

콘형 배플판을 갖는 Gun식 가스버너의 난류유동장에 대한 슬릿과 스월베인의 역할

김 장 권* · 정 규 조*

(2002년 9월 26일 접수, 2003년 1월 11일 심사완료)

The Role of Slits and Swirl Vanes on the Turbulent Flow Fields in Gun-Type Gas Burner with a Cone-Type Baffle Plate

Jang-kweon Kim and Kyu-jo Jeong

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

Abstract

The gun-type gas burner adopted in this study is generally composed of eight slits and swirl vanes. Thus, 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 in the test section of subsonic wind tunnel. The axial mean velocity component in the case of burner model with only swirl vanes shows the characteristic that spreads more remarkably toward the radial direction than axial one, it does, however, directly opposite tendency in the case of burner model with only slits. Consequently, both slits and swirl vanes composing of gun-type gas burner play an important role in decrease of the speed near slits and increase of the flow speed in the central part of a burner because the biggest speed spurted from slits encircles rotational flow by swirl vanes and it drives main flow toward the axial direction. Moreover, the turbulent intensities and turbulent kinetic energy of gun-type gas burner are distributed with a fairly bigger size within $X/R < 0.6410$ than burner models which have only slits or swirl vanes because the rotational flow by swirl vanes and the fast jet flow by slits increase flow mixing, diffusion, and mean velocity gradient effectively.

1. 서 론

그동안 국내의 꾸준한 주택 보급 및 각종 산업 활동의 증가에 따라 그리고 다양한 에너지 수급 문제와 환경문제를 해결하기 위해 가스에너지 소비는 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 LNG, LPG 등 청정연료를 사용하는 다양한 형태의 가스연소기가 개발되고 있으나, 더욱 고효율 저공해 연소기로의 개발 노력이 활발히 요구되고 있다.

대부분의 가스연소기들은 스월(swirl)유동을 동반하는 버너들을 채택하는데, 이것은 재순환영역과 높은 난류를 형성함으로써 연료와 공기의 급속한 혼합을 촉진시키며, 화염을 안정화시키고, 화염의 길이를 짧게 하며, 높은 연소강도를 제공하기 때문에 지난 수십 년 동안 널리 고찰되어져 왔으며, 일반적으로 가스터빈, 보일러, 산업용 노(furnace) 등에서 광범위하게 사용되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

가스버너(gas burner)를 사용하는 연소기의 연소 상태는 연료가스의 성분, 분사 가스의 확산 및 유동장 특성, 연료가스와 공기와의 혼합 등 여러 가지 변수에 의해 좌우되고 있다. 그 중에서도 연료가스와 공기와의 혼합 및 확산 정도가 연소 상태의 가장 중요한 변수가 되기 때문에 스월유

* 책임저자, 회원, 군산대학교 기관공학 전공

E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-1848 FAX : (063)469-1841

* 회원, 군산대학교 기관공학 전공

동이 매우 효과적인 수단으로 부각되어져 왔다.⁽⁷⁾

가스버너에서 사용되고 있는 스윙유동의 연구 동향을 살펴보면, 정지유체 중에 분출하는 단순한 동축스윙제트(coaxial swirl jet)로부터 복잡한 실제 가스연소기내의 스윙유동에 이르기까지 매우 다양하게 수행되고 있다. 이 연구들을 통하여 스윙유동의 일반적인 특성이 규명되었고, 버너의 기하학적 형상이 변화된 상태에서 화염안정성을 촉진하고, 연소효율을 증가시키며, 연소오염물질을 제어하는데 있어 스윙이 갖는 중요성도 밝혀져 왔다.⁽⁸⁾

가스버너의 스윙유동 연구에 대한 접근은 크게 이론적 연구와 실험적 연구로 나뉘어 진행되어져 왔다. Beer 등⁽²⁾과 Lefebvre⁽³⁾는 동축분류버너의 주위공기유동에 강한 스윙을 주게 되면 축방향에 거꾸로 향하는 압력구배가 생겨 재순환영역과 고난류가 형성된다는 것을 밝혔으며, Syred 등⁽⁴⁾은 스윙연소기 노즐 출구 주위에서 Vortex분열에 의해 형성된 재순환영역은 주위 유체의 Entrain율을 증가시키고, 연료와 공기의 급속한 혼합을 촉진하며, 화염길이를 짧게 함으로서 화염이 안정화됨을 밝혔다. Leuckel 등⁽⁹⁾은 중앙에는 비스윙제트가 위치하고 환상부에는 스윙공기제트가 위치하는 비에혼합 싱글스윙버너를 사용하여 다양한 실험들을 수행하였으며, Chen 등⁽¹⁰⁾은 스윙유동에 있어서 증가된 혼합 특성들을 중심부에서 형성되는 Toroidal 재순환영역의 결과로 분석함으로써 비에혼합 화염내에서 일어나는 물리적인 과정들을 이해할 수 있는 정보를 제공하였다. Gupta 등⁽¹¹⁾은 2중의 동심스윙버너를 통해 두 개의 환상동로에서 스윙유동을 도입하여 제트의 축방향모멘텀과 각모멘텀을 제어함으로써 반경방향의 스윙분포의 변화를 시도하였으며, 그 결과 상당히 다른 화염안정성한계, 난류레벨, 체적열발생률 그리고 연소특성을 얻을 수 있었다. Aoki 등^(12,13)은 원통형 연소기내의 유동현상을 해석하기 위해 레이저유속계와 열선풍속계 그리고 5공 피토판을 이용하여 스윙수를 0.35에서 1.35까지 변화시켜 가면서 시간평균 유속과 난류강도 등을 측정하여 역류영역, 와 중심영역, 보조순환영역의 위치와 크기 및 형상 등 연소기 내부의 유동양식을 규명하였다. 또 Hirai 등⁽¹⁴⁾은 산업용 보일러나 공업용 노 등에서 분부 연소할 때 배출되는 NO_x 농도를 저감하기 위해서 강한 스윙 공기유동과 넓은 분부각을 갖는 이류체 분무기(twin-fluid atomizer)를 조합한 스윙공기류에 의한 연소방식을 사용한바 있으며, Kihm 등⁽¹⁵⁾은 레이저유속계를 이용하여

가스터빈에 사용될 스윙러의 베인각도와 허브(hub) 직경을 변화시켜 가면서 난류 스윙유동장의 유동특성을 파악한바 있다.

본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍 난방기에 적용할 수 있는 콘(cone)형 배플판(baffle plate)을 갖는 건(gun)식 가스 스윙버너를 연구대상으로 하였다. 이 가스버너에 대한 난류유동장의 연구는 여러 가지 방향으로 진행되어 본 저자에 의해 이미 몇 차례 발표된바 있다.⁽¹⁶⁾

⁽¹⁸⁾ 그러나 이 가스버너는 기하학적으로 스윙베인(swirl vane)과 슬릿 slit이 원통형 선단부에 배치되어 있기 때문에, 슬릿부와 스윙베인부가 가스버너의 난류유동장에 어떤 영향을 미치는가는 아직 파악된바가 없어 이를 연구할 필요가 대두되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 이 가스버너를 토대로 각각 슬릿부와 스윙베인부만을 갖는 버너형상으로 변형시켜 주 가스버너를 포함한 3가지 버너모델을 고려하였다. 이들로부터 얻어진 난류유동장을 비교 분석하고자 연소실이 배제된 자유공간내에서 형성되는 3차원 난류 유동장을 열선풍속계를 활용하여 평균속도, 난류강도, 난류운동 에너지 및 레이놀즈 선단응력 등을 분석하였다.

본 연구의 목적은 건식 가스버너의 특성을 파악하고, 기존 버너를 대체할 수 있는 최적화된 설계조건들을 확보하여 향후 신모델 개발 등에 필요한 기초설계자료로 활용하는데 있다.

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° 경사지게 콘형 배플판이 부착되어 있으며, 이 배플판 경사면에는 스윙베인 8개가 있고, 배플판 바로 위쪽에는 방사상으로 8개의 공기분출 슬릿이 위치해 있다. Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 설치한 가스버너로부터 열선풍속계를 이용하여 가스버너의 3차원 난류유동장을 측정하는 그림이다. 본 연구에서 사용한 아음속풍동은 5마력 원심형 송풍기와 DC 모터, 확산부, 정류선, 수축부, 시험부로 구성되어 있으며, 시험부에서는 단면 크기 220 mm(폭) × 220 mm(높이) × 410 mm(길이)에서 약 35 m/s의 풍속과 평균유속 15 m/s에서 약 0.02% 미만의 난류강도가 얻어진다. 또 비

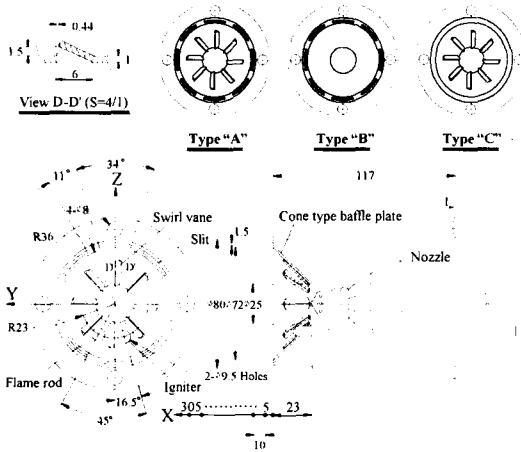


Fig. 1 Configuration of gas swirl burner model

연소시 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(automatic 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.^(19,20) 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 40°까지 10° 간격으로 실시하였는데, 그 결과 각 채널별 평균 Yaw계수는 Fig. 1의 Type A 실험의 경우⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 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 압력 탭(tap)에서 얻어지는 압력 164 Pa을 기준으

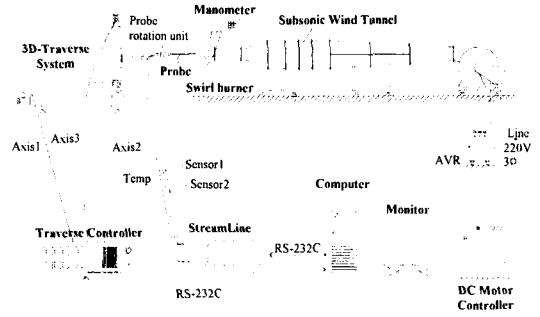


Fig. 2 Experimental apparatus diagram including hot-wire anemometer system

로 조정하였다. 이 압력은 실제 연소용 공기로 사용되는 공기량 450 l /min에 일치하는 것이다.

본 연구에서 고려한 3개의 버너 샘플은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 큰형 배플판을 갖는 건식 가스 스윙버너에서 화염봉(flame rod)과 점화장치(igniter)를 제거하고, 그 구멍들을 접착테이프로 막은 다음 각각 슬릿부와 스윙베인부만을 갖는 버너 형상으로 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 버너 선단으로부터 5 mm 떨어진 위치부터 시작하여 25, 55, 95, 125, 155 mm까지 6지점으로 설정하고, Y방향으로는 원점을 중심으로 -70 mm에서 70 mm까지 5 mm 간격으로 설정하였다. 여기서 큰형 배플판 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿으로부터 분출되는 속도의 크기가 가장 크기 때문에 이 부근에서는 상세한 유속 측정을 위해서 1 mm씩 Probe를 이송하였다. 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

3.1 평균속도 분포

Fig. 3은 3가지 종류의 버너에 대해 X-Y평면내의 6곳(X/R=0.1282(a), 0.6410(b), 1.4103(c), 2.4359(d), 3.2051(e), 3.9744(f))에서 각각 측정된 X방향 평균속도성분 U를 버너출구의 속도 U_e로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 측방향의 초기 영역에서 슬릿부만을 갖는 Type B의 평균속도 U는 약

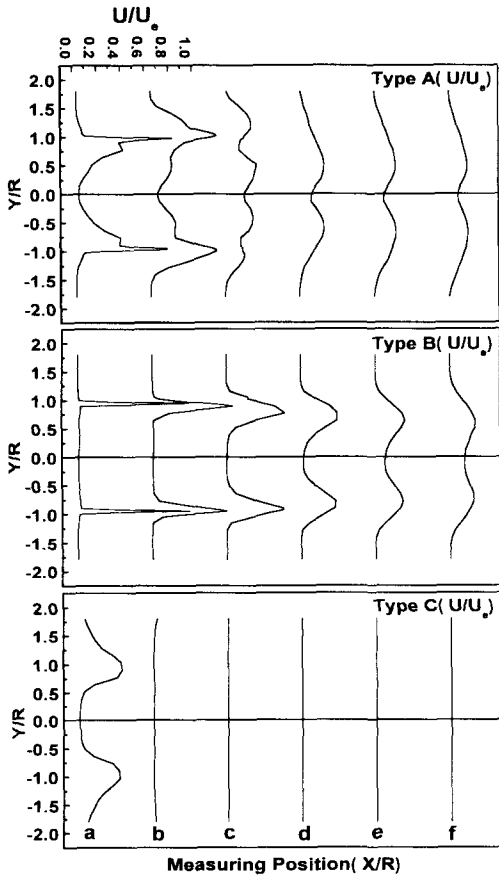


Fig. 3 Mean velocity U profiles measured in the horizontal plane of a burner. ($X/R=0.1282, 0.6410, 1.4103, 2.4359, 3.2051, 3.9744$ from left symbol)

$Y/R \pm 0.97$ 위치에 있는 방사상의 좁은 슬릿으로부터 분사된 빠른 제트속도에 의해 반경방향의 확산보다는 축방향으로 현저히 발달된 유동분포를 보이나, 스윙베인부만을 갖는 Type C의 경우 축방향보다는 반경방향으로 유동이 현저하게 확산되므로, $X/R="a"$ 인 초기영역에서조차 축방향 평균속도성분이 상대적으로 작은 크기로 분포되어 있으며, 특히 스윙베인 바깥쪽에서는 최대치를 그리고 중심축 부근에서는 최소치를 나타내는 전형적인 스윙유동의 분포를 보여주고 있다.^(17,21) 또 Type C의 $X/R="b"$ 이후에서는 거의 0에 가까운 크기로 소멸됨을 알 수 있다. 따라서 주버너인 Type A의 경우 슬릿부와 스윙베인이 동시에 존재함에 따라 $X/R="a"$ 인 축방향의 초기영역에서조차 약 $Y/R \pm 0.97$ 위치에 존재하는 방사상의 좁은 슬릿부에서 형성된 축방향 평균속도의

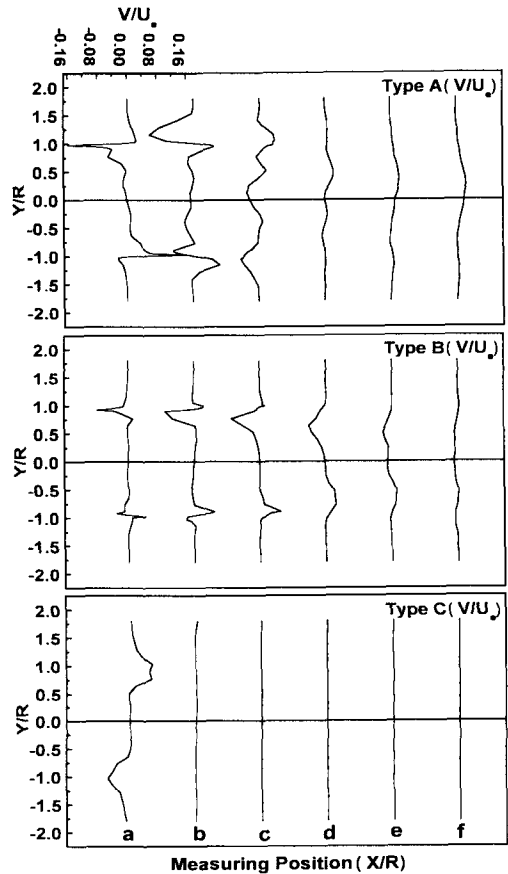


Fig. 4 Mean velocity V profiles measured in the horizontal plane of a burner

Peak치는 반경방향으로 확산되는 스윙베인에 의한 회전유동의 영향으로 Type B의 경우보다 감소되어 나타나고 있다. 또 이 스윙베인은 하류로 갈수록 슬릿부 근처에서 형성된 빠른 축방향 평균속도를 Type B의 경우보다 감소시켜 버너 중심부 쪽으로 접근시키고, 버너 중심부에서의 느린 축방향 속도성분을 증가시켜 중심부에서의 속도분포 구배를 작게 하는 역할을 한다고 볼 수 있다. Hibara 등⁽⁷⁾도 스윙유동의 제트가 존재하면 노즐 출구 직후의 축방향속도는 중심축 부근에서 최소치, 그 외측에는 최대치를 두며, 그 후 하류로 진행함에 따라 중앙부의 느린 유체속도는 가속되고, 외측의 빠른 속도의 유체는 감속되어져 중심부에서 속도분포의 구배가 작게 된다는 점을 언급한바 있다. 또 Gursul⁽²¹⁾도 스윙링이 없는 경우에는 제트출구 근처의 중심부 축방향 평균속도는 최대치를 이루나, 스윙링이 있는 경우에는 함몰된 속도분포를 보여준다고 언급한바 있다.

Fig. 4는 3가지 버너에 대해 수평면 상의 X-Y 평면내 6곳에서 측정한 Y방향(반경방향) 평균속도 성분 V 를 버너출구의 속도 U_c 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 슬릿부만을 갖는 Type B의 경우 슬릿부근인 $Y/R = \pm 0.97$ 에서 Y방향 평균속도 V 는 부호가 서로 다른 Peak치를 보여주며, 하류 방향으로 감에 따라 느린 주변의 속도에 의해 Peak치의 크기는 서서히 감소하지만 중심부 쪽으로 확산 발달하면서 결국 속도분포의 구배가 전체적으로 완만하게 형성되면서 소멸되고 있다. 반면에 스월베인부만을 갖는 Type C의 경우에는 비교적 버너출구의 초기영역에 해당하는 $X/R = "a"$ 의 스월베인 바깥쪽 부근에서만 버너좌우에 Type B와 비교적 같은 크기의 부호가 다른 큰 속도분포의 Peak치를 보여주고 있으나, 그 이후부터는 완전히 소멸이 된 상태를 보여주고 있다. 슬릿부와 스월베인부가 동시에 구성되어 있는 Type A에서 평균속도 V 는 Type B나 Type C와는 전혀 다른 분포를 보여주고 있다. 특히 버너 외곽부근에 위치한 방사상의 좁은 슬릿부근인 $Y/R = \pm 0.97$ 을 중심으로 서로 절대 크기는 비슷하지만 유동방향이 다른 Peak치를 나타내고 있다. $X/R = "c"$ 이전의 경우 Type A의 평균속도 V 는 X방향의 거리 증가에 따라 절대크기가 감소하면서 유동이 버너 중심부 쪽으로 확산 발달되어 $X/R = "d"$ 이후부터는 0에 가까운 비교적 작은 값으로 나타나 슬릿부만을 갖는 Type B보다도 더 빨리 소멸되어 가는 과정을 볼 수 있다.⁽¹⁸⁾

Fig. 5는 3가지 버너에 대해 X-Y평면내의 6곳에서 X방향의 거리 증가에 따라 측정한 Z방향(접선방향) 평균속도 W 를 버너출구 속도 U_c 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 슬릿부만을 갖는 Type B의 모델에서는 역시 슬릿부의 위치에 해당하는 약 $Y/R = \pm 0.97$ 을 중심으로 절대크기는 유사하지만 유동방향이 서로 다른 속도분포 W 의 Peak치가 형성되고 있으며, 하류로 갈수록 그 크기는 현저히 줄어들어 $X/R = "f"$ 부터는 거의 소멸되고 있다. 또 스월베인부만을 갖는 Type C의 경우에는 Y방향 평균속도인 V 와 같이 비교적 초기영역인 $X/R = "a"$ 를 제외한 하류영역에서는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 Type A의 경우에는 슬릿부와 스월베인이 동시에 존재함으로 인해 Z방향 성분의 평균속도 W 는 $X/R = "a"$ 의 경우 슬릿부근인 $Y/R = \pm 0.97$ 에서 버너 좌우측에 모두 양, 음의 값을 갖는 두 개의 Peak치가 공존하다가 X방향 거리 증가에 따라 그 크기가 감소하면서 버너 중앙부 쪽으로 활발하게 확산 발달

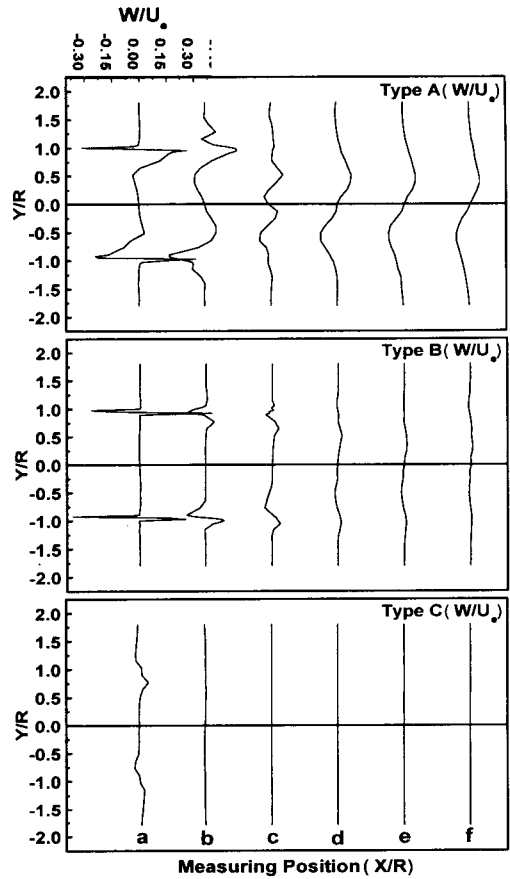


Fig. 5 Mean velocity W profiles measured in the horizontal plane of a burner

해 가는 모습을 보여준다. 특히 Type A 모델의 평균속도 W 는 Fig. 4의 평균속도 V 와는 달리 동일한 X방향 거리에서조차도 그 크기가 더 크게 분포되어 나타나는데, 이것은 스월베인에 의한 회전유동의 작용에 더 크게 영향을 받는 것으로 해석된다.

3.2 난류강도 분포

Fig. 6은 3가지 버너 종류에 대해 X-Y평면내의 6곳에서 X방향 거리 증가에 따라 측정한 X방향 난류속도의 RMS값 u 를 버너출구 속도 U_c 로 무차원화하여 나타낸 난류강도 그림이다. 3가지 버너 모델에 대한 X방향 성분의 난류강도분포는 모두 $Y=0$ 에 대하여 비교적 대칭분포를 보여주고 있다. 슬릿부만을 갖는 Type B에서 X방향 성분의 난류강도는 버너 선단으로부터 초기영역에 해당하는 $X/R = "a"$ 의 슬릿부인 $Y/R = \pm 0.97$ 에서만 비교적 매우 작은 크기로 분포되어 있다. 그러나

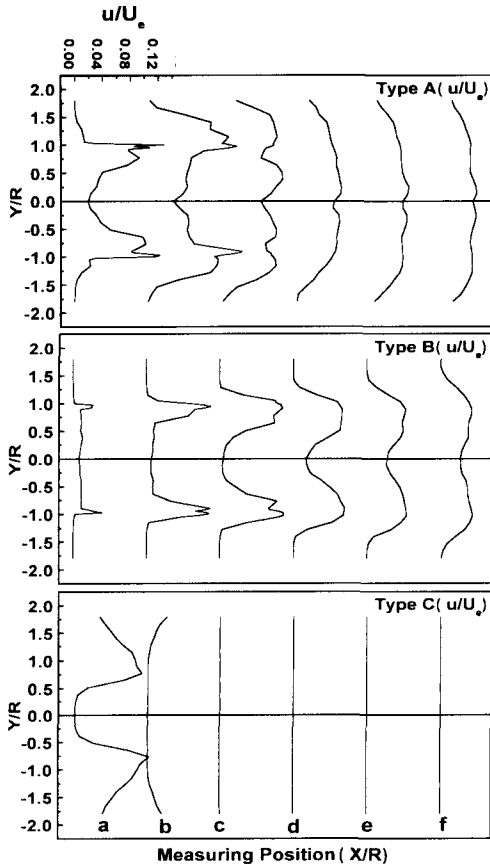


Fig. 6 Turbulent intensity u profiles measured in the horizontal plane of a burner

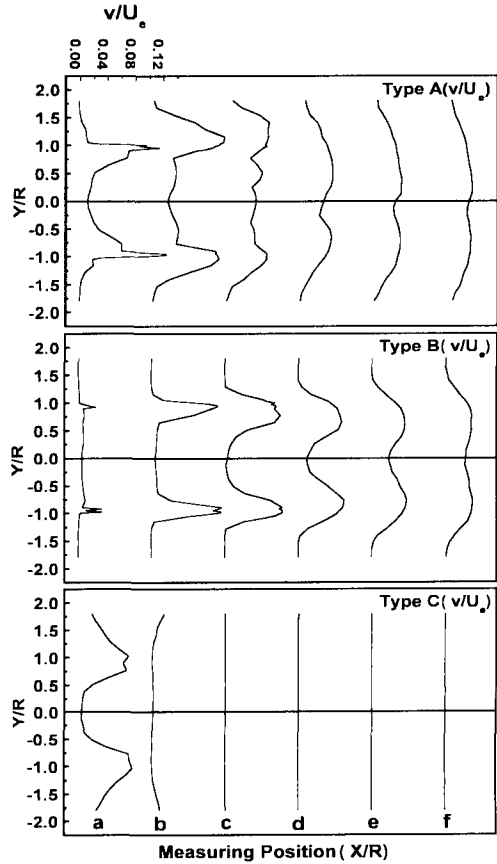


Fig. 7 Turbulent intensity v profiles measured in the horizontal plane of a burner

하류영역에서는 충분히 발달한 난류로 인해 Type B의 $X/R="b"$ 에서는 슬릿부인 $Y/R=\pm 0.97$ 을 중심으로 그 크기가 크게 증가하며, $X/R="c"$ 이후부터는 슬릿부에서 형성된 난류강도의 크기는 서서히 감소하나, 버너 중심부측에서의 크기는 난류의 혼합현상에 의해 증가하고 있다. 반면에 스윙베인만을 갖는 Type C의 경우 Type B의 양상과는 달리 초기영역인 $X/R="a"$ 에서만 스윙베인에 의한 회전유동으로 스윙베인 바깥쪽 부근에서 난류강도가 Peak치를 나타내며 크게 분포되어 나타나고 있으나, 그 이후 하류영역부터는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 주 버너인 Type A에서 난류강도는 슬릿부와 스윙베인이 동시에 존재하면서 초기영역인 $X/R="a"$ 에도 불구하고 슬릿부근과 스윙베인 바깥쪽을 중심으로 상당히 큰 크기로 분포되어 있다. 이것은 스윙베인에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하면서 효과적으로 난류강도를 증가시키기 때문으

로 생각된다. 또 하류방향으로 거리가 증가함에 따라 Type A의 $X/R="c"$ 부터는 슬릿부근에서 형성된 Peak치가 현저히 감소하면서 버너 중심부측의 난류강도 크기를 증가시켜 $X/R="d"$ 부터는 버너 중심부측에서 슬릿부만을 갖는 Type B의 경우보다 더 크고 균일하게 난류강도가 분포되어 있다. 이것은 스윙베인에 의한 회전유동으로 버너 중심부의 유동을 급속히 혼합시키기 때문으로 사료된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 3가지 버너 종류에 대해 X-Y 평면내의 6곳에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 Y방향 및 Z방향 난류속도의 RMS값 v, w 를 버너출구의 속도 U_0 로 각각 무차원화하여 나타낸 난류강도 그림들이다. 여기에서도 3가지 버너 모델에 대한 Y방향 및 Z방향 성분의 난류강도분포는 모두 $Y=0$ 에 대하여 비교적 대칭분포를 보여주고 있다. 슬릿부만을 갖는 Type B의 모델에서는 Y방향 및 Z방향성분의 난류강도들은 X방향성

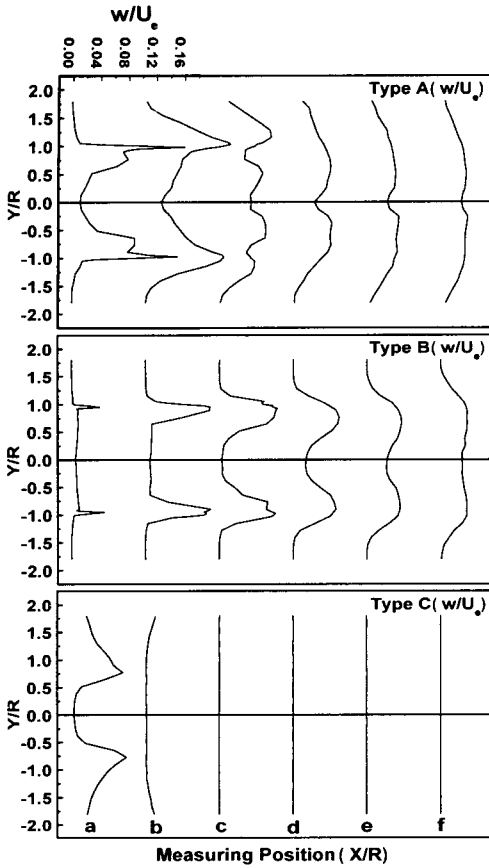


Fig. 8 Turbulent intensity w profiles measured in the horizontal plane of a burner

분의 난류강도와 거의 동일한 크기의 분포를 보여주고 있다. 한편 스윙베인부분을 갖는 Type C의 모델에서 Y방향 및 Z방향 성분의 난류강도는 전 영역에서 거의 동일한 크기 분포를 보이고 있으며, 특히 X방향 성분의 난류강도와 비교해 볼 때 초기영역인 $X/R="a"$ 에서 X방향 성분의 난류강도가 약간 크게 분포되어 있는 것을 제외하면 나머지 하류영역에서도 거의 동일한 크기 분포를 보이고 있다. 또 슬릿부와 스윙베인으로 조합되어 있는 Fig. 6~8의 Type A에서 Y방향 및 Z방향 성분의 난류강도분포는 X방향 성분의 난류강도와 비교해 볼 때 특히 초기영역인 $X/R="a"$ 의 슬릿부근인 $Y/R \pm 0.97$ 에서 그 Peak치가 서로 다르며, 또 버너 중심부 영역에서 난류강도분포의 기울기가 서로 다르게 나타나나, 전체적으로 볼 때는 전 영역에 걸쳐 버너 중심부에서 형성되는 난류강도는 X방향 성분이 약간 크게 형성되어 있으나, Y방향 및 Z방향 성분은 거의 유사한 크

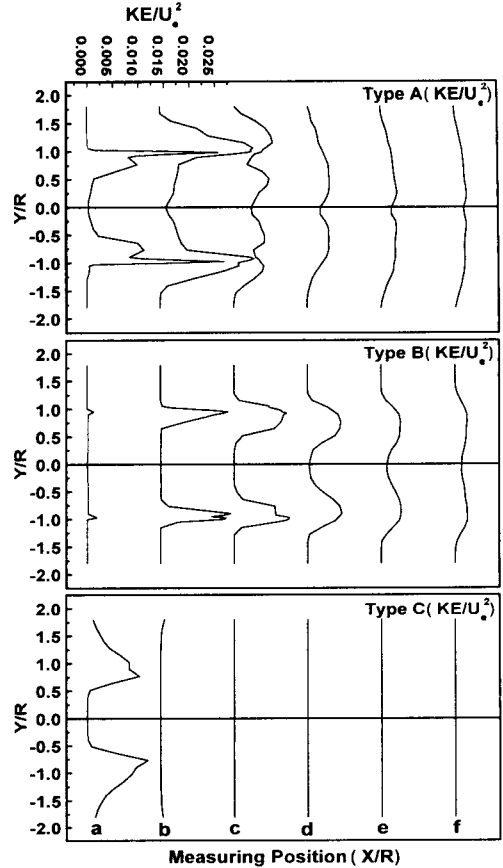


Fig. 9 Turbulent kinetic energy profiles in the horizontal plane of a burner

기 분포를 이루고 있다.

3.3 난류운동에너지분포

Fig. 9는 3가지 버너 종류에 대해 X-Y평면내의 6곳에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 X, Y, Z방향 난류속도 성분의 RMS값들을 각각 제곱한 후 $KE = (u^2 + v^2 + w^2)/2$ 로 정의하여 이 값을 버너출구 속도 U_e^2 으로 무차원화하여 나타낸 난류운동에너지의 그림이다. 슬릿부만을 갖는 Type B의 난류운동에너지는 버너 선단으로부터 초기영역인 $X/R="a"$ 에서는 슬릿부근인 $Y/R \pm 0.97$ 에서조차도 비교적 매우 작은 크기로 분포되어 있다. 또 Type B의 $X/R="b"$ 에서는 슬릿부인 $Y/R \pm 0.97$ 을 중심으로 그 크기가 크게 증가하나, $X/R="c"$ 이후 하류영역부터는 슬릿부에서 형성된 난류운동에너지의 크기가 서서히 감소하는 반면 버너 중심부측에서의 크기는 증가하고 있다. 또 스

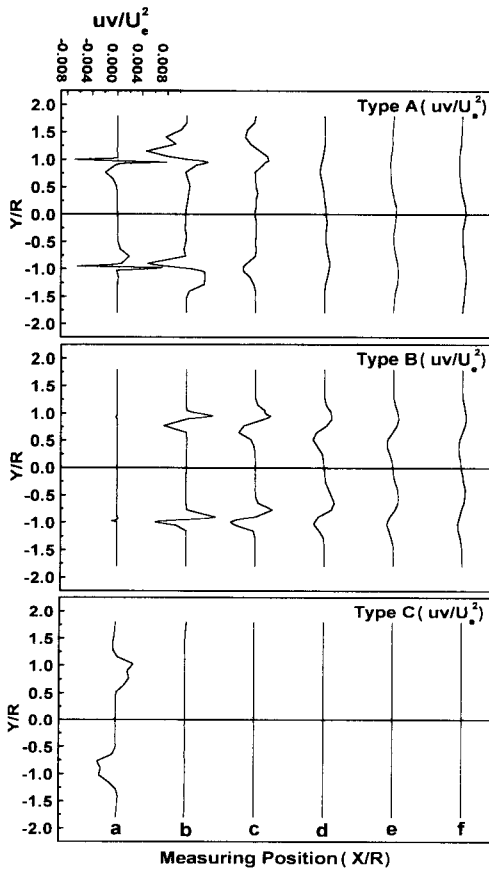


Fig. 10 Reynolds shear stress uv profiles in the horizontal plane of a burner

스윙베인만을 갖는 Type C의 경우, 초기영역인 $X/R = "a"$ 에서만 스윙베인에 의한 회전유동으로 난류강도가 증가하기 때문에 난류운동에너지의 크기가 상대적으로 크게 분포되어 나타나고 있으나 그 이후부터는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 주 버너인 Type A에서의 난류운동에너지는 슬릿부와 스윙베인부가 동시에 존재하면서 초기영역인 $X/R = "a"$ 에도 불구하고 슬릿부근인 $Y/R = \pm 0.97$ 을 중심으로 상당히 큰 크기로 분포되어 있다. 이것은 스윙베인에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하면서 효과적으로 난류강도를 증가시키기 때문이다. 또 축방향의 거리가 증가함에 따라 Type A의 $X/R = "c"$ 부터는 슬릿부근에서 형성된 Peak치가 현저히 감소하면서 버너 중심부쪽의 크기를 증가시켜 $X/R = "d"$ 부터는 버너 중심부쪽에서 상대적으로 난류운동에너지가 크게 분포되어 있다.

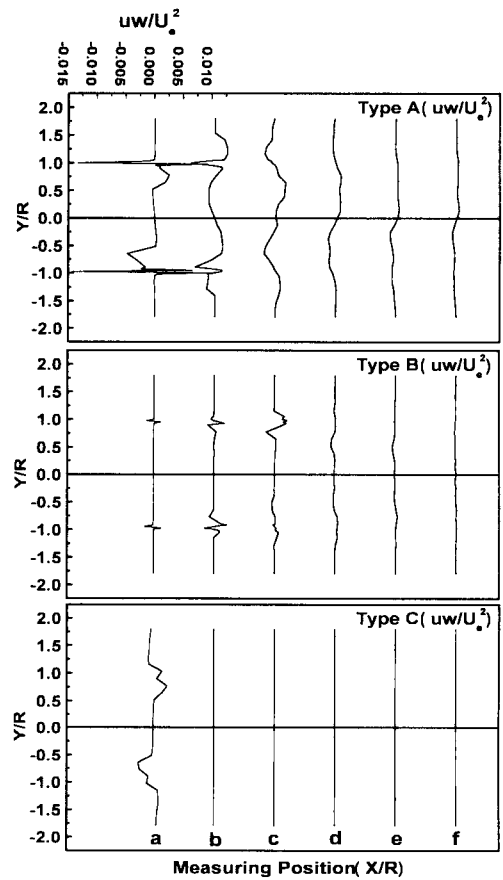


Fig. 11 Reynolds shear stress uw profiles in the horizontal plane of a burner

3.4 레이놀즈 전단응력 분포

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 3가지 버너 종류에 대해 X-Y평면내의 6곳에서 X방향 거리 증가에 따라 측정된 X, Y방향의 난류속도성분 및 X, Z방향의 난류속도성분에 의한 레이놀즈 전단응력 uv 와 uw 를 버너출구 속도 U_s^2 으로 무차원화하여 나타낸 그림들이다. Fig. 10의 슬릿부만을 갖는 Type B에서 레이놀즈 전단응력 uv 는 Fig. 11의 uw 와 마찬가지로 버너 전단으로부터 초기영역인 $X/R = "a"$ 에서는 슬릿부근인 $Y/R = \pm 0.97$ 에서조차도 미처 발달하지 못한 난류속도 때문에 매우 작은 크기로 분포되어 있다. 그러나 $X/R = "b"$ 에서 Type B의 레이놀즈 전단응력 uv 는 슬릿부인 $Y/R = \pm 0.97$ 을 중심으로 부호가 다른 Peak치의 크기가 크게 증가하나, $X/R = "c"$ 이후 하류영역부터는 슬릿부근에서 형성된 Peak치는 점차 감소하면서 중심부쪽으로 옮겨가는 특징을 보이고 있다. 이것을 전체적으로 Fig. 11에 있는 Type B의 레이놀

즈 전단응력 uw 와 비교하면 전 영역에 걸쳐서 슬릿부근과 중심부에서 약간 더 큰 크기분포를 보이고 있다. 스월베인만을 갖는 Type C의 경우, 레이놀즈 전단응력 uv 는 uw 와 마찬가지로 비교적 초기영역에 해당하는 $X/R="a"$ 에서만 스월베인부에 해당하는 영역을 중심으로 회전유동에 의해서 거의 동일한 크기분포와 양상을 보이고 있으나, 그 이후 하류영역부터는 분출된 유동의 영향이 거의 없으므로 완전히 소멸된 모습을 보여주고 있다. 한편 슬릿부와 스월베인부를 갖는 Type A의 레이놀즈 전단응력 uv 와 uw 는 Type B나 Type C와는 전혀 다른 크기와 양상을 보여주는데, 이것은 슬릿부에서 분출하는 빠른 제트유동과 스월베인의 회전유동이 공존하면서 난류를 효과적으로 발달시킨 결과라 생각된다. 특히 버너 선단의 초기영역인 Type A의 $X/R="a"$ 에서 레이놀즈 전단응력 uv 와 uw 는 슬릿부근인 $Y/R=\pm 0.97$ 에서 각 방향에 대한 평균속도의 Y방향 및 Z방향 기울기에 기인되어 양, 음의 큰 Peak치를 가지고 있으며, 배플판의 스월베인 외주부근에서 다음 크기의 Peak치를 갖는 구조를 보여주고 있다. Type A의 난류전단응력 uv 와 uw 는 X방향의 거리 증가에 따라 버너 중심부 쪽으로 확산 발달하기 때문에 그 Peak치들의 크기는 작아지는 반면, 버너 중심부에서의 크기는 증가되어, $X/R="d"$ 이후부터는 전체적으로 크기차이의 구분이 어려운 비교적 완전히 발달되어 소멸되는 완만한 유동분포의 모습을 보여준다. 그러나 Type A의 $X/R="b"$ 이후부터 버너 중심부에서 레이놀즈 전단응력 uw 는 크기와 기울기가 uv 에 비해 약간 더 크게 존재하는데, 이것은 이 영역에서 스월베인에 의한 회전유동의 영향으로 Z방향 난류속도가 더 크게 작용하는 결과라 해석된다. Kilm 등⁽¹⁵⁾도 레이놀즈 전단응력을 평균속도의 양, 음의 기울기와 연관지어 각각 음, 양의 값을 갖는다고 언급한바 있다. 또 Lilley 등⁽²²⁾은 스월링유동에 대하여 난류전단응력은 비등방성(non-isotropic)이 강하며, 이것은 유동장에 있어서 스월도(degree of swirl)와 위치의 함수라고 언급한바 있다.

4. 결 론

큰형 배플판을 갖는 건식 가스버너의 3차원 난류유동장에 슬릿부와 스월베인부가 어떤 역할을 하는가를 파악하기 위해 슬릿부와 스월베인부만을 갖는 버너 모델들로부터 분석한 각 유동속도의 특성치들은 다음과 같다.

(1) 슬릿부와 스월베인부를 갖는 건식 가스버너의 유동구조는 슬릿부에서 가장 큰 축방향 속도 성분으로 분사된 빠른 제트가 슬릿부 안쪽에 위치하여 반경방향으로 분사하려는 스월베인의 회전유동을 에워 쌓아 축방향 쪽으로 유도하기 때문에 슬릿부만을 갖는 모델보다는 축방향의 초기영역에서조차도 버너 중심부에서 증가된 속도분포를 나타내며, 스월베인부만을 갖는 모델보다는 훨씬 하류영역에까지 회전유동의 영향을 갖는다.

(2) 건식 가스버너에서 각 방향 성분의 평균속도는 $X/R<1.4102$ 의 경우 슬릿부와 스월베인부를 빠져나오는 각각의 유동특징이 뚜렷하게 나타나나, $X/R\geq 1.4102$ 의 경우 축방향 거리 증가에 따라 혼합된 유동분포를 보여 슬릿부근에서 감소된 유속을, 버너 중심부에서 증가된 속도를 각각 보여주고 있다.

(3) 건식 가스버너에서 각 방향 성분의 난류강도와 난류운동에너지는 스월베인부에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하여 효과적으로 유동혼합과 평균속도의 기울기를 증가시키기 때문에 $X/R\leq 0.6410$ 의 초기영역에서조차 슬릿부나 스월베인부만을 갖는 모델의 경우보다 상당히 큰 크기로 분포되어 있다.

(4) 건식 가스버너에서 레이놀즈 전단응력 uv 와 uw 는 $X/R\leq 1.4102$ 의 경우 슬릿부와 스월베인부를 중심으로 양, 음의 큰 Peak치를 보이며 나타나나, $X/R>1.4102$ 의 경우 축방향 거리 증가에 따라 비교적 완만한 기울기의 혼합된 유동분포를 보여주고 있다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Shioji, M., Kim, I. S., Ikegami, M. and Murakami, K., 1998, "Flame Stability and NOx Formation in a High-Intensity Swirl Burner." *Transactions of JSME (Part B)*, Vol. 64, No. 621, pp. 222~227.
- (2) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley & Sons, pp. 102~104.
- (3) Lefebvre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, pp. 126~135.

- (4) Syred, N. and Beer, J. M., 1974, "Combustion in Swirling Flows : A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, pp. 143~201.
- (5) Froud, D., O'doherty, T. and Syred, N., 1995, "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.
- (6) Tsao, J. M. and Lin, C. A., 1999, "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.
- (7) Hibara, H. and Sudou, K., 1999, "Swirling Jet along a Solid Surface," *Transactions of JSME (Part B)*, Vol. 65, No. 629, pp. 130~137.
- (8) Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, *Swirl Flows*, Abacus Press, Tunbridge, England.
- (9) Leuckel, I. W. and Fricker, N., 1976, "The Characteristics of Swirl-Stabilized Natural Gas Flames," *J. Inst. Fuel*, Vol. 49, pp. 103.
- (10) Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1988, "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.
- (11) Gupta, A. K., Beer, J. M. and Swithenbank, J., 1976, "Concentric Multi-Annular Swirl Burners: Stability Limits and Emission Characteristics," *Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA*, pp. 79~91.
- (12) Aoki, K., Nakayama, Y. and Wakatsuki, M., 1988, "Study on the Cylindrical Combustor Flow with Swirling Flow (1st Report, Characteristics of Flow Pattern for Swirling Number)," *Transactions of JSME (Part B)*, Vol. 51, No. 468, pp. 2759~2766.
- (13) Aoki, K., Shibata, M. and Nakayama, Y., 1989, "Study on the Cylindrical Combustor Flow with Swirling Flow (2nd Report, Characteristics of Turbulence for Swirling Number)," *Transactions of JSME (Part B)*, Vol. 52, No. 476, pp. 1617~1625.
- (14) Hirai, T., Nagai, N., Koseki, H., Kato, K. and Takado, J., 1988, "Study on Spray Combustion Characteristics of a High Intensity Swirl Combustor (1st Report, Combustion Characteristics of Kerosene Spray)," *Transactions of JSME (Part B)*, Vol. 51, No. 473, pp. 1077~1082.
- (15) 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.
- (16) Kim, J. K., 2001, "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.
- (17) Kim, J. K., 2001, "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.
- (18) Kim, J. K., 2001, "An Experimental Study on Three Dimensional Turbulent Flow Characteristics of Swirl Burner for Gas Furnace," *Transactions of the KSME (Part B)*, Vol. 25, No. 2, pp. 225~234.
- (19) Bruun, H. H., 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132~163.
- (20) Dantec, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms.
- (21) Gursul, I., 1996, "Effect of Nonaxisymmetric Forcing on a Swirling Jet With Vortex Breakdown," *Transactions of ASME (J. of Fluids Eng.)*, Vol. 118, pp. 316~323.
- (22) Lilley, D. G. and Chigier, N. A., 1971, "Non-isotropic Turbulent Shear Stress Distribution in Swirling Flows from Mean Value Distributions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 573~585.