

## 가스난방기용 스월버너의 3차원 난류유동 특성에 관한 실험적 연구

김 장 권\*  
(2000년 7월 25일 접수)

### An Experimental Study on the Three Dimensional Turbulent Flow Characteristics of Swirl Burner for Gas Furnace

Jang-kweon Kim

**Key Words:** Gas Swirl Burner(가스 스월버너), Hot-Wire Anemometer(열선풍속계), Subsonic Wind Tunnel(아음속풍동), Swirl Number(스월수), Turbulent Flow Characteristics(난류유동특성)

#### Abstract

This paper represents the vector fields, three dimensional mean velocities, the turbulent intensities, the turbulent kinetic energy, and the Reynolds shear stresses in the X-Y 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 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 subsonic wind tunnel. The vector plot shows that the maximum axial mean velocity component exists in the narrow slits situated radially on the edge of gas swirl burner, for that reason, there is some entrainment phenomena of ambient air in the outer region of burner. Moreover, mean velocities in the initial region are largely distributed near the outer region of burner at  $Y/R \approx 0.97$ , but they diffuse and develop into the center flow region of burner according to the increase of axial distance. The turbulent intensities and the turbulent kinetic energy due to large inclination of mean velocity and swirl effect show that the maximum value in the initial region of burner is formed in the narrow slits situated radially on the edge of gas swirl burner and large values are mainly formed in the entire region of burner after  $X/R=2.4358$ , hence, the combustion reaction is anticipated to occur actively near this region. And the Reynolds shear stresses are also largely distributed from slits to vanes of gas swirl burner in the initial region, but their values largely disappear after  $X/R=3.2052$ .

#### 기호설명

$D_i$  : 콘형 배플 판의 내주직경 [m]  
 $D_o$  : 콘형 배플 판의 외주직경 [m]  
 $k_1, k_2$  : 방향성 교정에 따른 평균 Yaw계수 [-]  
 $KE$  : 난류운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]  
 $Q$  : 유량 [ $m^3/min$ ]  
 $R$  : 버너의 외주반경 [m]

$S$  : 형상 스월수 [-]  
 $U, V, W$  : 직교좌표계를 만족하는 X, Y, Z방향의 평균속도 성분 [m/s]  
 $u, v, w$  : 직교좌표계를 만족하는 X, Y, Z방향에서 난류속도의 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]  
 $U_{1cal}, U_{2cal}$  : 열선좌표계에서 열선 1, 2의 유동

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

- 속도  $U_1, U_2$ 에 대한 고정속도  
[m/s]  
 $uv, uw$  : X와 Y방향 및 X와 Z방향의  
Reynolds 전단응력 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]  
 $X, Y, Z$  : 직교좌표계의 방향 및 거리  
 $\alpha$  : 스윙베인 각도 [°]  
 $\alpha_1, \alpha_2$  : 열선 1과 2가 Probe좌표계와 이루  
는 각도 [°]

## 1. 서 론

최근 들어 생활수준의 급속한 향상과 경제규모의 증가에 따라 자동차, 항공기, 선박, 공장, 주택 등의 보급이 계속 증가되고 있어, 에너지 소비는 과거에 비해 크게 증가하고 있다. 특히 에너지 과다 소비는 대기오염과 이산화탄소에 의한 지구 온난화 현상 등 지구환경 문제에 직접적인 문제를 일으키고 있다. 따라서 에너지 수급 문제와 환경문제를 해결하기 위해서는 각종 기관 및 연소 기기의 효율향상에 의한 에너지 절약기술 개발 및 공해방지 기술이 절실히 요구된다.

이에 따라 각국은 고효율·저공해의 연소기 개발에 박차를 가하고 있다. 국내에서도 역시 예전에는 화석 연료를 사용하는 난방기기가 주가 되었으나, 최근에는 LNG, LPG 등 청정연료를 사용하는 난방기기의 전환이 활발히 이루어지고 있다.

가스버너(gas burner)를 사용하는 연소기의 연소 상태는 연료가스의 성분, 분사 가스의 확산, 연료 가스와 공기와의 혼합 등 여러 가지 변수에 의해 좌우되고 있으나, 그중 연료가스와 공기와의 혼합 정도가 연소상태의 가장 중요한 변수가 된다. 또 버너설계에 대한 최적화 설계변수로는 보염기(flame holder) 형상과 스윙베인(swirl vane)의 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>(7~9)</sup>로 구분되어 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 국외에서는 액체연료로 석유(kerosene)를 사용하는 건형 오일버너(gun type oil burner)의 분무 및 유동장에 대한 연구가 활발하여 이 자료를 바탕으로 가스버너에 대한 연구를 하고 있지만, 국내에서는 건형 오일버너는 물론 가스버너에 대한 연구 자료가 매우 부족한 실정이다.

Aoki 등<sup>(1,2)</sup>은 원통형 연소기내의 유동현상을 해석하기 위해 레이저유속계와 열선풍속계 그리고 5공 피토판을 이용하여 스윙수를 0.35에서 1.35까지 변화시켜 가면서 시간평균 유속과 난류 강도 등을 측정하여 역류영역, 와 중심영역, 보조 순환영역의 위치와 크기, 형상 등 연소기 내부의 유동양식을 규명하였다.

Hirai 등<sup>(3)</sup>은 산업용 보일러나 공업용 爐(furnace) 등에서 분무 연소할 때 배출되는 NO<sub>x</sub> 농도를 저감하기 위해서 강선회 공기유동과 넓은 분무각을 갖는 이류체 분무기(twin-fluid atomizer)를 조합한 선회공기류에 의한 연소방식을 사용한 바 있다. 이것은 보염능력이 우수하고 공기와 연료의 혼합을 용이하게 하여 고부하 연소효과를 얻기 쉽게 한다. 특히 이것은 강선회 공기류의 회전중심 부근에서 생기는 강제와류를 이용한 보염효과에 의해 화염을 반경방향으로 확대하여 고부하연소를 실현하는 것이다.

Ikeda 등<sup>(4)</sup>과 Kurihara 등<sup>(5)</sup>은 분무연소로에서 상용 건형 오일버너의 분무연소 특성을 파악코자 속도분포들을 연소시와 비연소시로 나누어 레이저유속계를 이용하여 측정하였는데, 배플판(baffle plate) 후류측에서 연소시 및 비연소시 연소용공기의 유동특성이 負壓으로 나타나 순환류가 존재하고, 반경방향 속도는 외측에 강한 負의 Peak치가 나타남을 확인하였다.

Kihm 등<sup>(6)</sup>은 레이저유속계를 이용하여 가스터어번에 사용될 선회기(swirler)의 베인각도와 허브(hub) 직경을 변화시켜 가면서 난류 스윙유동장의 유동특성을 파악하였는데, 접선방향 속도분포의 Peak치는 베인각도가 40°인 선회기의 출구에서 발견되었으며, 또 재순환 영역의 크기와 강도도 역시 40°에서 가장 높다는 것을 밝힌 바 있다.

김인규 등<sup>(7,8)</sup>과 윤옥현<sup>(9)</sup>은 건형 오일 및 가스 버너에서 경사형과 수직형의 보염기 형상에 따른 유동장 및 연소장 특성을 비교하기 위해 실험적 방법과 수치해석 방법을 도입하여 경사형 보염기가 수직형보다 하류의 버너 중심부에서 보다 안정된 화염장 구조를 형성하여 스윙베인 후류영역과 외곽부 슬릿부에서 고온부가 이루어짐을 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍 난방기에 적용되고 있는 콘(cone)형 배플판을 갖는 가스 스윙버너로부터 연소실이 없는

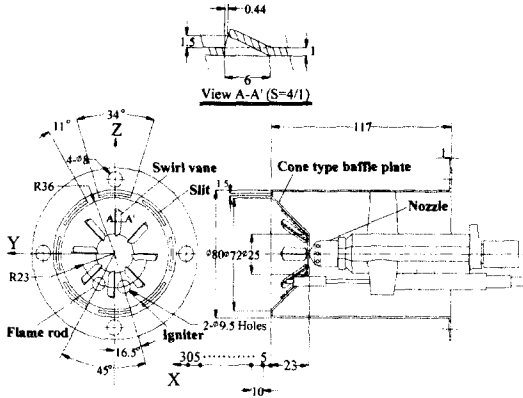


Fig. 1 Configuration of gas swirl burner

자유공간내에 연소용 공기량 350, 450 l /min으로 각각 분사되어 형성되는 3차원 난류 유동장을 열선풍속계를 활용하여 평균속도, 난류강도, 난류운동에너지 및 레이놀즈 전단응력 등을 측정하였다. 특히 본 연구에서는 공기량 450 l /min에서 얻어진 난류유동장에 대한 특성치들을 다루고자 한다. 이를 통해 콘형 가스 스윙버너의 특징 및 문제점을 파악하고 기존 모델의 최적화된 설계 데이터를 확보한 다음, 향후 신모델 개발 등에 응용할 수 있는 설계 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 가스 스윙 버너의 구조

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

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

본 가스 스윙버너는 일반적인 형상스윙수<sup>(10)</sup>로 정의되는 식 (1)로 나타내면, 스윙수가 약 S=0.34를 갖는 선회 버너임을 확인할 수 있다. 여기서 내주직경  $D_i = 25$  mm, 외주직경  $D_o = 57.8$  mm, 스윙베인 각도  $\alpha = 24^\circ$  이다.

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

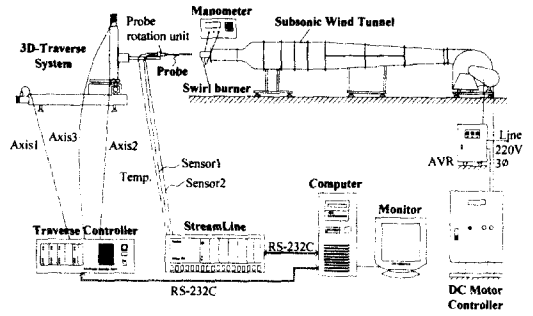


Fig. 2 Experimental apparatus diagram including hot-wire anemometer system

따라서 본 가스 스윙버너는 콘형 배플판의 경사면에 위치한 스윙베인과 배플판 외곽에 방사상으로 배치된 좁은 슬릿에 의해 순환류(circulation flow)와 스윙을 동시에 유도하지만 형상스윙수가 비교적 작게 얻어져 스윙베인보다는 좁은 방사상 슬릿으로부터 분출되는 평균속도의 기울기가 크게 발생하여 얻어진 강한 난류강도 발생을 통해 가스연료와 산소가 효과적으로 상호 혼합(mixing)이 이루어지도록 하는 형상을 채용하고 있다고 볼 수 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 설치한 콘형 스윙버너로부터 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% 미만이 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(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/cm<sup>2</sup>까지 발휘되는 공기압축기가

연결되어 있다.

### 3.2 실험방법

#### 3.2.1 X-probe에 의한 속도 연산방법<sup>(11,12)</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 식 (2)와 같은 관계식을 만족하게 된다.

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

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

여기서  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 열선 1과 2가 Probe 좌표시스템과 이루는 각도로서 모두  $45^\circ$ 로 구성되어 있다. 또 Wire 좌표시스템의 속도  $U_1$ 과  $U_2$ 에 대응되는 Probe 좌표시스템의 속도  $U$ 와  $V$ 사이에는 식 (3)이 만족된다.<sup>(12)</sup>

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

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 속도교정에는 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-probe 교정은 10 m/s의 속도에서  $-40^\circ$ 에서  $40^\circ$ 까지  $10^\circ$  간격으로 실시하였는데, 그 결과 평균 Yaw 계수는 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  $90^\circ$  회전시켜 얻을 수 있었다. 이 모든 과정은 내장된 "Streamware"라는 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 Pa을 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 아음속풍동의 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 난류유동장으로부터 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 위해 본 연구에서는 Probe를 교정기에 설치하였을 때와 동일한 방향성을 유지한 채 3차원 자동이송장치에 Probe를 위치시킨 후, 버너의 기하학적 측정기준인 원점을 참고로 하여 버너 선단의 좌우, 상하로 Probe를 약 1 mm씩 미세하게 자동 이송하여 열선풍속계와 PC로부터 얻어지는 속도데이터들을 구하여 다시 정확한 원점을 잡은 다음 실시하였다.

본 연구에서 채택한 콘형 가스 스웰버너는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘형 배플판에 있는 Flame Rod와 Igniter를 제거하고 그 구멍을 접착 테이프(tape)로 막아 사용하였다. 이때 측정위치는 버너 형상이 축대칭을 이루고 있기 때문에 각각의 풍량 조건에서 Probe를 X-Y평면 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 부근에서의 상세한 유속 측정을 위해서 이 구간에서는 1 mm씩 Probe를 이송하여 상세하게 측정하였다. 이때 유동장내의 실내 온도는 온도변화에 따른 속도오차

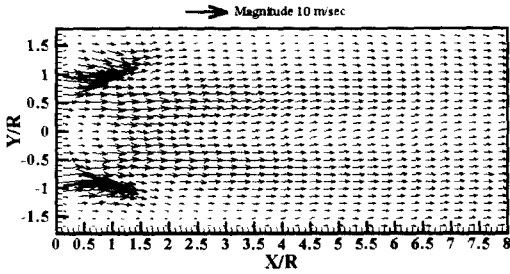


Fig. 3 Vector plot by mean velocities U and V measured in the X-Y plane

를 최대한 억제하기 위해 약  $19 \pm 0.5$  °C로 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 AVR을 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 유동속도 벡터 분포

Fig. 3은 X-Y평면내에서 측정된 X방향 평균속도 U와 Y방향 평균속도 V로 그려진 벡터 유동장을 나타낸 그림이다.

Fig. 3은 전체 유동장에 걸쳐  $Y=0$ 에 대하여 대칭성 분포를 보여주며, 약  $Y/R = \pm 0.97$  위치에 있는 방사상의 좁은 슬릿으로부터 분사된 제트속도가 가장 크게 형성되어 있음을 보여준다. 또  $Y/R = \pm 0.97$  외측에서는 강한 제트속도에 의해 버너 외곽 주변으로부터 공기가 유입되어 주변류에 합류되는 Entrainment 현상도 볼 수 있다. 따라서 방사상으로 배치된 좁은 슬릿으로부터 분사된 빠른 제트 속도와 콘형 배플판에 설치된 스월베인을 빠져 나오는 속도 및 Entrainment 등에 의해 약  $X/R=2$  이전까지는 Y방향의 각 영역에서 분출된 공기가 축방향으로 유동하면서 축방향의 빠른 유속과 강하게 혼합되어 버너선단 출구에서 2개의 정점을 갖다가 점차 발달해 가면서 4개의 정점을 갖는 초기영역으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나  $X/R=2.2$  이후부터는 2개의 정점을 갖는 유동구조를 가지면서 발달해 가다가 약  $X/R=7.8$  이후에서는 완전히 유동이 발달하여 반경방향의 속도 기울기가 사라지고 일정한 속도분포를 갖게 됨을 알 수 있다. 한편 버너 선단부의  $Y/R = \pm 0.97$  근처의 초기영역에서는 반경방향에 대한 속도기울기가 크게 형성되어 있어, 이 영역

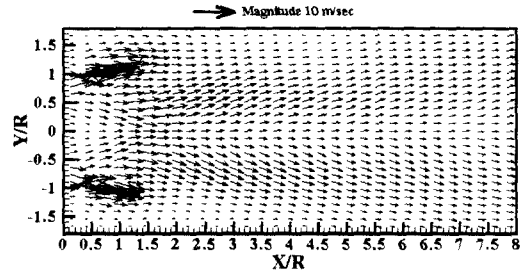
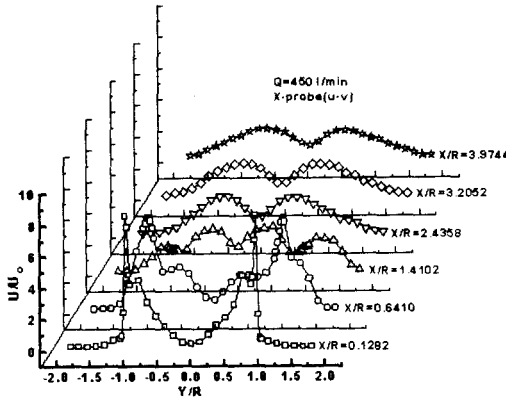


Fig. 4 Vector plot by mean velocities U and W measured in the X-Y plane

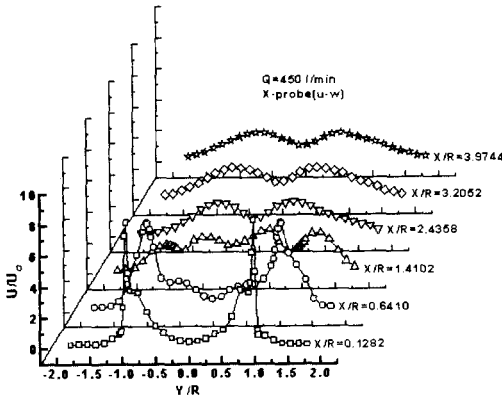
에서 강한 난류영역이 형성됨을 예측할 수 있다. 이는 스월베인을 통과하면서 축방향 속도성분이 원주방향의 속도성분으로 전환되어 회전하면서 나아가는 유동과 슬릿을 통과하면서 축방향으로 가속되어 진행되는 유동과의 혼합에 의해 발생된다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 X-Y평면내에서 측정된 X방향 평균속도 U와 Z방향 평균속도 W로 그려진 벡터 유동장을 나타낸 그림이다.

Fig. 4는 전체 유동장에서  $Y=0$ 에 대하여 완벽한 대칭성 분포를 보여주는데, 이것은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 버너 보임기 경사면 좌우에 위치한 두 개의 베인이 X-Y평면상에 일치하기 때문이다. 즉 좌측의 베인을 빠져 나오는 유동은 음의 Z방향으로 향하는 반면에 우측의 베인을 빠져 나오는 유동은 양의 Z방향으로 각각 향하게 되어 전체적으로는 버너 전면에서 볼 때 반시계 방향의 회전유동을 형성하기 때문이다. Fig. 4에서도 약  $Y/R = \pm 0.97$ 의 위치에 있는 방사상의 좁은 슬릿으로부터 분사된 유동속도가 가장 크게 형성되어 버너 선단 외곽 근처 영역에서 Entrainment 현상을 주도하여 축방향으로 점차 확산 발달하고, 버너 내측에서는 경사면의 베인을 빠져 나오는 유동 속도에 의하여  $Y=0$ 의 축방향으로 약  $X/R=1.5$ 까지 수축되는 모습을 보여준다. 이것은 콘형 배플판의 경사각이  $X/R=1.5$ 까지는 유동에 크게 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 그 이후부터는 버너 좌우로 확산 및 발달해 가는 모습을 보여준다. 여기서도 버너 선단 근처에서  $X/R=1.5$ 까지의 영역에서는 축방향 평균속도의 기울기가 크게 분포되고, 경사진 베인을 통해 빠져 나오는 회전유동에 의해 강한 난류영역이 형성됨을 예측할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Distributions of mean velocity U measured in the X-Y plane

4.2 평균속도 분포

Fig. 5는 X-Y평면내에서 X방향의 거리 증가에 따라 측정된 X방향 평균속도 U를 버너입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 여기서 Fig. 5(a)는 평균속도 U와 V를 측정하기 위해서 X-probe를  $0^\circ$  각도를 유지한 채 측정된 X방향 평균속도이고, Fig. 5(b)는 평균속도 U와 W를 측정하기 위해서 X-probe를 반시계방향으로  $90^\circ$  돌려서 측정된 X방향 평균속도이다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 평균속도 분포 모두 비교적 유사한 크기로  $Y=0$ 에 대하여 대칭 분포를 나타내고 있다. Fig. 5로부터 버너의 콘형 배플판 외측에 방사상으로 설치된 좁은 슬릿으로부터 분사된 유동속도에 의해 X방향 평균속도 U는 약  $Y/R \pm 0.97$ 을 중심으로 가장 큰 평균속도가 형성되고 있다. 특히 슬릿부에서 형성된 제 1의 Peak

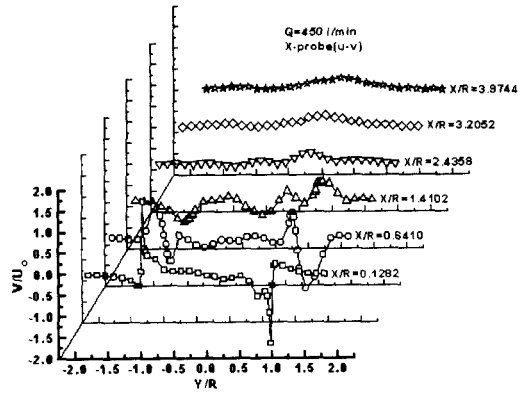


Fig. 6 Distributions of mean velocity V measured in the X-Y plane

치와 배플판의 스윙베인 외측에서 형성된 제 2의 Peak치는 각각 X방향 거리 증가에 따라 감소하지만, 제 2의 Peak치는 버너 중앙부 쪽으로 확산 발달되어  $Y=0$ 부근의 속도를 증가시키며  $X/R=1.4102$ 이전까지의 영역에서는 4개의 Peak치가 나타난다. 그러나  $X/R=2.4358$ 부터는 약  $Y/R \pm 0.6$ 에서 2개의 Peak치가 형성되어 분류의 혼합과정을 나타내는 전형적인 속도분포를 보여준다.

Fig. 6은 X-Y평면내에서 X방향의 거리 증가에 따라 측정된 Y방향 평균속도 V를 버너입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 그림이다.  $X/R=0.1282$ 인 버너 선단부에서 평균속도 V는 버너 외곽부근에 위치한 방사상의 좁은 슬릿부근인  $Y/R \pm 0.97$ 을 중심으로 서로 절대 크기는 비슷하지만 유동방향이 다른 Peak치를 나타내고 있다. X방향의 거리 증가에 따라 평균속도 V는  $X/R=1.4102$ 이전의 경우 절대크기가 감소하면서 유동이 버너 중심부 쪽으로 확산 발달되어  $X/R=2.4358$  이후부터는 0에 가까운 비교적 작은 값으로 나타나 소멸되어 가는 과정을 볼 수 있다. 특히, 버너 좌측부에서는 보염기의 좌측에 위치한 베인을 빠져 나오는 유동의 경사각도에 의해 유동이 중심축상으로 향하므로 양의 값으로 분포되며, 반면에 버너 우측부에는 보염기의 우측에 위치한 베인을 빠져 나오는 유동의 경사각도에 의해 유동이 좌측으로 쏠려 중심축상으로 향하므로 음의 값으로 나타나 있다.

Fig. 7은 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 Z방향 평균속도 W를 버너입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 그림이

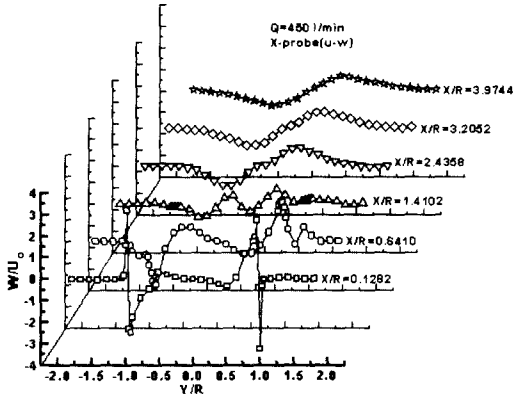


Fig. 7 Distributions of mean velocity  $W$  measured in the  $X$ - $Y$  plane

다.

Fig. 7에서  $Z$ 방향 평균속도  $W$ 는 버너 외곽부근에 위치한 방사상의 좁은 슬릿부근  $Y/R \pm 0.97$ 에서  $X/R=0.1282$ 의 경우 버너 좌우측에 모두 양의 값을 갖는 두 개의 Peak치가 공존하다가  $X$ 방향 거리 증가에 따라 그 크기가 감소하면서 버너 중앙부 쪽으로 확산 발달해 가는 모습을 보여준다. 그리고  $X/R=2.4358$  이후부터 평균속도  $W$ 는 버너 좌측부에서 배플판의 좌측에 위치한 베인을 빠져 나오는 유동의  $Z$ 방향 성분이 버너 아래방향으로 향하기 때문에  $Z$ 방향 평균속도의 Peak치가 음의 값으로 나타나는 반면에, 버너 우측부에서는 배플판의 우측에 위치한 베인을 빠져 나오는 유동의  $Z$ 방향 성분이 버너 윗방향으로 향하기 때문에  $Z$ 방향 평균속도의 Peak치가 양의 값으로 나타나고 있다.

### 4.3 난류강도 분포

Fig. 8은  $X$ - $Y$ 평면내에서  $X$ 방향 거리 증가에 따라 측정된  $X$ 방향 난류속도의 RMS(root-mean-square) 값을 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림이다. 여기서 Fig. 8(a)는  $X$ -probe를  $0^\circ$  각도를 유지한 채 난류속도를 측정하여 나타낸  $X$ 방향 난류강도이고, Fig. 8(b)는  $X$ -probe를 반시계방향으로  $90^\circ$  돌려서 난류속도를 측정하여 나타낸  $X$ 방향 난류강도이다.

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)의 난류강도 분포 모두 비교적 유사한 크기로 나타나 있지만, 완벽하게 서로 일치하지 않고 있다. 이것은 동일지점에서 측

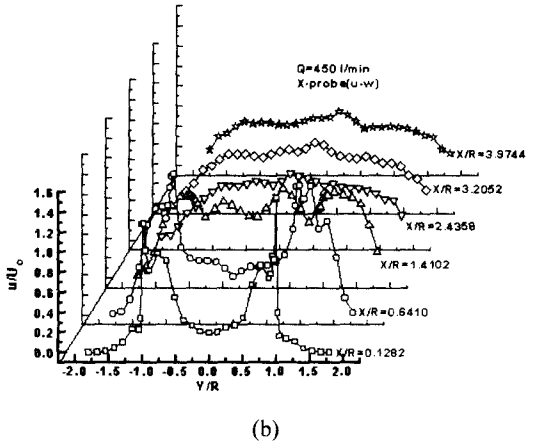
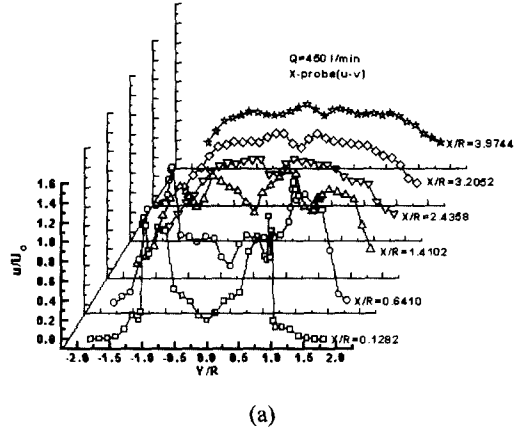


Fig. 8 Distributions of turbulent intensity  $u$  measured in the  $X$ - $Y$  plane

정된 난류강도는 어떤 방법으로 측정하더라도 동일해야 하는데, 본 연구에서는  $X$ -probe를  $0^\circ$  와  $-90^\circ$  로 회전시켜 각각 난류강도  $u$ 와  $v$  그리고 난류강도  $u$ 와  $w$ 성분을 측정할 때 측정점이 완벽하게 일치하지 않았기 때문으로 생각된다. Fig. 8의  $X$ 방향 난류강도분포는 버너 선단 초기 영역에서  $Y=0$ 에 대하여 비교적 대칭분포를 보여주고 있다. 또 버너의 초기영역인  $X/R=0.1282$ 에서의  $X$ 방향 난류강도는 콘형 배플판 외측에 방사상으로 배치된 좁은 슬릿근처  $Y/R \approx \pm 0.97$ 의 내외측에서 가장 큰 130% 이상의 Peak치가 형성되고, 다음으로는 배플판의 스윙베인 외주측에서 약 100% 크기의 Peak치가 형성되고 있다. 이 Peak치들은  $X$ 방향의 거리 증가에 따라 크기는 감소하지만 버너 중앙부 쪽으로 확산 발달하여  $X/R=3.9744$ 에서 약 50% 이상의 값으로 크게 분

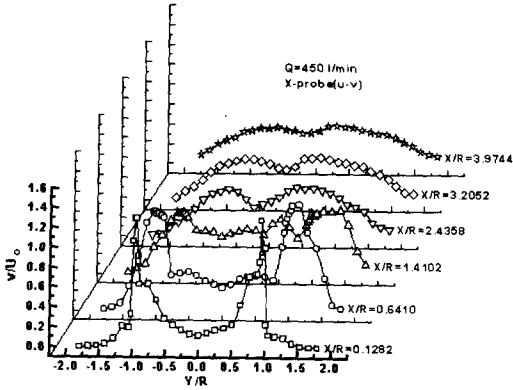


Fig. 9 Distributions of turbulent intensity  $v$  measured in the X-Y plane

포되어 넓은 영역에 걸쳐 나타나고 있다. 이것은 버너로부터 분사된 유동의 평균속도가 슬릿부에서 가장 크게 분포되어 Y방향에 대한 평균속도 기울기가 이곳에서 가장 크게 형성되고 아울러 스윙베인에 의한 회전유동 등도 작용하고 있기 때문에 특히 버너 외곽 부근과 스윙베인이 형성된 영역에서 난류강도가 가장 크게 분포되어 있다. 따라서 연소시 이 영역에서 연료가스와 산소가 활발하게 반응하여 화염온도가 가장 높게 형성될 것으로 예상된다.<sup>(8,9)</sup> 또한 스윙베인 내주측에 해당하는 버너중심부는 막혀있기 때문에 X방향 난류강도는 X방향 거리의 증가에 따라  $X/R=2.4358$ 까지는 증가하다가 그 이후부터 감소해 가는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 9는 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 Y방향 난류속도의 RMS값을 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림이다. 버너 선단에서 가장 가까운  $X/R=0.1282$ 에서 Y방향 난류강도 분포도 역시 X방향 난류강도 분포와 동일하게 버너의 콘형 배플판 외측에 방사상으로 배치된 좁은 슬릿 근처  $Y/R \approx \pm 0.97$ 과 배플판의 스윙베인 외주측에서 각각 약 130%, 70%의 크기를 갖는 제 1, 제 2의 Peak치를 보여주며, X방향의 거리 증가에 따라 이 Peak치들은 버너 중앙부 쪽으로 확산되면서  $X/R=2.4358$ 부터는 약 40% 값으로 두 개의 Peak치를 갖는 모습으로 넓은 영역에 걸쳐 분포되어 있다.

Fig. 10은 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 Z방향 난류속도의 RMS값을 버너

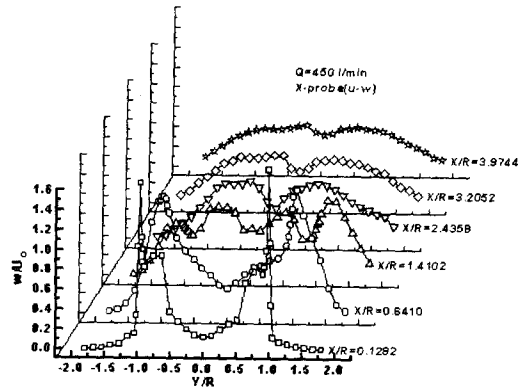


Fig. 10 Distributions of turbulent intensity  $w$  measured in the X-Y plane

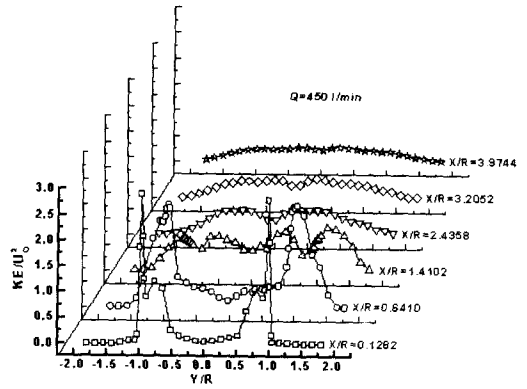


Fig. 11 Distributions of turbulent kinetic energy in the X-Y plane

입구로 유입되는 평균유속  $U_0$ 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림이다. Z방향 난류강도 분포 역시 X, Y방향 난류강도 분포와 비슷한 모습을 보여주며,  $X/R=0.1282$ 인 버너 선단부 영역에서는 버너의 외곽부에 위치한 방사상의 좁은 슬릿부  $Y/R \approx \pm 0.97$ 과 배플판의 스윙베인 외주부에서 각각 약 160%, 90%의 크기를 갖는 두 개의 Peak치들이 존재하고 X방향의 거리 증가에 따라 이 Peak치들은 크기가 작아지면서 버너 중앙부로 확산 발달하여  $X/R=2.4358$  이후부터는 버너 중앙부 영역에서 두개의 Peak치들이 존재하면서  $X/R=3.9744$ 에서는 약 40%정도의 값으로 넓게 분포되어 나타나고 있다.

#### 4.4 난류운동에너지 분포

Fig. 11은 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에



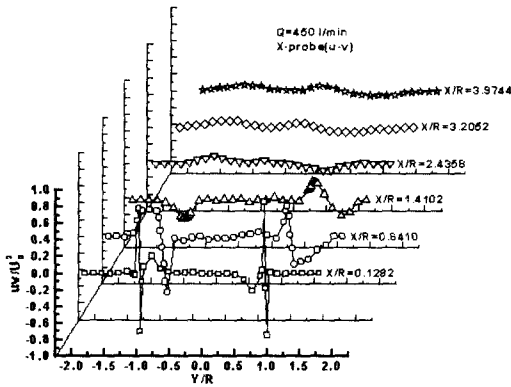


Fig. 12 Distributions of Reynolds shear stress  $uv$  measured in the X-Y plane

따라 측정된 X, Y, Z방향 난류속도의 RMS값들을 각각 제곱한 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 제곱한 값으로 레이놀즈(Reynolds) 수 직응력(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 버너 선단으로부터 초기영역인  $X/R=0.1282$ 에서는 콘형 배플판 외측에 방사상으로 배치된 좁은 슬릿근처인  $Y/R \approx \pm 0.97$  부근과 배플판의 스윙베인 외주부근에서 각각 약 2.75, 1.25의 값을 갖는 Peak치들이 형성되어 있다. 그리고 X방향의 거리 증가에 따라 이 Peak치들은 버너 중앙부 쪽으로 확산 발달하면서 그 크기들은 감소하지만 버너 중앙부 측의 난류운동에너지를 증가시켜  $X/R=2.4358$ 부터는 버너 좌우측에 각각 약 0.5의 Peak치를 갖는 모습으로 나타나고,  $X/R=3.9744$ 에서는 Peak치들이 모두 사라지고 약 0.25의 크기로 버너 중앙부에 넓게 분포되어 있다.

#### 4.5 레이놀즈 전단응력 분포

Fig. 12는 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 X, Y방향의 난류속도성분에 의한 레이놀즈 전단응력  $uv$ 를 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0^2$ 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다.

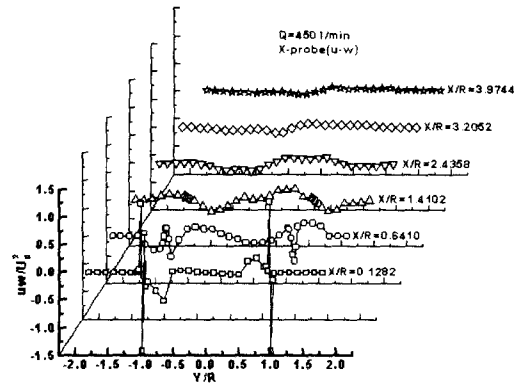


Fig. 13 Distributions of Reynolds shear stress  $uw$  measured in the X-Y plane

버너 선단의 초기영역인  $X/R=0.1282$ 에서 레이놀즈 전단응력  $uv$ 는 콘형 배플판 외측에 방사상으로 배치된 좁은 슬릿근처  $Y/R \approx \pm 0.97$ 에서 각 방향에 대한 평균속도의 Y방향 기울기에 기인되어 양, 음의 큰 Peak치를 갖고, 배플판의 스윙베인 외주부근에서 다음 크기의 Peak치를 갖는 구조를 보여주고 있다. X방향의 거리 증가에 따라 난류 전단응력  $uv$ 는 버너 중심부 쪽으로 확산 발달하면서 Peak치들은 작아지는 반면, 버너 중심부의 크기를 증대시키며,  $X/R=2.4358$  이후부터는 전체적으로 크기차이 구분이 어려운 유동이 비교적 완전히 발달되어 소멸되는 완전한 분포 모습을 보여준다.

Fig. 13은 X-Y평면내에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 X, Z방향의 난류속도성분에 의한 레이놀즈 전단응력  $uw$ 를 버너 입구로 유입되는 평균유속  $U_0^2$ 으로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 버너 선단의 초기영역인  $X/R=0.1282$ 에서 레이놀즈 전단응력  $uw$ 는 버너 선단의 콘형 배플판 외측에 방사상으로 배치된 좁은 슬릿근처인  $Y/R \approx \pm 0.97$ 에서 가장 큰 양, 음의 Peak치들이 분포됨을 보여주고, 배플판의 스윙베인 외주영역에서 제 2의 크기를 갖는 양, 음의 Peak치들을 보여준다. 특히 X방향의 거리 증가에 따라 난류전단응력  $uw$ 도 역시 버너 중심부 쪽으로 확산 발달하면서 버너 선단에서 크게 형성된 Peak치들이 감소되면서 버너 중심부 쪽으로 옮겨가고 있다. 또  $X/R=3.2052$  이후부터 난류전단응력  $uw$ 는 유동이 비교적 완전히 발달되어 Peak치들이 거의 사라지며 소멸되어 가는 모습을 보여준다.

## 5. 결 론

형상스윙수 0.34를 갖는 가스 스윙 버너의 3차원 난류유동장에서 얻어진 유동속도의 벡터와 3차원 평균속도 및 난류 특성치들을 분석한 결과 다음과 같다.

(1) 버너 외측에 위치한 방사상의 좁은 슬릿 부근인  $Y/R=\pm 0.97$ 에서 각 방향 성분의 평균속도가 가장 크게 분포되고, 다음으로는 버너 중심부 쪽으로 확산 발달하면서 배플판의 스윙베인 외주영역에서 중심부쪽의 순으로 얻어지고 있다.

(2) 난류강도 및 난류운동에너지 역시 버너 외측에 위치한 방사상의 슬릿부근과 배플판의 스윙베인 내주영역에서 주로 크게 분포되어 나타나는데, 이것은 이 영역에서 형성된 큰 평균속도의 기울기와 배플판의 경사각도 및 스윙베인에 의한 회전유동에 기인하는 것으로 본다.

(3) 난류전단응력들도 역시 버너 외측에 위치한 방사상의 슬릿부근과 배플판의 스윙베인 외주영역에서 주로 크게 형성되어 나타나는데, 이 크기들은  $X/R=3.2052$  이후부터 크게 소멸된다.

## 후 기

본 논문은 2000년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) 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
- (2) 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
- (3) Hirai, T., Nagai, N., Koseki, H., Kato, K., and Takado, J., 1988, "高負荷旋回流燃焼器の噴霧燃焼特性に關する研究(第1報, 輕質油の燃焼特性)," 日本機械學會論文集(B編), 51卷 463号, pp. 1077~1082
- (4) Ikeda Y., Kawahara N. and Nakayima 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
- (5) 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
- (6) 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
- (7) 김인규, 1997, "Gun Type Burner의 보염기 형상에 따른 화염구조 특성에 관한 연구," 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 43~46
- (8) 김인규, 윤옥현, 하만영, 김양호, 1998, "Gun-Type 가스버너의 유동 및 연소특성 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 284~289
- (9) 윤옥현, 1999, "가스 스윙 버너의 유동 및 연소특성에 관한 수치적 연구," 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 7~39
- (10) Beer J. M. and Chigier N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, Applied Science, pp. 100~146
- (11) Bruun H. H., 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132~163
- (12) Dantec, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms