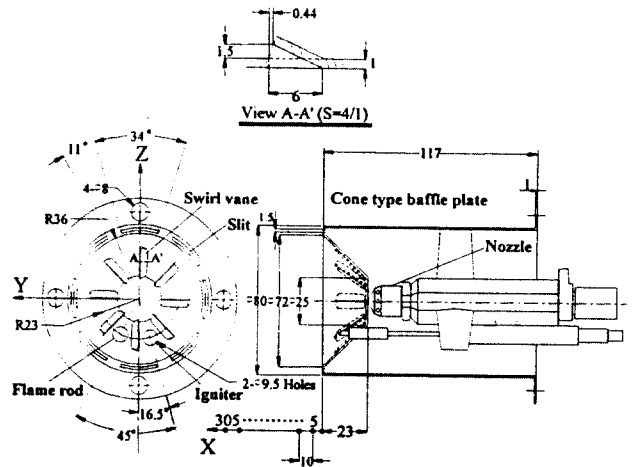


Fig. 1 Configuration of a cone type swirl burner

윙버너는 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 slit)으로 구성되어 있다.

본 콘형 스윙버너는 형상스윙수<sup>9)</sup> 식(1)로 나타내면, 스윙수가 약 S=0.34를 갖는 선회 버너임을 확인할 수 있다. 여기서 내주직경  $D_i = 25$  mm, 외주 직경  $D_o = 57.8$  mm, 선회날개각도  $\alpha = 24^\circ$  이다.

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

따라서 본 콘형 스윙버너는 콘형 보염기의 경사면 스윙베인과 외곽의 좁은 방사상 슬릿에 의해 순환류(circulation flow)와 스윙유동을 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 콘형 스윙 버너로부터 열선풍속계를 이용하여 3차

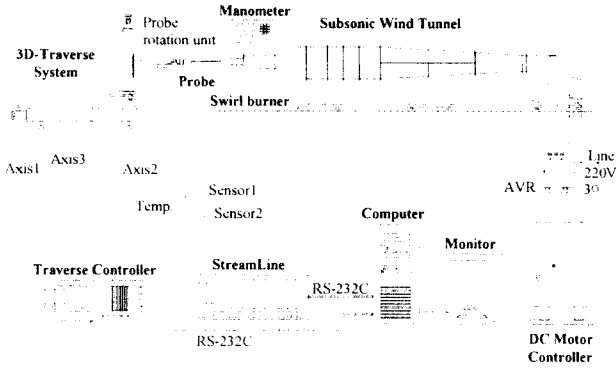


Fig. 2 The experimental apparatus including hot-wire anemometer system.

원 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 풍속이 얻어지고 난류강도는 약 0.02% 미만인 성능을 갖는다. 또 비연소시 난류 유동장을 측정하기 위해서 사용한 3차원 열선 풍속계 시스템(Dantec 90N10 StreamLine)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-232C로 On-line으로 연결되어 활용되며, 속도 교정기에는 유효압력 10 kg/cm<sup>2</sup>까지 발휘되는 공기압축기가 연결되어 있다.

### 3.2 실험방법

#### 3.2.1 X-probe에 의한 속도 연산방법<sup>10,11)</sup>

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 다음과 같은 관계식을 만족하게 된다. 여기서  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 열선 1과 2가 Probe 좌표시스템과 이루는 각도로서 모두 45°로 구성되어 있다. 또 Wire 좌표시스템의 속도  $U_1$ 과

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

$U_2$ 에 대응되는 Probe 좌표시스템의 속도  $U$ 와  $V$  사이에는 다음 식이 만족된다.

$$\begin{aligned}
 U &= U_1 * \cos \alpha_1 + U_2 * \cos \alpha_2 \\
 V &= U_1 * \sin \alpha_1 - U_2 * \sin \alpha_2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 식 (2)와 식 (3)을 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 ±0.4% 이하의 정확도를 얻을 수 있었다. 또 방향성에 대한 X-probe 교정은 10 m/s의 속도에서 -40°에서 40°까지 10° 간격으로 실시하였는데 그 결과 평균 Yaw계수는 각각  $k_1^2 = 0.064$ ,  $k_2^2 = 0.074$ 로 얻을 수 있었다. 따라서 이 결과들을 식 (2)와 식 (3)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 "StreamWare"의 소프트웨어에 의해 자동으로 처리된다.

#### 3.2.2 유동장내 속도 측정방법

본 연구에서 사용된 아음속풍동의 속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력탭(tap)에서 얻어지는 압력 98, 164 Pa를 기준으로 조정하였다. 이때 이 압력들은 실제 연소용 공기로 사용되는 공기량 350, 450 l/min에 일치하는 것이다. 이 압력들은 버너를 송풍식 팬테스터(fan tester)에 연결하여 공기량을 350, 450 l/min으로 각각 공급하였을 때 얻을 수 있다. 여기서 아음속 풍동의 운전은 충분한 시간동안 모터를 기동시킨 다음, 버너측 압력이 설정된 일정 압력 조건에 일치할 때까지 계속되었다. 이후 정상적인 속도 측정은 풍동으로부터 얻어지는 속도 변동이 거의 사라질 때에 비로소 유동장내 각 위치의 난류 유동장으로부터 충분히 많은 데이터 수를 샘플링(sampling)함으로써 가능하게 된다. 본 연구에서 사용된 A/D 변환기의 샘플링 주파수는 채널당 20 kHz, 샘플링 수는 채널당 102,400개, 신호조정기의 Low-pass 필터는 30 kHz로 각각 설정하여 사용하였다.

한편 원하는 측정위치를 설정하고 난류유동장을 측정하기 위해서는 먼저 다음 과정이 필요하다. 즉 Probe를 교정기에 설치하였을 때와 동일한 방향성을 유지한 채 3차원 자동이송장치에 Probe를 위치

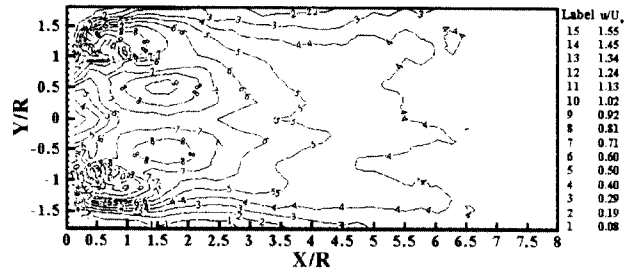
시킨 후, 버너의 기하학적 측정기준인 원점을 참고로 하여 버너 선단의 좌우, 상하로 Probe를 약 1 mm로 미세하게 자동 이송하여 열선풍속계와 PC로부터 얻어지는 속도데이터들을 구하여 다시 정확한 원점을 잡은 다음 실시해야 한다.

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 축소칭을 이루고 있기 때문에 각각의 풍량 조건에서 Probe를 X-Y평면 내에 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. 여기서 콘형 보염기 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿으로부터 분출되는 속도의 크기가 가장 크기 때문에 이 부근에서의 상세한 유속 측정을 위해서 이 구간에서는 1 mm씩 Probe를 이송하여 상세하게 측정하였다. 이때 유동장내의 온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 약  $19 \pm 0.5$  °C로 유지하였으며, 전압변화에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 AVR을 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

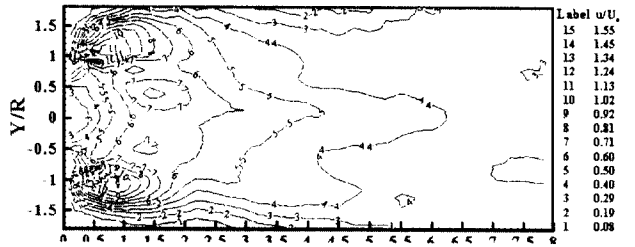
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 난류강도 분포

Fig. 3은 X-Y 평면내에서 측정한 X방향 난류속도의 RMS(root-mean-square) 값을 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림이다. Fig. 3으로부터 X방향 난류강도분포는 Y=0에 대하여 비교적 대칭분포를 보여주고 있으며, 버너의 콘형 보염기 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿근처  $Y/R \approx \pm 1.0$ 의 내외 측에서  $X/R \leq 1.5$ 까지 특히 약 71%이상의 값으로 크게 분포되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 슬릿으로부터 분사된 유동의 평균속도가 크게 분포되어 Y방향에 대한 평균속도 기울기가 가장 크게 형성되고 아울러 스윙베인에 의한 회전유동 등이 작용하고 있어 특히 버너 외곽 부근에서 난류강도가 가장 크게 분포되어 있다. 따라서 연소시 이 영역에서 연료가스과 산소가 반응하여 화염온도가 가장 높게 형성될 것으로 예상된다. 또한 버너중심부에서 X방향 난류강도는 X방향 거리의 증가에 따라 증가하다가 감소해 가는 모습을 보여주다가 약



(a) Turbulent intensity u by X-probe( $0^\circ$ )



(b) Turbulent intensity u by X-probe( $-90^\circ$ )

Fig. 3 Turbulent intensity u profiles in the X-Y plane

$X/R=6.3$ 까지는 비교적 큰 40%이상의 난류강도 값이 넓은 영역에 걸쳐 형성되어 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4는 X-Y 평면내에서 측정한 Y방향 난류속도의 RMS값을 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림이다. Y방향 난류강도 분포도 역시 버너의 콘형 보염기 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿근처  $Y/R \approx \pm 1.0$ 의 내외 측에서  $X/R \leq 1.5$ 까지 약 50%이상의 값으로 크게 분포되어 나타나고 있으며, 중심부에서는 X방향의 거리 증가에 증가하다가 다시 감소해 가는 분포를 보여주며, 비교적 큰 난류강도로 약 40% 이상의 난류강도는  $X/R \approx 3.8$ 까지 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 X-Y 평면내에서 측정한 Z방향 난류속도의 RMS값을 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림이다.

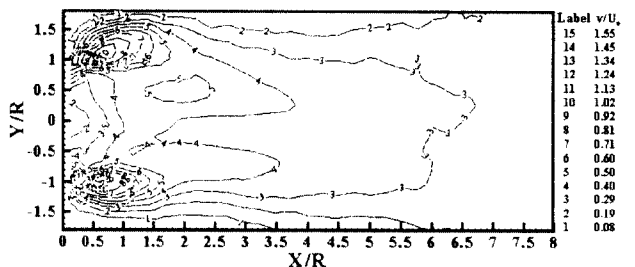


Fig. 4 Turbulent intensity v profiles in the X-Y plane

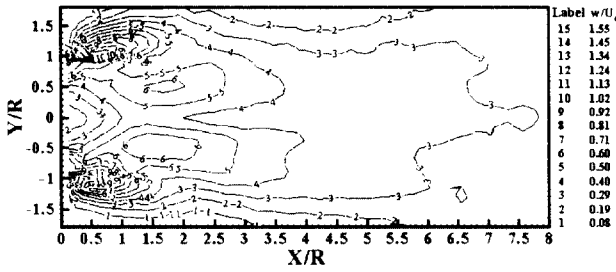


Fig. 5 Turbulent intensity  $w$  profiles in the X-Y plane

Z방향 난류강도 분포는  $Y=0$ 에 대하여 대칭분포를 보여주고 있으며, 버너의 외곽부에 위치한 방사상의 좁은 슬릿근처  $Y/R \approx \pm 1.0$ 의 내외 측에서  $X/R \leq 1.5$ 까지 약 60% 이상의 값으로 크게 분포되어 나타나고 있으며, 중심부에서는 X방향의 거리 증가에 증가하다가 다시 감소해 가는 분포를 보여주며, 비교적 큰 난류강도로 약 40% 이상의 난류강도는  $X/R \approx 4$ 까지 분포됨을 알 수 있다.

4.2 난류운동에너지 분포

Fig. 6은 X-Y평면내에서 측정된 X, Y, Z방향 난류속도의 RMS값들을 각각 제공한 후 식 (4)로 정의하여 이 값을 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0^2$ 으로 무차원화하여 나타낸 난류운동에너지의 그림이다.

$$KE = \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \quad (4)$$

여기서  $u^2, v^2, w^2$ 은 각각 X, Y, Z방향의 난류속도를 평균 제공한 값으로 레이놀즈(Reynolds) 수직응력(normal stress)을 나타내며, 특히  $u^2$ 은 X-probe를  $0^\circ, -90^\circ$ 로 해서 각각 얻어진 값들을 산술 평균하여 나타낸 값이다. 난류운동에너지 역시  $Y=0$ 에 대하여 대칭인 분포를 보여주며, 난류강도 분포와 마찬가지로 버너의 콘형 보염기 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿근처  $Y/R \approx \pm 1.0$ 의 내

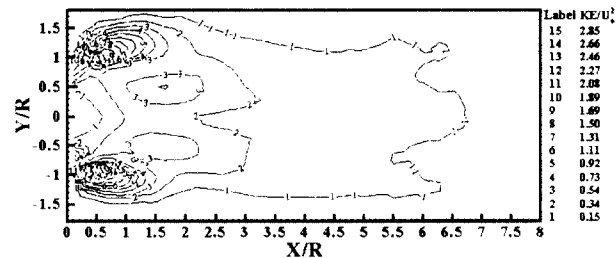


Fig. 6 Turbulent kinetic energy profiles in the X-Y plane

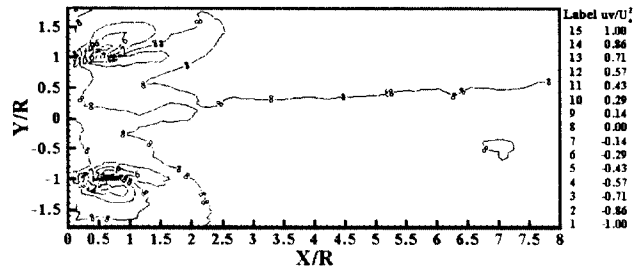


Fig. 7 Reynolds shear stress  $uv$  profiles in the X-Y plane

외 측에서  $X/R=1.5$ 부근까지 약 73%이상의 값으로 크게 분포되어 나타나고 있다. 또 중심부에서는 X방향의 거리 증가에 증가하다가 다시 감소해 가는 분포를 보여주며, 약 34% 이상의 난류운동에너지가 비교적 초기 영역에 해당하는  $X/R \approx 3$ 까지에서 분포되어 주로 분포됨을 알 수 있다.

4.3 레이놀즈 전단응력 분포

Fig. 7은 X-Y 평면내에서 측정된 X, Y방향의 난류속도성분에 의한 레이놀즈 전단응력  $uv$ 를 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0^2$ 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 레이놀즈 전단응력  $uv$ 는 버너 선단의 콘형 보염기 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿근처에서 큰 값의 분포를 보여주는데,  $Y/R \approx 1.0$ 의 내측인 좌측에서는 (+)값의 Peak가 존재하며, 외측인 우측에서는 (-)값의 Peak가 존재한다. 반면에  $Y/R \approx -1.0$ 의 내측인 우측에서는 (-)값의 Peak가 그리고 외측인 좌측에서는 (+)의 Peak가 각각 분포되어 있는데, 이것은 각 방향에 대한 평균속도의 Y방향 기울기에 기인되기 때문이다. 따라서 버너 중심부에서는 좌측에서 (-)값의 크기 분포를 보여주나, 우측에서는 (+)값의 크기분포를 보여주며, 약  $X/R=2.5$ 근처까지 그 영향이 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나  $X/R \geq 2.5$  이후 영역에서는  $uv$ 값이 0인 라벨 8을 기준으로 Y축 우측에서는 (-)값의 분포를 보여주는 반면에 좌측에서는

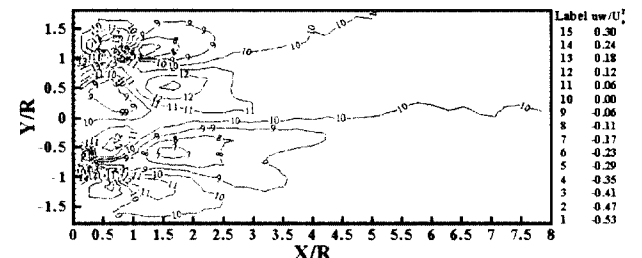


Fig. 8 Reynolds shear stress  $uw$  profiles in the X-Y plane

(+)값의 분포로 나타나고 있다.

Fig. 8은 X-Y 평면내에서 측정된 X, Z방향의 난류속도성분에 의한 레이놀즈 전단응력  $uw$ 를 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 레이놀즈 전단응력  $uw$ 는 버너 선단의 콘형 보염기 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿근처에서  $uv$ 값보다는 작지만 비교적 큰 값의 분포를 보여주는데,  $X/R \leq 1.0$ 의 영역에서는  $Y/R \approx 1.0$ 의 내측인 좌측에서는 (-)값의 Peak가 존재하며, 외측인 우측에서는 (+)값의 Peak가 존재하고  $Y/R \approx -1.0$ 의 내측인 우측에서는 (+)값의 Peak가 그리고 외측인 좌측에서는 (-)의 Peak가 각각 분포되어 있다. 그러나  $X/R \geq 1.0$ 에서는 앞의 경우와 정반대로 부호가 바뀌면서 Peak가 형성되어 있음을 알 수 있다. 또  $X/R \geq 2.5$  영역에서는  $uw$ 값이 0인 라벨 10을 기준으로 Y축 우측에서는 (+)값의 분포를 보여주는 반면에 좌측에서는 (-)값의 분포로 각각 나타나고 있다.

### 5. 결론

형상스윙수 0.34를 갖는 콘형 가스 스윙버너의 3차원 난류유동장에서 얻어진 난류강도, 난류운동에너지, 레이놀즈 전단응력들을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 버너 외측에 위치한 방사상의 좁은 슬릿 부근에서 난류강도 및 난류운동에너지가 가장 크게 분포되어 나타나, 이 영역을 중심으로 연소가 활발히 일어날 것으로 예상된다.
- 2) 난류강도 약 40%값을 기준으로 보면, X방향 성분은  $X/R \approx 6.3$ , Y방향 성분은  $X/R \approx 3.8$ , Z방향 성분은  $X/R \approx 4.0$ 까지 각각 분포되어 나타나 버너 중심부에서는 경사진 보염기의 스윙베인을 빠져 나오는 회전 및 경사진 유동속도에 의해 X방향 난류강도 성분이 Y, Z방향 난류성분보다 약간 큰 값을 형성한다.
- 3) 버너 선단의 슬릿부근에서 레이놀즈 전단응력  $uv$ 는  $uw$ 보다 약 3배 더 크게 분포되어 있으며, 비교적 초기영역인  $X/R \leq 2.5$ 부근에서 대부분 크기가 형성된다.

### 후 기

본 연구는 2000년도 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. 윤옥현, "가스 스윙 버너의 유동 및 연소특성에 관한 수치적 연구", 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 7~39, 1999
8. H. T. Jeong, "A Study on the Turbulent Diffusion Combustion Model for Analysis of a Combustion Burner", 포항공대 대학원 석사학위논문, pp. 22~34, 1996
9. J. M. Beer and N. A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Applied Science, pp. 100~146, 1972
10. H. H. Bruun, "Hot-Wire Anemometry", Oxford Science Publications, pp. 132~163, 1996
11. Dantec, "Streamline User's Reference Manual", Chapter 8.3 Algorithms