

Gun식 가스버너의 난류유동장 발달에 미치는 슬릿과 스월베인의 영향

김 장 권*

(2003년 2월 24일 접수, 2003년 7월 8일 심사완료)

The Effect of Slits and Swirl Vanes on the Development of Turbulent Flow Fields in Gun-Type Gas Burner

Jang-kweon Kim

Key Words: Gun-Type Gas Burner(건식가스버너), Hot-Wire Anemometer(열선풍속계), Slit(슬릿), Subsonic Wind Tunnel(아음속풍동), Swirl Flow(스월유동), Swirl Vane(스월베인), Turbulent Flow Fields(난류유동장), X-type Hot-wire Probe(X형 열선프로브)

Abstract

This paper is studied to investigate the effect of slits and swirl vanes on the development of turbulent flow fields in gun-type gas burner with a cone type baffle plate because this gas burner is generally composed of eight slits and swirl vanes. All of turbulent characteristics including mean velocities were measured in the horizontal plane and cross section by using X-type hot-wire 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. Slits cause the fast jets, and then they have the characteristic that the flow is not adequately spread to radial direction and has long flow length and very small flow velocity distribution in the central part. On the contrary, swirl vanes does not have long enough for adequate flow length to downstream because the rotational flow diffuses remarkably to radial direction. However, the suitable arrangement between slits and swirl vanes causes effective flow width and flow length, and then it promotes fast flow mixing over the entire region including central part to increase turbulence more largely and effectively. Therefore, it is thought as a very desirable design method in gun-type gas burner to locate slits on the outside of swirl vanes.

1. 서 론

대부분의 가스연소기들은 스월(swirl)유동을 동반하는 버너들을 채택하고 있다. 이것은 스월유동(회전유동)이 재순환영역과 높은 난류를 형성함으로써 연료와 공기의 급속한 혼합을 촉진시키며, 화염을 안정화시키고, 화염의 길이를 짧게 하며, 높은 연소강도를 제공하기 때문이다. 따라서 스월유동은 지난 수십 년 동안 활발하게 연구되어져 가스터빈, 램제트(ram jet), 보일러, 산업용로(furnace), 제트믹서(jet mixer) 등에서 광범위하

게 적용되어져 왔다.⁽¹⁻⁷⁾

현재 가정용 소형 보일러 및 온풍난방기 등에 장착되어 있는 가스 연소기기는 대부분이 장치가 비교적 간단하고, 가격이 저렴한 가압 분사방식인 건(gun)식 가스버너(gas burner)를 채택하고 있다. 이 같은 건식 가스버너는 통풍관(draft-tube)내에 설치된 가스노즐을 통해 연료가 가압 분사되어 송풍기에 의해 공급된 연소용 공기와 통풍관 내에서 일부 혼합된 다음 버너 선단부에 보임을 위해 설치된 배플판(baffle plate)과 스월베인(swirl vane)에 의해 나머지 혼합이 이루어지는 부분에 혼합연소 및 난류연소방식을 채택하는 경우가 많

다. 가스버너에서 사용되고 있는 스월유동의 연구

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

는 정지유체 중에 분출하는 단순한 동축스월제트(coaxial swirl jet)로부터 복잡한 실제 가스연소기 내의 스월유동에 이르기까지 매우 다양하게 수행되고 있다. 이 연구들을 통하여 스월유동의 일반적인 특성이 규명되었고, 버너의 기하학적 형상이 변화된 상태에서 화염안정성을 촉진하고, 연소효율을 증가시키며, 연소오염물질을 제어하는데 있어 스월이 갖는 중요성도 밝혀져 왔다.⁽⁸⁾ 특히 가스버너를 사용하는 연소기의 연소상태는 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 연소상태의 가장 중요한 변수가 되기 때문에 많은 경우에 있어서는 스월유동이 바람직하지 못한 결과들을 초래하지만, 대부분의 연소기에서는 매우 유익한 결과들을 가져오기 때문에 지금까지 효과적인 수단으로 부각되어져 왔다.⁽²⁾

Lefebvre⁽³⁾와 Beer 등⁽⁴⁾은 동축분류버너의 주위 공기유동에 강한 스월을 주게 되면 축방향에 거꾸로 향하는 압력구배가 생겨 재순환영역과 고난류가 형성된다는 것을 밝혔으며, Syred 등⁽⁵⁾은 스월연소기 노즐 출구 주위에서 형성된 와(vortex) 분열이 역유동(reversed flow)을 발생시키며, 이로 인해 형성된 재순환 영역은 주위 유체의 혼입(entainment)율을 증가시키고, 연료와 공기의 급속한 혼합을 촉진하며, 화염길이를 짧게 함으로써 화염이 안정화됨을 밝혔다.

Leuckel 등⁽⁶⁾은 중앙에는 비스월제트가 위치하고 환상부에는 스월공기제트가 위치하는 비예혼합 싱글스월버너를 사용하여 다양한 실험들을 수행하였으며, Chen 등⁽¹⁰⁾은 스월유동에 있어서 증가된 혼합 특성들을 중심부에서 형성되는 Toroid 재순환영역의 결과로 분석함으로써 비예혼합 화염내에서 일어나는 물리적인 과정들을 이해할 수 있는 정보를 제공하였다.

Gupta 등⁽¹¹⁾은 2중의 동축스월버너를 통해 두 개의 환상통로에서 스월유동을 도입하여 제트의 축방향모멘텀과 각모멘텀을 제어함으로써 반경방향 스월분포의 변화를 시도하였으며, 그 결과 상당히 다른 화염안정성한계, 난류레벨, 체적열발생을 그리고 연소특성을 얻을 수 있었다.

Kim⁽¹²⁻¹⁴⁾은 콘(cone)형 배플판을 갖는 건식 가스버너를 통해 연소용 공기량을 변화시켜가면서 난류유동장의 확산폭과 길이 및 구조 등을 연구하고자 열선풍속계를 이용하여 평균속도 및 난류 특성치들의 크기들을 분석한바 있다. 그러나 이

가스버너의 설계에 있어 매우 중요한 스월베인과 슬릿(slot)의 유동장 특성들을 충분히 이해하지 못하고서는 다양한 설계요구조건들에 따라 건식 가스버너의 분류확산폭과 길이 및 구조 등에 영향을 미치는 여러 가지 설계인자들을 찾는 데 많은 연구를 할 수 없게 된다. 따라서 Kim 등⁽¹⁵⁾은 최근 들어 건식 가스버너의 유동장을 효과적으로 형성하는데 있어 슬릿부와 스월베인부만이 갖는 고유한 역할들을 분석하고자 X-Y평면내 일부 특정영역만을 중심으로 평균속도 및 난류특성치들을 측정한다.

한편, 본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍 난방기에 적용할 수 있는 콘형 배플판을 갖는 건식 가스버너를 토대로 각각 슬릿부와 스월베인부만을 갖는 버너형상으로 변형시켜 주 가스버너를 포함한 3가지 버너모델을 연구 대상으로 고려하였다.

본 연구의 목적은 건식 가스버너에서 유동장의 확산폭과 길이 및 구조 등에 영향을 미치는 요인들을 더 자세히 연구하고자 건식 가스버너에서 흔히 설계에 이용되는 스월베인과 슬릿이 주버너의 난류유동장을 어떻게 발달시키고 어떤 유동특징을 가져오는지 버너의 X-Y평면뿐만 아니라 Y-Z평면내에서도 평균속도, 난류강도 및 난류운동에너지의 분포들을 통해 분석하고자 한다. 이를 통해 본 연구에서는 기존 버너의 성능에 영향을 미치는 분류확산폭과 길이 및 구조 등의 개선 가능성을 슬릿과 스월베인의 설계조건들로부터 찾고자 하며, 향후 신 모델 개발 등에 필요한 기초설계자료로도 활용하고자 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° 경사 지게 콘형 배플판이 부착되어 있으며, 이 배플판 경사면에는 스월베인 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, 정류실, 수축부, 시험부로 구성되어 있으며, 시험부에서는 단면 크기 220 mm(폭) × 220 mm(높이) × 410 mm(길

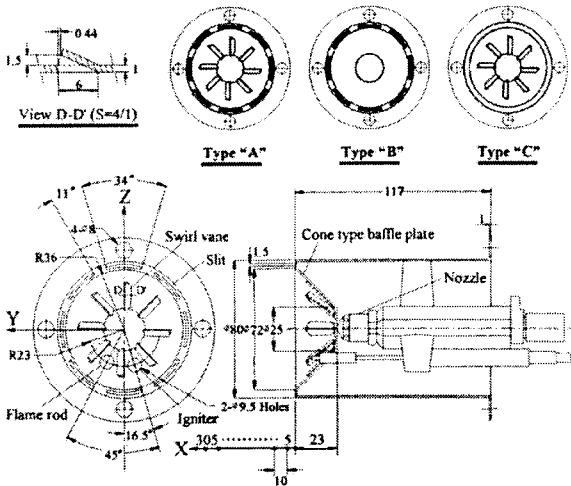


Fig. 1 Configuration of a gas burner model

이)에서 약 35 m/s의 풍속과 평균유속 15 m/s에서 약 0.02% 미만의 난류강도가 얻어진다. 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(automatic traverse system, Dantec 41T50 & 41T75) 그리고 PC로 구성되어 있다. 또 이들 모두 RS-232C에 의해 온라인(on-line)으로 연결되어 활용되며, 속도 교정기에는 유효압력 10 kg/cm²까지 발휘되는 공기압축기가 연결되어 있다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 3차원 유속 측정에 X-형 열선프로브(hot-wire probe) (Dantec, 55R51)를 이용하였다. X-형 열선프로브를 만족하는 교정속도 및 Yaw 계수들은 먼저 열선풍속계와 온라인으로 연결된 교정기를 통해 속도와 방향에 대한 교정작업(calibration)을 실시한 후 얻을 수 있었다.^(16,17) 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-형 열선프로브의 교정은 10 m/s의 속도에서 -40°에서 40°까지 10° 간격으로 실시하였는데, 그 결과 각 채널별 평균 Yaw계수는 Fig. 1에서 Type A 모델 실험의 경우⁽¹²⁻¹⁴⁾ 각각 $k_1^2 = 0.064$, $k_2^2 = 0.074$ 로 그리고 Type B와 Type C 모델의 실험에는 각각 $k_1^2 = 0.088$, $k_2^2 = 0.106$ 을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 A/D 변환기의 샘플링 주파수를 채널당

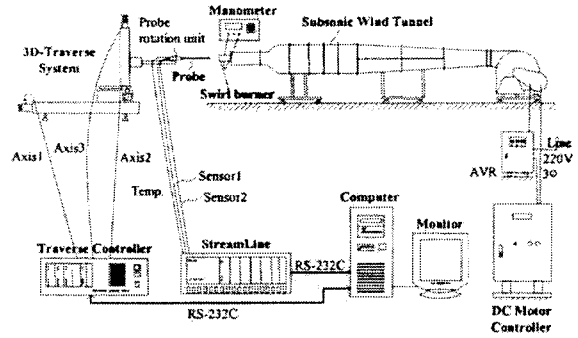


Fig. 2 Experimental apparatus diagram including hot-wire anemometer system

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 기준으로 조정하였다. 이 압력은 팬테스터(fan tester) 출구에 버너모델들을 설치하고 공기량을 450 l/min로 보냈을 때 버너 압력 탭에서 얻어지는 압력과 같다.

본 연구에서 고려한 3가지 종류의 버너 모델들은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘형 배플판을 갖는 건식 가스버너에서 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 각각 준비하였다.

한편 측정위치는 버너 형상이 측대칭을 이루고 있기 때문에 프로브를 X-Y평면(수평면) 내에 이동하면서 X축 방향으로는 버너 선단으로부터 프로브를 보호하기 위해 5 mm 떨어진 위치부터 시작하여 10 mm씩 305 mm까지 설정하고, Y축 방향으로는 원점을 중심으로 -70 mm에서 70 mm까지 5 mm 간격으로 설정하였다. 또 Y-Z평면(횡단면) 내에서는 유동장에서 특별한 모습을 보여주는 X축 방향의 거리 5, 30 mm에서 반지름(R) 방향으로는 0 mm에서 70 mm까지 5 mm 간격으로, 회전각(θ) 방향으로는 0°에서 355°까지 5° 간격으로 각각 측정하였다. 특히 콘형 배플판 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿에서 분출된 유동은 속도 크기가 가장 크기 때문에 이 부근에서 상세한 유속 측정은 프로브를 1 mm씩 이송하여 수행하였다. 이때 유동장내의 실내 온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 약 19±0.5 °C로 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 자동전압조정기(AVR)를 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균속도 분포

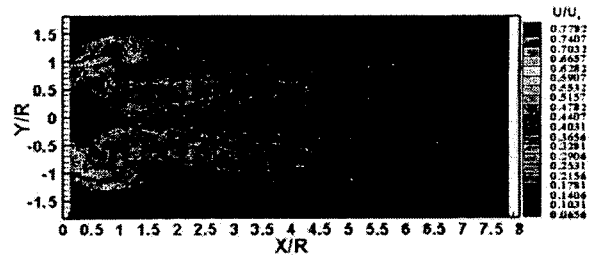
Fig. 3은 3가지 종류의 버너에 대해 X-Y평면내에서 각각 측정된 X축방향 성분의 평균속도 U를 버너출구의 속도 U_0 로 무차원화하여 나타낸 그림들이다.

Fig. 3(b)와 같이 슬릿부만을 갖는 Type B 모델의 경우 평균속도 U의 분포는 슬릿부를 중심으로 약 $X/R=2.5$ 까지는 X축 거리 증가에 따라 단일 제트유동과 같이 확산 발달하는 특징을 보이다가 $X/R=2.5$ 이후부터는 서로 혼합 발달하는 특징을 보여주고 있다.

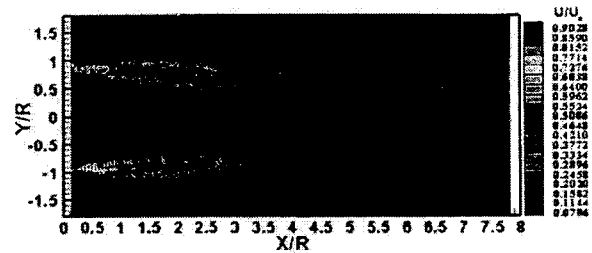
반면에 Fig. 3(c)와 같이 스월베인부만을 갖는 Type C 모델의 경우 경사진 배플판상에 반시계 방향으로 개방된 스월베인의 영향으로 분출되는 회전유동은 X축 방향쪽보다는 반경방향쪽으로 현저히 확산 발달하기 때문에 유동속도를 측정할 범위만을 기준으로 볼 때 평균속도 U는 단지 $X/R=1.0$ 이내에서만 분포되어 있음을 알 수 있다.

그러나 Fig. 3(a)와 같이 슬릿부와 스월베인부를 동시에 갖추고 있는 주 버너인 Type A 모델의 경우 다른 모델들과 현저히 차이를 보이는 특징은 약 $X/R=1.5$ 이전의 영역에서 슬릿부를 중심으로 약 $Y/R=\pm 1.5$ 위치까지는 큰 속도가 분포되어 더욱 확산된 유동폭을 갖는다는 점이다. 또한 버너 중심부 영역에서도 슬릿부만을 갖는 Type B 모델에서와 같이 약 $X/R=2.5$ 이전의 영역에서 거의 존재하지 않던 속도가 상당히 큰 속도를 형성하고 있으며, 하류영역에 있어서도 주위로 확산되는 유동폭이 Type B 모델보다는 훨씬 더 크게 형성된다는 점이다.

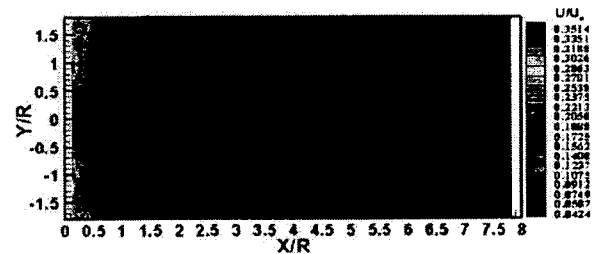
이것은 버너 선단의 초기영역에서 상대적으로 축방향보다는 반경방향으로 더 현저히 확산되어 속도가 느린 스월베인부만을 갖는 Type C 모델과 같은 회전유동을 슬릿부의 빠른 제트유동이 감싸므로 일종의 에어커튼(air-curtain) 효과가 작용하고 또 슬릿부와 슬릿부 사이 좁은 경계면을 스월베인에 의한 회전유동이 일부 통과함에 따라 나타난 결과라 생각된다. 즉 약 $Y/R=\pm 1.5$ 위치까지는 슬릿부의 빠른 제트유동이 반경방향쪽으로 확산하려는 스월베인에 의한 회전유동을 막고 있지만 회전유동의 관성력이 상대적으로 크게 작용하여 Type C 모델보다는 작지만 Type B 모델보다는 더 확산된 큰 속도 크기를 가지며, 약 $X/R=1.5$ 이후에서는 유동이 반경방향쪽으로 더 이상 향하지 못하고 X축 방향으로 유동방향이 전환되



(a) Type A (main model)



(b) Type B (model with only slits)



(c) Type C (model with only swirl vanes)

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

기 때문에 스월베인에 의한 회전유동이 버너 중심부에서 상대적으로 훨씬 강하게 작용하여 버너 중심부에서도 비교적 큰 유동속도가 분포되어 나타나고 있다.

한편, Hibara 등⁽²⁾도 스월유동의 제트가 존재하면 노즐 출구 직후의 X축 방향의 속도성분은 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⁽¹⁸⁾도 스월링이 없는 경우에는 제트출구 근처의 중심부에서 X축 방향성분의 평균속도는 최대치를 이루나, 스월링이 있는 경우에는 함몰된 속도분포를 보여준다고 언급한바 있다.

Fig. 4는 3가지 버너 모델에 대한 $X/R=0.1282$ 와 0.7692 위치의 Y-Z평면내에서 각각 측정된 평균속도 U를 버너출구 속도 U_0 로 무차원화하여 나타

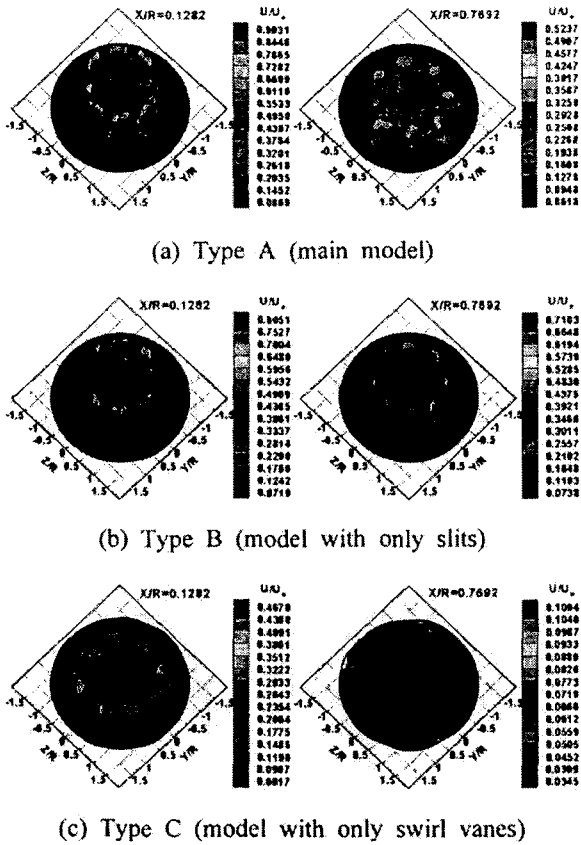


Fig. 4 Mean velocity U contours in the Y-Z plane (X/R=0.1282, 0.7692)

낸 그림들이다.

슬릿부만을 갖는 Type B 모델에서 평균속도 U는 오로지 8개의 슬릿부에서만 빠른 속도가 분출되는 모습으로 나타나며, X축 방향의 거리가 증가해도 슬릿부를 중심으로 확산 발달하는 경향을 보이고 있다.

반면에 스월베인부만을 갖는 Type C 모델의 경우에는 버너 선단으로부터 초기영역인데도 불구하고 속도의 크기가 현저히 줄어들어 반시계방향으로 회전하는 유동이 8개의 스월베인부 바깥쪽에서 형성되는 Peak치와 더불어 훨씬 넓은 영역으로 분포된다. 또 하류로 증가한 X/R=0.7692에서는 스월베인을 빠져나온 회전유동이 반경방향쪽으로 현저히 확산되어 측정영역을 벗어난 결과 겨우 가장자리에서만 매우 작은 크기로 나타나 있다.

한편 슬릿부와 스월베인부를 동시에 구성하고 있는 Type A 모델의 경우 평균속도 U는 슬릿부의 빠른 제트유동과 스월베인부의 회전유동이 동시에 결합되면서 슬릿부에서는 여전히 빠른 제트

유동이 형성되고 있지만, 스월베인부의 회전유동이 슬릿부 사이를 제외하고는 버너 바깥쪽으로 벗어나지 못하고 있어 Type C 모델보다도 버너 중심부까지 더 확산되는 분포를 보여주고 있다. 그러나 슬릿부와 슬릿부 사이 좁은 경계면에서는 스월베인에 의한 회전유동이 일부 통과함에 따라 평균속도가 버너 외측까지 발달하는 모습을 보여주고 있는데 특히 X/R=0.7692에서 그 현상이 더 잘 나타나 있다.

따라서 이 같은 현상은 Fig. 3(a)에서도 알 수 있듯이 약 X/R=1.5까지는 슬릿부에서의 속도는 감소하는 반면 슬릿부 사이를 빠져나오는 회전유동으로 인해 지속적으로 발달하게 된다.⁽¹²⁾

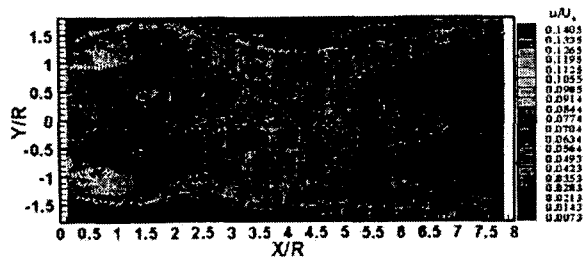
3.2 난류강도 분포

Fig. 5는 3가지 버너 종류에 대해 X-Y평면내에서 X축 방향의 거리 증가에 따라 측정된 X축 방향 변동속도성분의 RMS값 u를 버너출구의 속도 U₀로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림들이다.

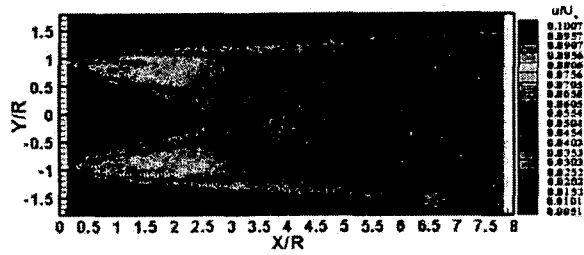
Fig. 5(b)와 같이 슬릿부만을 갖는 Type B 모델에서 X축 방향성분의 난류강도는 슬릿부인 Y/R=±0.97에서 빠른 제트가 독립적으로 분사되므로 비교적 빠른 속도가 하류까지 진행되어 약 X/R=2.5까지도 평균속도의 크기가 크게 분포되어 속도기울기가 커짐에 따라 충분히 발달된 난류가 형성되고 있지만, 약 X/R=2.5이후부터는 난류크기가 점차 감소해 가면서 중심부 쪽으로 확산되고 있다. 또 중심부에서는 약 X/R=2.0이전 영역의 경우 평균속도가 거의 존재하지 않는 관계로 난류의 크기가 거의 존재하지 않으나, 약 X/R=2.0이후부터는 슬릿부에서 형성된 유동속도의 혼합현상에 의해 난류강도의 크기가 서서히 증가하다가 X/R=6.0이후부터는 감소해 가는 경향을 보이고 있다.

반면에 Fig. 5(c)와 같이 스월베인부만을 갖는 Type C 모델의 경우 Type B 모델의 양상과는 달리 초기영역에서만 스월베인에 의한 회전유동으로 인해 혼합현상이 증가하여 초기영역에도 불구하고 스월베인 바깥쪽 부근에서 난류강도가 크게 분포되어 나타나고 있으며, 약 X/R=1.0이후 하류영역부터는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.

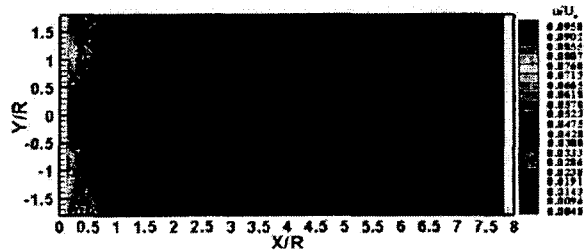
그러나 Fig. 5(a)에서와 같이 주 버너인 Type A 모델의 경우 X축 방향성분의 난류강도는 슬릿부와 스월베인부가 동시에 존재하면서 초기영역에도 불구하고 슬릿부 부근과 스월베인부 바깥쪽을 중심으로 상당히 큰 크기로 분포되어 있다. 이것



(a) Type A (main model)



(b) Type B (model with only slits)



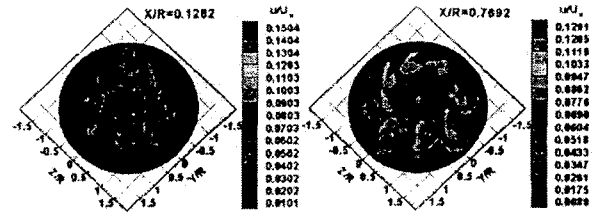
(c) Type C (model with only swirl vanes)

Fig. 5 Turbulent intensity u contours in the X-Y plane

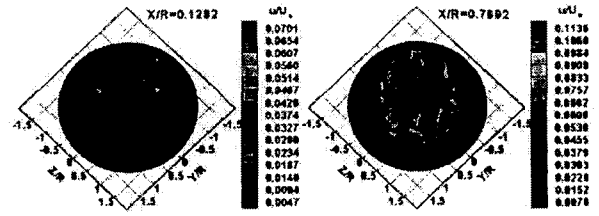
은 스월베인부에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하면서 효과적으로 난류강도를 증가시키기 때문으로 생각된다. 또 약 $X/R=1.5$ 이후의 하류방향으로 거리가 증가함에 따라 슬릿부 부근에서 형성된 높은 난류강도가 현저히 감소하면서 버너 중심부쪽의 난류강도 크기를 증가시키므로 전 영역에 걸쳐 버너 중심부쪽에서 슬릿부만을 갖는 Type B 모델의 경우보다 더 크고 균일하게 난류강도가 분포되어 있음을 알 수 있다. 이것은 스월베인부에 의한 회전유동으로 버너 중심부의 유동을 급속히 혼합시키기 때문으로 사료된다.

한편, 각 모델들에 대한 Y축 및 Z축 방향성분의 난류강도들은 X축 방향성분의 경우와 절대크기는 서로 다르지만 분포 경향이 매우 유사하기 때문에 본문에서는 생략하였다.⁽¹³⁾

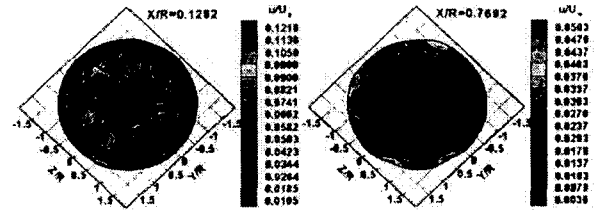
Fig. 6은 3가지 버너 모델에 대한 $X/R=0.1282$ 와 0.7692 위치의 Y-Z평면내에서 각각 측정된 X축방



(a) Type A (main model)



(b) Type B (model with only slits)



(c) Type C (model with only swirl vanes)

Fig. 6 Turbulent intensity u contours in the Y-Z plane ($X/R=0.1282, 0.7692$)

향 변동속도성분의 RMS값 u 를 버너출구 속도 U_e 로 무차원화하여 나타낸 난류강도의 그림들이다.

Fig. 6(b)에서와 같이 초기영역에 해당하는 $X/R=0.1282$ 에서 슬릿부만을 갖는 Type B 모델의 경우 X축 방향성분의 난류강도가 8개의 슬릿부를 중심으로 비교적 작은 크기의 Peak치를 형성하고 있으며, 슬릿부 사이의 영역과 슬릿부 내측의 중심부에서는 가장 작은 난류크기가 형성됨을 알 수 있다.

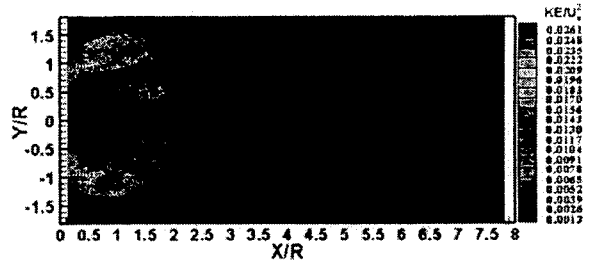
그러나 X축 방향의 거리가 증가한 $X/R=0.7692$ 에서는 슬릿부 중심부에서 초기영역보다 상당히 증가한 크기로 Peak치를 보이며 원뿔모양과 같이 분포하면서 슬릿부 내외측으로 좀 더 확산되어 난류강도가 발달하나, 이 위치에서는 여전히 슬릿부 사이와 모델 중심부에서 가장 작은 크기로 나타나 있다.

반면에 Fig. 6(c)에서와 같이 스월베인부만을 갖는 Type C 모델의 경우 스월베인부를 빠져나온 회전유동이 X축 방향보다는 반경방향쪽으로 현저히 확산되어 발달하나 회전유동에 의해 혼합

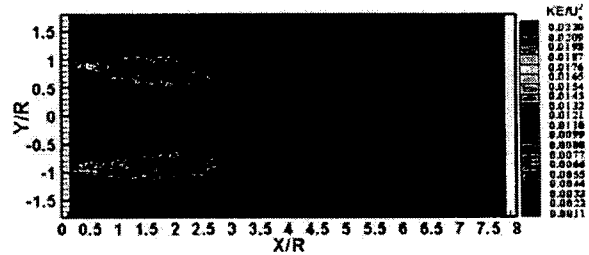
현상이 빠르게 증대되므로 $X/R=0.1282$ 인 초기영역에도 불구하고 유동이 없는 스윌베인 내측 중심부를 제외한 전 측정영역에서 Type B 모델보다도 더 큰 크기의 난류강도가 분포하고 있으며, 8개의 스윌베인부 외주반경위치를 중심으로 Peak치가 각각 뚜렷하게 형성됨을 알 수 있다. 또 X축 방향의 거리가 증가한 $X/R=0.7692$ 에서는 더욱 반경방향쪽으로 확산되어 측정범위한도를 훨씬 벗어난 회전유동 때문에 측정영역 내에서만 본다면 단지 스윌베인부 외주를 벗어난 영역에서만 초기영역에서보다 현저히 감소된 크기의 난류강도가 분포하고 있다. 그러나 스윌베인부 내측에서는 Fig. 5(c)에서도 알 수 있듯이 거의 난류강도가 존재하지 않음을 알 수 있다.

한편 Fig. 6(a)와 같이 슬릿부와 스윌베인부를 동시에 갖는 Type A 모델의 경우 두 측정영역에서 모두 Type B 모델이나 Type C 모델보다도 훨씬 큰 난류강도가 분포되어 나타난다. 이것은 반경방향쪽으로 확산 유동하려는 스윌베인부에 의한 회전유동을 슬릿부에서 빠져나온 빠른 제트유동이 에워 쌓아 X축 방향으로 유도하는 일종의 에어커튼효과가 작용함으로 혼합효과가 극대화되어 난류강도가 크게 분포된 것으로 생각된다.

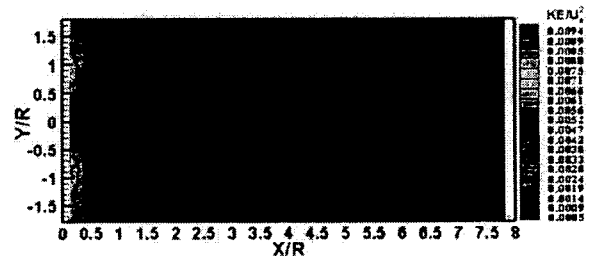
특히 버너 초기영역에도 불구하고 $X/R=0.1282$ 에서 X축 방향성분의 난류강도는 다른 모델들과 달리 매우 큰 크기를 가지면서 슬릿부를 중심으로 Peak치를 보여주고 방사상으로 배치되어 있는 슬릿부와 슬릿부 사이의 경계구간에서도 상당히 큰 크기를 보여준다는 점이 슬릿부와 스윌베인부를 적절히 조합하면 난류를 증대시킨다는 사실을 확인할 수 있다. 또 $X/R=0.1282$ 에서 난류강도가 스윌베인부 외주측과 슬릿부 사이의 영역에서는 $X/R=0.7692$ 에서보다도 훨씬 큰 크기의 분포를 보여주나, 스윌베인부 외주 내측의 버너 중심부에서는 X축 방향의 거리가 증가한 $X/R=0.7692$ 에서보다도 작은 크기의 분포를 보여주고 있다. 특히 $X/R=0.7692$ 의 경우 난류강도가 스윌베인부에 의한 회전유동의 영향을 받아 슬릿부를 중심으로 뚜렷하게 형성된 8개의 Peak치가 약간 반경방향으로 경사지게 분포됨을 보여주며, 버너 중심부에서는 비교적 균일한 큰 크기로 나타난다. 또 하류영역으로 갈수록 이 같은 현상은 지속되어 Fig. 5(a)에서도 알 수 있듯이 약 $X/R=1.5$ 위치까지는 슬릿부의 영향이 적어지는 반면 회전유동의 영향이 크게 작용하여 8개의 Peak치가 경사지게 늘어난 모습을 예상할 수 있다.⁽¹⁶⁾



(a) Type A (main model)



(b) Type B (model with only slits)



(c) Type C (model with only swirl vanes)

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

3.3 난류운동에너지분포

Fig. 7은 3가지 버너 종류에 대해 X-Y평면내에서 X축 방향의 거리 증가에 따라 측정된 X, Y, Z축 방향 변동속도 성분들의 RMS (Root-Mean-Square) 값들을 이용하여 얻어진 난류운동에너지의 값을 버너출구 속도 U_0^2 으로 무차원화하여 나타낸 그림들이다. 한편, 본 연구에서 사용한 난류운동에너지는 $KE=(u^2+v^2+w^2)/2$ 으로 정의하였다.

Fig. 7(c)에서와 같이 슬릿부만을 갖는 Type B 모델의 난류운동에너지는 약 $X/R=3.0$ 이전의 영역까지는 슬릿부로부터 독립적으로 발달하여 비교적 큰 크기로 분포되어 나타나며, 특히 슬릿부 외측보다는 내측으로 더 확산된 모습을 보여주고 있다. $X/R=3.0$ 이후부터는 비교적 작은 크기로 좌우 슬릿부로부터 형성된 난류운동에너지가 서

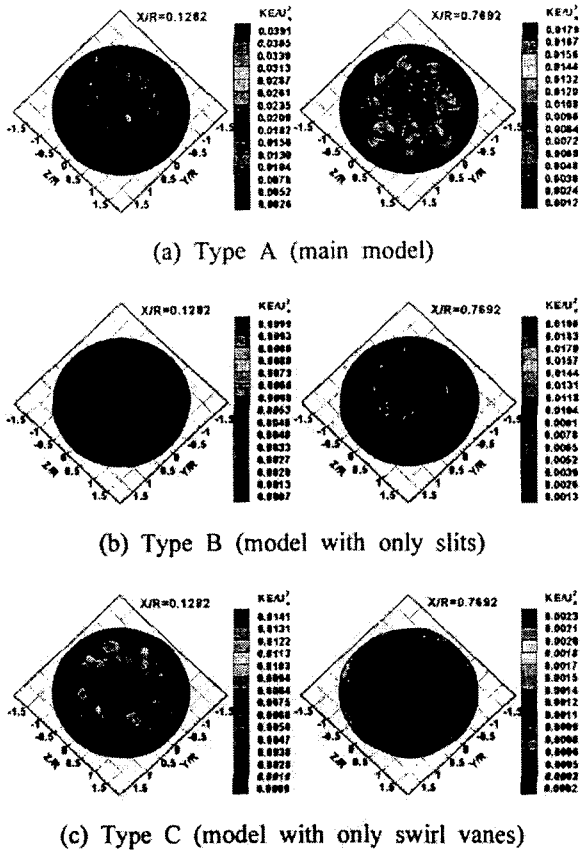


Fig. 8 Turbulent kinetic energy contours in the Y-Z plane ($X/R=0.1282, 0.7692$)

로 합류된 모습을 보여주고 있다.

반면에 Fig. 7(c)에서와 같이 스월베인부만을 갖는 Type C 모델의 경우에는 초기영역에서 스월베인부 외주측을 중심으로 Peak치가 분포되어 나타나며, 측정영역만을 기준으로 볼 때 약 $X/R=0.5$ 이전의 영역에서만 다소 큰 크기를 보여주나, 그 이후 영역에서는 유동이 측정구간을 훨씬 벗어나므로 난류운동에너지는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.

한편 Fig. 7(a)에서와 같이 슬릿부와 스월베인부를 동시에 구성하고 있는 Type A 모델에서는 난류운동에너지가 좌우 슬릿부를 중심으로 약 $X/R=0.5$ 의 영역까지 Peak치가 형성되며, 약 $X/R=1.5$ 까지는 상당히 큰 크기로 분포되어 나타난다.

특히 다른 모델들과 현저히 차이를 보이는 현상은 버너 중심부에서 비교적 큰 크기의 난류운동에너지가 존재하며, 그 크기가 훨씬 하류영역으로까지 확대되어 나타난다는 점이다. 따라서

슬릿부나 스월베인부는 단독으로 있을 때보다 적절히 조합되어 사용함으로써 전 영역에 걸쳐서 난류운동에너지를 효과적으로 증대시켜 사용할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 3가지 버너 모델에 대한 $X/R=0.1282$ 와 0.7692 위치의 Y-Z평면내에서 각각 측정된 X, Y, Z축 방향 변동속도 성분들의 RMS값들로부터 Fig. 7에서 정의한 계산방식과 같이 하여 얻어진 무차원 난류운동에너지를 나타낸 그림들이다.

먼저 각 모델별로 난류운동에너지가 X축 방향 성분의 난류강도와 유사한 분포를 이루고 있다는 점에서 Y축 및 Z축 방향성분의 난류강도들도 역시 X축 방향성분의 난류강도와 유사한 분포를 이룬다는 것을 추정할 수 있다.^(12,13)

Fig. 8(b)와 같이 슬릿부만으로 구성된 Type B 모델에서 난류운동에너지는 초기영역인 $X/R=0.1282$ 보다는 더 하류로 진행된 $X/R=0.7692$ 에서 8개의 슬릿부를 중심으로 더 큰 Peak치를 보이며, 슬릿부를 제외한 다른 영역에서는 가장 작은 크기를 보여주고 있다.

반면에 Fig. 8(c)에서와 같이 스월베인부만으로 구성된 Type C 모델의 경우 난류운동에너지는 X축 방향보다는 반경방향쪽으로 현저히 확산 분출하는 스월베인에 의한 회전유동으로 인해 난류가 효과적으로 증대되어 $X/R=0.1282$ 인 초기영역에서조차도 Type B의 모델보다 더 큰 크기분포를 보여주며, 8개의 스월베인부를 중심으로 Peak치가 형성되어 회전하는 모습으로 길게 경사져 분포됨을 알 수 있다. 그러나 $X/R=0.7692$ 에서는 스월베인부에 의한 회전유동이 반경방향쪽으로 현저히 확산된 결과, 대부분의 유동이 측정영역을 훨씬 벗어난 관계로 측정영역 외곽영역에서만 매우 작은 크기 분포를 이루고 있다.

한편 Fig. 8(a)에서와 같이 슬릿부와 스월베인부로 구성된 Type A 모델의 경우 초기영역에 해당하는 $X/R=0.1282$ 에서의 난류운동에너지는 다른 모델들에 비해 8개의 슬릿부에서 가장 큰 Peak치를 나타내며, 슬릿부에서 버너 중심부로 갈수록 그 값이 점차 감소해 가는 분포를 보여줘 초기영역에서는 주로 스월베인부 외주측에서 크게 발달하는 것을 알 수 있다. 또 슬릿부와 슬릿부 사이 좁은 경계면에서는 스월베인부에 의한 회전유동이 통과함에 따라 버너 외주측에서도 난류운동에너지가 형성됨을 알 수 있다. 한편 $X/R=0.7692$ 에

서와 같이 X축 방향으로 거리가 증가한 경우에는 여전히 슬릿부를 중심으로 초기영역에서보다는 다소 줄어든 난류운동에너지의 Peak치가 경사져 늘어진 모습을 보여주며, 버너 정 중앙부를 제외한 중심부근에서도 그 크기가 비교적 균일한 형태로 넓은 범위에 걸쳐 형성되고 있다. 또한 슬릿부와 슬릿부 사이 좁은 경계면을 통과하는 스윙베인부에 의한 회전유동의 영향으로 버너 외주를 벗어난 영역까지 난류운동에너지가 확산되고 있다.

4. 결론

콘형 배플판을 갖는 건식 가스버너에서 슬릿부와 스윙베인부가 3차원 난류유동장 발달에 어떤 영향을 미치는가를 파악하기 위해 슬릿부와 스윙베인부만을 갖는 버너 모델들과 비교 분석한 결과들은 다음과 같다.

(1) 건식 가스버너에서 평균속도 U 는 $X/R \leq 1.5$ 의 영역에서 반경방향으로 약 $Y/R = \pm 1.5$ 위치까지는 큰 속도로 더욱 확산된 유동폭이 형성되지만, 버너중심부에서는 스윙베인부에 의한 회전유동이 반경방향으로 더 이상 향하지 못하고 X축 방향으로 전환되기 때문에 상대적으로 훨씬 강하게 작용하여 비교적 큰 유동속도가 분포된다.

(2) 건식 가스버너에서 축방향성분의 난류강도와 난류운동에너지는 슬릿부의 빠른 제트와 스윙베인부의 회전유동이 슬릿부와 스윙베인부 경계면에서 충돌함으로 속도기울기가 크게 작용하여 효과적으로 유동을 빠르게 혼합시키므로 약 $X/R = 1.5$ 이전까지 슬릿부와 스윙베인부를 중심으로 상당히 큰 크기를 보인다. 또 하류측에서는 버너 중심부쪽에서도 슬릿부의 빠른 제트가 현저히 감소하면서 회전유동이 버너 중심부쪽으로 유도되므로 비교적 크고 균일한 크기가 형성된다.

(3) 슬릿부는 빠른 제트로 인해 긴 유동길이를 유발하며, 버너 중앙부에서도 유동이 반경방향쪽으로 크게 확산되지 못해 매우 작은 유동속도를 갖는다. 또 스윙베인부는 회전유동이 반경방향쪽으로 현저히 확산하므로 하류방향으로 충분히 긴 유동길이를 갖지 못하게 한다.

(4) 건식 가스버너에서 슬릿부를 스윙베인부 외측에 위치시키는 것은 스윙베인부에 의한 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동을 공존시켜 유동폭을 확산시키고 효과적인 유동길이를 갖게 하므로 버너 중심부를 포함한 전 영역에 걸쳐 빠

른 유동혼합을 촉진시켜 난류를 더 효과적으로 증가시키게 된다.

(5) 버너의 성능에 영향을 미치는 분류확산폭과 길이 및 구조 등을 더 효과적으로 분석하기 위해서는 슬릿과 스윙베인의 분출 속도비를 달리하는 연구가 필요하다.

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) Hibara, H. and Sudou, K., 1999, "Swirling Jet along a Solid Surface," *Transactions of JSME (Part B)*, Vol. 65, No. 629, pp. 130~137.
- (3) Lefebvre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, pp. 126~135.
- (4) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley & Sons, pp. 102~104.
- (5) Syred, N. and Beer, J. M., 1974, "Combustion in Swirling Flows : A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, pp. 143~201.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (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) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Kim, J. K. and Jeong, K. J., 2003, "The Role of Slits and Swirl Vanes on the Turbulent Flow Fields in Gun-Type Gas Burner with a Cone-Type Baffle Plate," *Transactions of the KSME (Part B)*, Vol. 27, No. 4, pp. 466~475.
- (16) Bruun, H. H., 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132~163.
- (17) Dantec, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms.
- (18) Gursul, I., 1996, "Effect of Nonaxisymmetric Forcing on a Swirling Jet With Vortex Break-down," *Transactions of ASME (J. of Fluids Eng.)*, Vol. 118, pp. 316~323.