

배플판 형상이 다른 Gun식 가스버너의 난류유동 특성치 고찰

김 장 권[†] · 정 규 조^{*}

(2003년 11월 27일 접수, 2004년 3월 2일 심사완료)

Investigation on the Turbulent Flow Characteristics of a Gun-Type Gas Burner with the Different Shape of Baffle Plate

Jang-kweon Kim and Kyu-jo Jeong

Key Words: Cone-Type Baffle Plate(콘형배플판), Flat-Type Baffle Plate(플랫형배플판), Gun-Type Gas Burner(건식가스버너), Hot-Wire Anemometer(열선풍속계), Slit(슬릿), Subsonic Wind Tunnel(아음속풍동), Swirl Vane(스윙베인)

Abstract

This paper was studied to investigate and compare the effects of inclined baffle plate on the turbulent flow characteristics of a gun-type gas burner through X-Y plane and Y-Z plane respectively by using X-probe from hot-wire anemometer system. For this purpose, two burner models with a cone-type baffle plate and a flat-type one respectively were used. The fast jet flow spurted from slits plays a role such as an air-curtain because it encircles rotational flow by swirl vanes and drives mixed main flow to axial direction regardless of the inclination of baffle plate. The inclined baffle plate causes axial mean velocity component and turbulent intensities etc. to be greatly concentrated towards the central part of a burner, and its effect especially appears in the range of about $X/R=1.0\sim 2.0$. Also, it gives much larger size to axial mean velocity component and turbulent intensities etc. formed near the slits in the range of $X/R=1.4103$. Especially the inclined baffle plate shifts more the Reynolds shear stress uw to the central region of a burner($Y/R=\pm 0.75$) than the flat-type one, moreover it develops more strongly than uv .

1. 서 론

최근 들어 세계 여러 나라에서는 지구환경오염 문제로 인한 온실가스 배출규제 강화, 석탄 및 석유 등 화석에너지자원 고갈 등을 계기로 차세대 에너지원의 개발에 박차를 가하고 있다. 이런 환경 규제 흐름에 따라 각종 연소기나 난방기 등에 있어서도 점점 수소나 바이오매스(biomass) 등의 청정연료를 사용하는 가스버너의 개발에 관심이 집중되고 있다.

Lefebvre⁽¹⁾와 Beer 등⁽²⁾은 동축분류버너의 주위 공기유동에 강한 스윙(swirl)을 주게 되면 축방향에 거꾸로 향하는 압력구배가 생겨 재순환영역(recirculation zone)과 고난류가 형성된다는 것을 밝혔으며, Syred 등⁽³⁾은 스윙연소기 노즐 출구 주위에서 형성된 와(vortex) 분열이 역유동(reversed flow)을 발생시키며, 이로 인해 형성된 재순환 영역은 주위 유체의 혼입(entrainment)률을 증가시키고, 연료와 공기의 급속한 혼합을 촉진하며, 화염 길이를 짧게 함으로서 화염이 안정화됨을 밝혔다. Van der Lans 등⁽⁴⁾은 스윙이 동반된 로(furnace) 중심부에서는 연료가스와 공기사이의 효율적인 혼합을 위한 내부 재순환영역이, 그리고 벽 근처에서는 외부 재순환영역이 각각 형성되어 뚜렷한 역유동의 영역이 존재함을 밝혔다.

[†] 책임저자, 회원, 군산대학교 동력기계시스템공학 전공

E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr

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

^{*} 회원, 군산대학교 동력기계시스템공학 전공

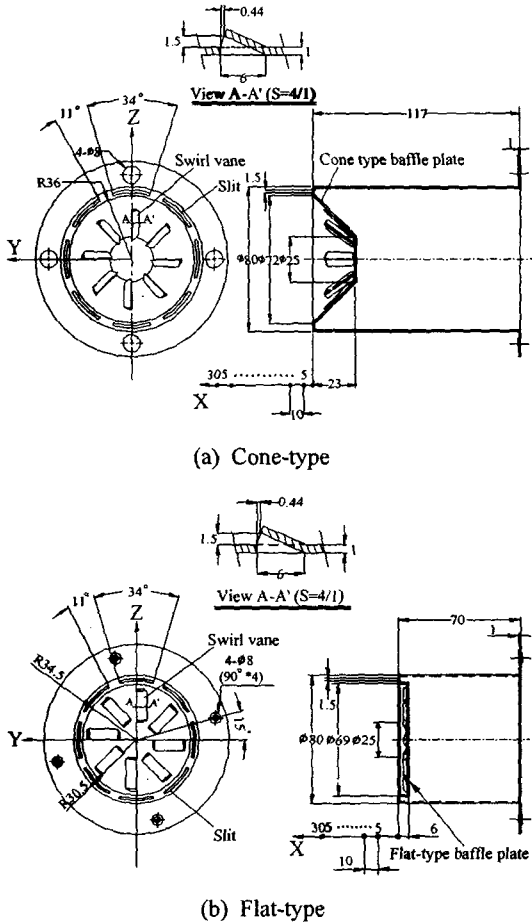


Fig. 1 Configuration of gas burner model

Relation 등⁽⁵⁾은 산업용 가스터빈에서 스윙링, 제순환 및 선회유동의 조합을 포함하는 전형적인 비반응유동(nonreacting flow)을 계산하기 위해서 수치적 연구를 수행하였다. 또 Lee 등⁽⁶⁾은 저 NO_x용 버너의 설계자료 확보를 위해 가정용 건(gun)식 가스버너에 수소를 적용하여 연소실험과 수치해석을 실시한 바 있다.

이외에도 가스버너의 난류에 관한 많은 연구들이 행해지고 있으나 아직까지 기하학적으로 다른 여러 가지 버너 모델에 대한 난류 유동장의 자료는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 중·대형 보일러나 온풍난방기 등에서 자주 사용되는 건식 가스버너를 이용하여 난류 유동장을 분석하였다.

건식 가스버너는 장치가 비교적 간단하며, 통풍관(draft-tube)내에 설치된 가스노즐을 통해 연료

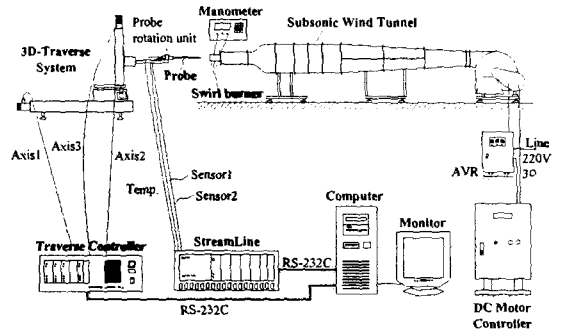


Fig. 2 Schematic diagram including hot-wire anemometer system

가 가압 분사되어 송풍기에 의해 공급된 연소용 공기와 통풍관내에서 일부 혼합된 다음 보음을 위해 버너 선단부에 설치된 배플판(baffle plate)의 스윙베인(swirl vane)과 슬릿 slit)을 빠져나오면서 나머지 혼합이 이루어지는 부분에 혼합연소 및 난류연소방식을 채택하고 있다.

이 건식 가스버너는 가스연료와 연소용 공기와 의 혼합을 극대화하고 유동장의 크기를 제어하기 위해 주로 배플판과 다수의 슬릿으로 구성되어 있다.^(7~11) 특히 이 가스버너는 스윙유동을 통해서 가스연료와 연소용공기의 급속한 혼합을 촉진시켜 화염을 안정화시키고, 화염길이를 짧게 하며, 높은 연소강도를 얻기 위해 배플판상에 다수의 스윙베인을 두고 있다.

일반적으로 건식 가스버너는 배플판의 형상을 콘(cone)형과 플랫(flat)형으로 설계하여 사용되고 있는데, 지금까지는 콘형 배플판을 갖는 가스버너에 대해서만 여러 가지 측면에서 주로 연구되어 왔다.^(7~11) 따라서 본 연구에서는 난방능력 15,000 kcal/hr급의 가스 온풍난방기에 적용할 수 있도록 배플판을 콘형과 플랫형으로 각각 설계 제작한 건식 가스버너를 연구대상으로 하였다. 이 가스버너들은 배플판의 형상만 다를 뿐 다른 모든 기하학적 치수들은 모두 동일하게 설계되었기 때문에, 본 연구에서는 보음을 위해 설계된 배플판의 형상 변화에 따라 건식 가스버너의 난류 유동장이 어떤 특징을 보이는지를 고찰해 보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 배플판이 콘형과 플랫형으로 이루어진 건식 가스버너의 상세 구조를 나타내는 그림이다. Fig. 1(a)와 같이 콘형 배플판을 갖는 가스버너는 버너 외주에 있는 8개의 슬릿부와 직경 25mm에 해당하는 중앙부를 제외하고는 8개의 스월베인이 있는 원통부 선단이 45로 경사져 있다. 슬릿부의 크기는 틈새가 1.5mm이고, 개구부의 원주 각도가 34이며, 11간격으로 원주상에 배치되어 있다. 또 스월베인은 내주반경이 12.5mm이고, 외주반경이 28.9mm이며, 개구부 틈새가 1.5mm를 갖도록 설계되어 있다.^(7~11) 한편 Fig. 1(b)와 같은 플랫형 배플판을 갖는 가스버너는 스월베인부의 개구부에 해당하는 반경 길이가 20mm로 설계된 것을 제외하면 모든 치수들이 콘형 배플판을 갖는 가스버너와 같다.

Fig. 2는 아음속풍동 출구의 시험부에 설치한 가스버너로부터 열선풍속계를 이용하여 3차원 난류유동장을 측정하는 그림이다. 본 연구에서 사용한 아음속풍동은 원심형 송풍기와 3.75 kW인 DC 모터, 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 구성되어 있다.^(7~11) 시험부의 성능은 단면 크기 220 mm(폭)×220mm(높이)×410mm(길이)에서 약 35 m/s의 풍속이 얻어지고, 평균유속 15m/s에서 약 0.02% 미만의 난류강도가 얻어진다. 또 비연소 난류유동장을 측정하기 위해서 사용한 3차원 열선풍속계 시스템(Dantec 90-N10 Streamline)은 크게 정온형 열선풍속계, 속도 및 방향교정기(Dantec 90H01 & 90H02), 3차원 자동이송장치(Dantec 41T50 & 41T75) 그리고 PC로 구성되어 있다. 또 이들 모두 RS-232C에 의해 온라인(on-line)으로 연결하여 활용되며, 속도 교정기에는 유효압력 10kg/cm²까지 발휘되는 공기압축기가 연결되어 있다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 3차원 유속 측정에 X-probe(Dantec, 55R51)를 이용하였다.^(12~14) X-probe를 만족하는 교정속도 및 Yaw 계수들은 먼저 열선풍속계와 온라인으로 연결된 교정기를 통해 속도와 방향에 대한 교정작업(calibration)을 실시한 후 얻을 수 있었다.^(15,16) 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 콘형 배플판의 경우 10m/s, 그리고 플랫형 배플판의 경우 15m/s의 속도로 -40°에서 40까지 10간격으로 각각 실시하였는데, 그 결과 각 채널별 평균 Yaw계수는 전자의 경우 각각 $k_1^2=0.064$, $k_2^2=0.074$ 로 그리고 후자의 경우에는 각각 $k_1^2 = 0.072$, $k_2^2 = 0.099$ 를 얻을 수 있었다. 또 본 연구에서는 두 실험의 경우 한 지점에서 얻어지는 신호들을 처리하기 위해 A/D 변환기의 샘플링 주파수를 채널당 20kHz, 샘플링 수를 채널 당 102,400개, 신호조정기의 저역통과필터(Low-pass filter)를 30kHz로 각각 사용하였다.

아음속풍동의 운전속도는 버너의 원통측면에 설치된 압력 탭(tap)에서 얻어지는 압력 164Pa을 기준으로 설정하였다. 이 압력은 팬테스터(fan tester) 출구에 버너모델들을 설치하고 공기량을 450 l/min로 보냈을 때 버너 압력 탭에서 얻어지는 압력과 같다.

한편 측정위치는 버너 형상이 측대칭을 이루고 있기 때문에 Probe를 X-Y평면(수평면) 내에 이동하면서 X축 방향으로 Probe를 보호하기 위해 버너 선단으로부터 5mm 떨어진 위치부터 시작하여 10 mm씩 305mm까지, 반경인 Y축 방향으로는 원점을 중심으로 -70mm에서 70mm까지 5mm 간격으로 설정하였다. 또 Y-Z평면 내에서는 유동장에서 특별한 모습을 보여주는 X축 방향의 거리에서 반지름(R) 방향으로는 0에서 70mm까지 5 mm 간격으로, 회전각(θ) 방향으로는 0°에서 355°까지 5°간격으로 각각 측정하였다. 여기서 배플판 외측에 방사상으로 형성된 8개의 좁은 슬릿으로부터 분출되는 속도의 크기가 가장 크기 때문에 이 부근에서는 상세한 유속 측정을 위해서 1mm씩 Probe를 이송하여 상세하게 측정하였다. 이때 유동장내의 실내 온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 일정온도로 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해 AVR을 설치하여 일정한 전압을 공급하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균속도 분포

Fig. 3은 X-Y평면 내에서 콘형과 플랫형 배플

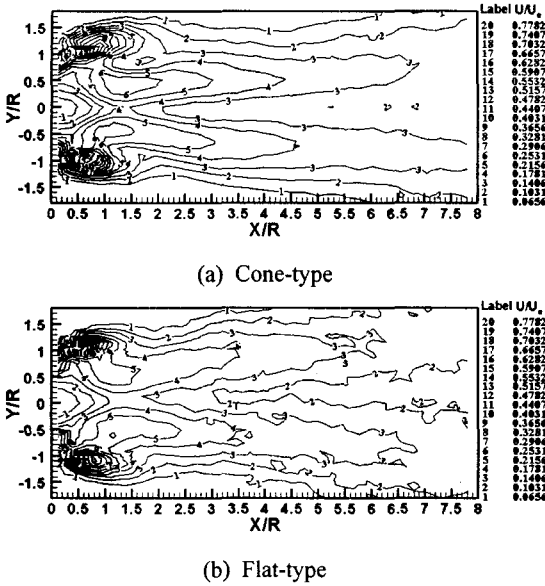


Fig. 3 Axial mean velocity contours in the X-Y plane

판을 갖는 가스버너 모델들의 난류유동장에서 측정한 유동축방향(X방향) 평균속도성분 U 를 버너 출구 속도 U_0 로 무차원화하여 나타낸 그림들이다.

스월베인부의 회전유동을 빠른 슬릿부의 제트 유동이 마치 에어커튼(air-curtain)처럼 에워 쌓아 X축방향으로 안내하기 때문에,^(7~11) Fig. 3(b)와 같이 플랫폼형 배플판을 갖는 가스버너의 평균속도 U 는 콘형 배플판을 갖는 가스버너의 유동 분포와 매우 유사한 분포를 보여주고 있다. 특히 슬릿부를 중심으로 약 $X/R=0.7$ 부근까지 빠른 제트가 형성되고 있다. 따라서 이 제트가 스월베인의 회전유동을 감싸면서 혼합된 유동을 X축방향으로 유도함으로써 약 $X/R=1.5$ 부근까지는 평균속도의 기울기가 비교적 매우 크게 존재한다. 또 반경방향으로 확산하려는 스월베인에 의한 회전유동이 슬릿부와 슬릿부 사이를 일부 빠져나가면서 혼합된 유동은 약 $Y/R = \pm 1.5$ 위치까지 확대된 유동폭을 형성하고 있다.

버너 중심부에서의 평균속도 U 는 콘형의 경우가 플랫폼형보다 더 크게 중심부 쪽으로 밀집되어 발달하며, 하류로 갈수록 약간 더 큰 크기로 분포되어 있다. 이것은 플랫폼형의 경우 스월베인을 빠져나오는 회전유동이 X축방향에 수직인 반경

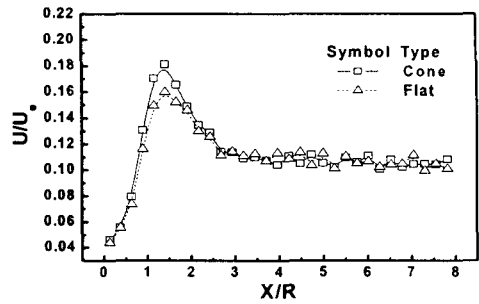
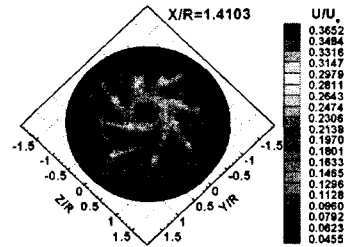
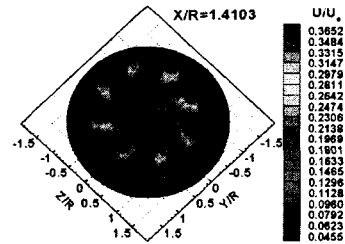


Fig. 4 Axial mean velocity profiles along the centerline in the X-Y plane



(a) Cone-type



(b) Flat-type

Fig. 5 Axial mean velocity contours in the Y-Z plane

방향으로 분출되지만, 콘형은 배플판이 45°로 경사져 있기 때문에 경사면에 위치한 스월베인에 의한 회전유동이 X축 방향으로 더 많이 향하므로 평균속도 U 의 비율이 더 크게 작용하기 때문이다.

특히 Fig. 4는 두 버너모델의 중심선상에서 얻어진 평균속도 U 를 버너 출구속도 U_0 로 무차원화한 분포를 나타낸다. 이것을 통해서도 약 $X/R=1.5$ 에서 콘형 배플판의 경우가 플랫폼형의 경우보다 다소 더 큰 Peak치를 보이고 있고, $X/R=1.0 \sim 2.0$ 에서도 콘형의 경우가 플랫폼형보다 평균속도

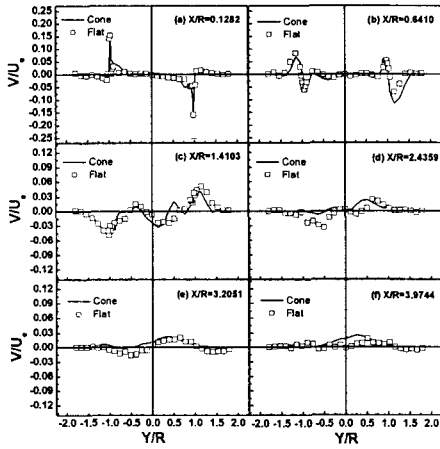


Fig. 6 Radial mean velocity profiles along the radial distance in the X-Y plane

U가 더 크게 분포되어 있어 콘형이 플랫형보다 더 중심부 쪽으로 유동이 밀집되어 발달한다는 것을 알 수 있다. 그밖에는 두 종류의 버너가 비교적 비슷한 크기를 형성하며, 하류영역으로 갈수록 $X/R=1.5$ 까지는 급속히 증가하나 $X/R=1.5$ 이후부터 $X/R=3.0$ 까지는 급속히 감소하다가 그 이후부터 비교적 일정한 크기를 보이고 있다.

Fig. 5는 두 종류의 버너에서 중심선상의 평균속도가 가장 큰 차이를 보여주는 구간 중의 하나인 $X/R=1.4103$ 위치(Fig. 4 참조)의 Y-Z평면 내에서 측정된 X방향 평균속도성분 U를 버너출구 속도 U_c 로 무차원화하여 나타낸 그림들이다. 여기서 두 버너가 보여주는 가장 큰 유동장 특징은 Fig. 5(a)와 같이 콘형의 경우 슬릿부에서 분출된 빠른 유동이 스윙베인의 회전유동에 영향을 받아 플랫형보다 더 길게 늘어져 버너 중심부까지 뻗어 있으며, 시계방향으로 회전되는 모습도 콘형이 플랫형보다 더 뚜렷하게 나타나 있다. 따라서 콘형의 경우가 스윙베인의 회전유동이 플랫형보다 더 강하게 작용하여 하류까지 그 영향이 나타나기 때문에 $X/R=1.4103$ 위치에서 버너 중앙부까지도 콘형이 더 큰 속도크기를 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 콘형과 플랫형 배플판을 갖는 가스버너 모델들에 대한 X-Y평면내의 버너 선단부근을

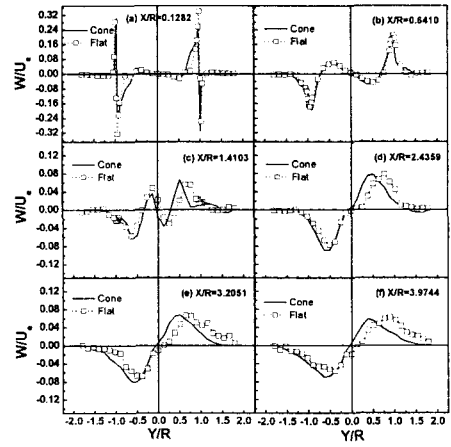
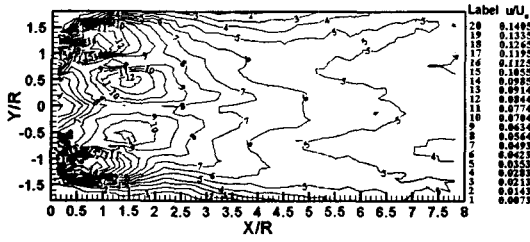


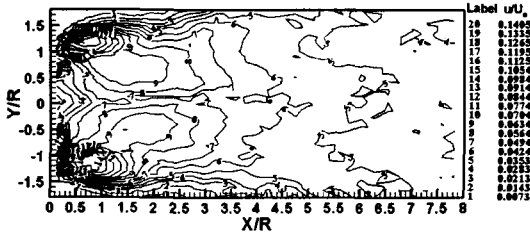
Fig. 7 Circumferential mean velocity profiles along the radial distance in the X-Y plane

포함한 6개의 유동축 위치에서 각각 반경방향(Y)의 거리에 따라 측정된 반경방향 성분의 평균속도(W)를 버너출구의 속도 U_c 로 무차원화한 그림들이다. 반경방향성분의 평균속도는 $X/R=0.1282$ 와 $X/R=0.6410$ 에서 볼 때 두 모델에서 모두 비슷한 크기와 비교적 대칭성 분포를 보여주며, 슬릿부를 중심으로 기울기가 변곡되면서 최대치가 형성되는 경향을 보여주고 있다. 이것은 이 영역에서 슬릿제트가 스윙베인의 회전유동보다 더 지배적으로 발달하기 때문으로 생각된다. 그러나 $X/R=1.4103$ 이후부터는 W의 크기가 크게 줄어들면서 분포되며, 특히 콘형배플판을 갖는 버너모델이 플랫형 모델보다 Y=0인 버너 중심부에서 0이 아닌 값으로 분포되어 좌우 비대칭성 분포를 보여주고 있다. 이것은 $X/R=1.4103$ 이후 Fig. 5에서 알 수 있듯이 콘형 모델이 플랫형 모델보다 스윙베인의 회전유동이 버너 중심부까지 더 크게 영향을 미치므로 버너 중심부의 유동에서 불안정성이 발생하기 때문으로 사료된다.⁽¹⁴⁾

Fig. 7은 두 버너 모델들에 대한 X-Y평면내의 버너 선단부근을 포함한 6개의 유동축 위치에서 반경방향의 거리에 따라 측정된 회전방향 성분의 평균속도(W)를 버너출구의 속도 U_c 로 무차원화한 그림들이다. 두 버너 모델들에 대한 회전방향성분의 평균속도 역시 초기영역인 $X/R=0.1282$ 와 $X/R=0.6410$ 에서는 슬릿부를 중심으로 그 크기가



(a) Cone-type



(b) Flat-type

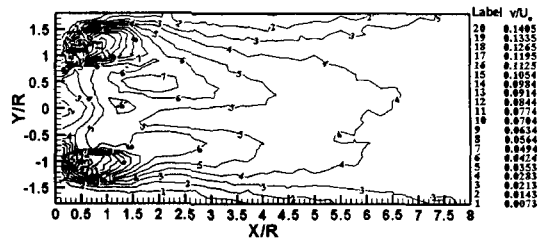
Fig. 8 Axial turbulent intensity contours in the X-Y plane

최대치를 보이며, 속도분포의 기울기는 양, 음을 형성하고, 비교적 축대칭성을 보이며, 비슷한 크기로 분포되어 있다. 그러나 $X/R=1.4103$ 이후부터는 두 모델들의 속도가 일치하지 않으면서 서로 겹쳐지지 않는 분포모습을 보이지만 그 크기 차이는 크지 않다. 특히 $X/R=2.4389$ 부터는 버너 좌,우측면의 속도가 비교적 비슷한 크기로 분포되어 $X/R=3.9744$ 인 하류까지도 비교적 큰 속도분포를 보이고 있다. 따라서 전체적으로 보면 두 모델 모두 회전방향성분의 평균속도 W 가 스월베인의 회전유동에 의해 반경방향성분의 평균속도 V 보다 훨씬 큰 속도분포 크기를 나타내고 있음을 알 수 있다.

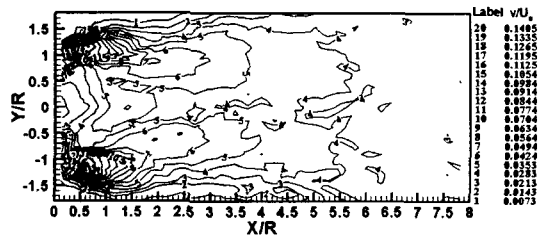
3.2 난류강도 분포

Fig. 8은 두 버너모델에 대해 X-Y평면 내에서 X방향 거리 증가에 따라 축경향 유동축방향 난류속도 성분의 RMS(Root-mean-square)값 u 를 버너출구의 속도 U_0 로 각각 무차원화하여 나타낸 난류강도들의 그림이다.

콘형 및 플랫형 배플판을 갖는 가스버너 모델들에 대한 각 방향 성분의 난류강도 분포는 모두 $Y/R=0$ 에 대하여 비교적 대칭적인 분포를 보여주고 있다. 특히 두 버너모델의 축방향 성분에 대



(a) Cone-type



(b) Flat-type

Fig. 9 Radial turbulent intensity contours in the X-Y plane

한 난류강도는 초기영역임에도 불구하고 $Y/R=1.0$ 영역의 슬릿부근과 스월베인부 바깥쪽을 중심으로 상당히 큰 크기가 $X/R=1.5$ 영역까지 분포되고, 또 $X/R=1.5$ 이후의 하류방향으로 거리가 증가함에 따라 슬릿부근에서 형성된 높은 난류강도가 현저히 감소하면서 버너 중심부 쪽의 난류강도 크기를 증가시키고 있다. 이때 콘형 배플판의 경우가 플랫형의 경우보다 좀 더 크기가 크고, 넓은 영역으로 분포되어 나타나 있는데, 이것은 콘형의 경사진 배플판의 영향을 받은 스월베인의 회전유동과 슬릿부에 의한 빠른 제트유동이 공존하면서 이 영역에서 반경방향에 대한 평균속도의 기울기가 크게 형성되어 효과적으로 난류강도를 증가시키기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 두 버너모델에 대한 반경방향 및 회전방향성분에 대한 난류강도 v/U_0 , w/U_0 분포들을 나타낸다. 반경방향 및 회전방향성분의 난류강도 분포들은 모델 종류에 관계없이 유동축방향 성분에 대한 난류강도분포와 마찬가지로 모두 $X/R<1.5$ 에서는 슬릿부를 중심으로 매우 큰 크기가 형성되어 있지만, 버너 중심부에서는 모두 축방향 성분의 난류강도보다는 다소 작은 크기를 보이고 있다. 반경방향 성분의 난류강도 분포는 플랫형의 경우보다도 콘형의 경우가

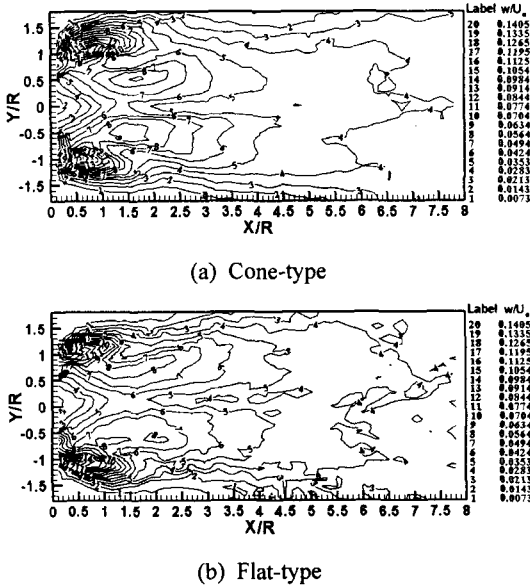


Fig. 10 Circumferential turbulent intensity contours in the X-Y plane

버너 중심부에서 더 비대칭성을 보여주지만, 난류유동장의 확산된 크기분포는 서로 비슷하게 나타나 있다. 또 회전방향 성분의 난류강도 분포는 두 모델 모두 버너 중심부에서 양호한 대칭성을 보여주지만, 콘형의 경우가 플랫형보다 버너 중심부쪽으로 더 밀집되어 다소 더 큰 크기를 보여주고 있다. 그러나 난류유동장의 확산된 크기 분포는 비교적 유사하게 나타나 있다.

전체적으로 동일 유동축방향 위치에서 난류강도의 확산된 크기들을 비교해 볼 때, 유동축방향 난류강도 성분이 가장 크게 분포하며, 다음으로 회전방향 성분, 반경방향 성분들의 순서대로 크기가 크게 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 두 버너모델의 중심선상에서 얻어진 각 방향 성분들의 난류강도 분포들을 나타낸 그림이다. 약 $X/R=1.5$ 부근까지는 두 버너 모델 모두 X 축 방향의 거리가 증가함에 따라 축방향성분의 난류강도가 반경방향 및 회전방향 성분들의 난류강도보다 훨씬 큰 크기와 가파른 기울기로 상승하고, 반경방향 및 회전방향 성분의 난류강도는 비교적 유사한 기울기와 크기를 형성하며 상승하다가 모두 $X/R=1.5$ 부근에서 최고치를 갖는다.

특히 콘형 배플판을 갖는 버너모델의 중심선상

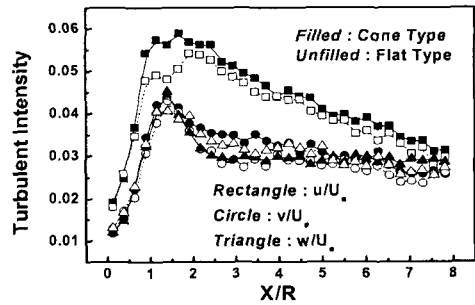
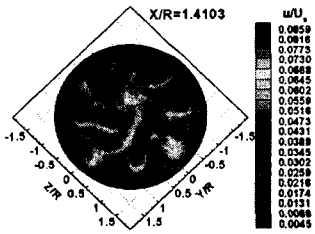


Fig. 11 Turbulent intensity profiles along the centerline in the X-Y plane

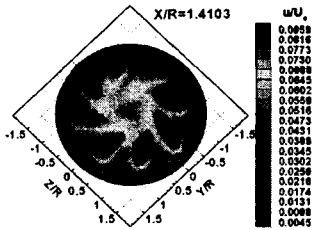
에서 얻어진 축방향성분의 난류강도 분포는 $X/R=1.0\sim 2.0$ 부근에서 플랫형의 경우보다 절대치로는 그 크기가 작으나 다른 반경방향 및 회전방향 성분의 난류강도보다는 더 큰 크기를 가지며 더 큰 차이를 보여주고 있다. 따라서 콘형모델이 중심부 쪽으로 더욱 밀집되어 발달한다는 것을 알 수 있다. 그리고 $X/R=1.5$ 를 벗어난 하류영역부터는 콘형 배플판 버너모델의 축방향 난류강도 성분은 전체적으로 플랫형의 경우보다 매우 작은 크기 우위를 보이면서 서서히 감소하는 분포를 보여주고 있으며, 반경방향 및 회전방향 성분의 난류강도보다 더 큰 크기를 보여준다. 또 $X/R=1.5$ 를 벗어난 하류영역의 $2 < X/R < 5$ 에서는 반경방향 성분의 난류강도와 회전방향 성분의 난류강도는 다소 크기 차이를 보이면서 축방향성분의 난류강도보다는 작은 기울기를 형성하여 매우 완만하게 감소하고 있다. 여기서 반경방향 성분의 난류강도 분포는 콘형의 경우가 플랫형보다 약간 큰 크기 모습을 보이나, 회전방향 성분의 경우는 반대의 현상을 보여주고 있다.

Fig. 12는 두 버너 모델에서 중심선상의 난류강도들이 가장 큰 차이를 보이고 있는 $X/R=1.4103$ 위치(Fig. 11참조)의 Y-Z평면 내에서 유동축방향 변동속도성분의 RMS값 u 를 버너 출구속도 U_0 로 무차원하여 나타낸 난류강도의 그림들이다.

Y-Z평면에서 난류강도 u 는 슬릿부에서 분출된 빠른 제트유동이 스윌베인부의 회전유동에 영향을 받아 콘형 배플판의 경우가 플랫형보다 더 길게 늘어져 버너 중심부까지 뻗어 있으며, 시계방향으로 회전하는 모습도 콘형이 플랫형보다 더 뚜렷하게 나타나 있다. 따라서 콘형의 경우가 스



(a) Cone-type



(b) Flat-type

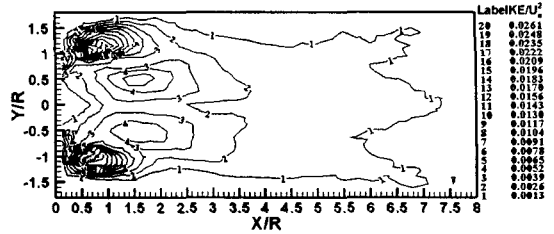
Fig. 12 Turbulent intensity u contours in the Y-Z plane

월베인의 회전유동이 플랫폼보다 더 강하게 작용하여 하류까지 그 영향이 나타나기 때문에 X/R=1.4103위치에서 버너 중앙부까지도 콘형이 더 큰 속도크기를 유지하고 있음을 알 수 있다.

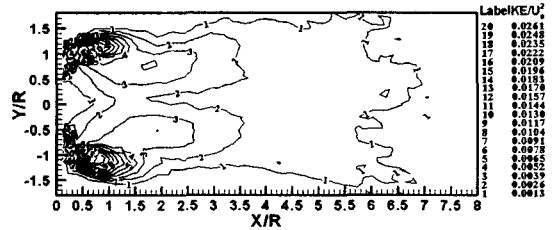
3.3 난류운동에너지 분포

Fig. 13은 X-Y평면 내에서 콘형과 플랫폼 배플판을 갖는 가스버너 모델들의 난류운동장에서 측정된 축방향, 반경방향 및 회전방향 변동속도 성분들의 RMS값 u, v, w 들을 $KE=(u^2+v^2+w^2)/2$ 로 환산한 다음, 이 값을 버너출구 속도 U_c^2 으로 무차원화하여 나타낸 난류운동에너지의 그림들이다.

두 종류의 버너에서 모두 슬릿부를 중심으로 각 방향 성분의 평균속도 기울기가 가장 크게 형성됨으로 인해 각 방향성분의 난류강도가 가장 크게 발생되기 때문에,⁽⁷⁻¹¹⁾ 난류운동에너지 분포도 역시 슬릿부를 중심으로 약 X/R=0.7부근까지 가장 큰 값을 형성하며, 하류방향으로는 약 X/R=1.5부근까지, 그리고 반경방향으로는 약 Y/R=1.5부근까지 기울기가 가장 크게 형성되고 있다. 이것은 X/R=1.5 이내의 영역에서 슬릿부를 중심으로 슬릿부의 빠른 제트와 스월베인에 의한 회전유동이 이 영역에서 급속히 혼합 발달하기 때문이다. 특히 콘형의 경우 배플판의 45°경사각에



(a) Cone-type



(b) Flat-type

Fig. 13 Turbulent kinetic energy contours in the X-Y plane

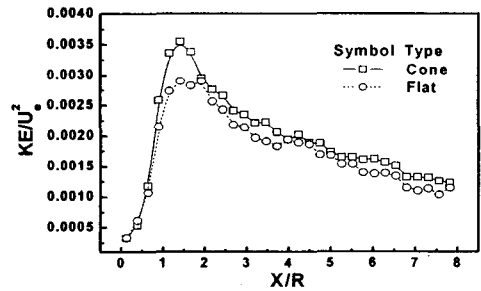


Fig. 14 Turbulent kinetic energy profiles along the centerline in the X-Y plane

의해 플랫폼보다 X/R=1.0~2.5부근에서 버너 중심부로 향하는 난류운동에너지가 더 크게 분포되어 있다. 그러나 그 외의 영역에서는 난류운동에너지의 크기 분포가 비교적 유사하게 나타나 있다.

Fig. 14는 X-Y평면내의 중심선상을 따라 콘형과 플랫폼 배플판을 갖는 두 가스버너 모델들로부터 얻어진 무차원 난류운동에너지의 그림이다.

두 종류의 버너에서 보이는 난류운동에너지의 가장 큰 특징은 약 X/R=1.0~2.0부근에서 콘형의 경우가 플랫폼보다 더 큰 크기분포를 보인다는 것이며, 이것은 경사진 배플판의 영향으로 볼 수

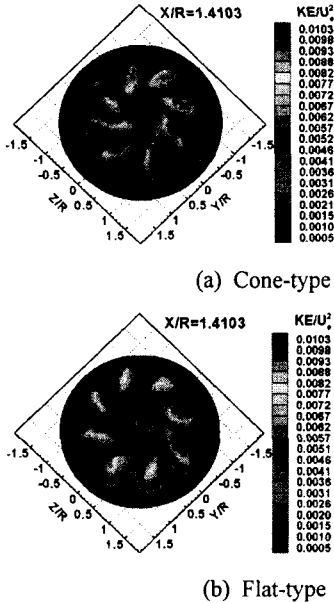


Fig. 15 Turbulent kinetic energy contours in the Y-Z plane

있다. 또한 두 경우 하류영역으로 갈수록 $X/R=1.5$ 까지는 큰 기울기로 상승하나, 약 $X/R=1.5$ 에서 Peak치를 보이고, 그 이후부터는 서서히 감소하는 크기 분포를 보여주는데 플랫폼의 경우가 콘형보다 약간 작은 크기를 보여준다.

Fig. 15는 두 버너모델에 대해 $X/R=1.4103$ 위치 (Fig. 14 참조)의 Y-Z평면 내에서 측정된 각방향 변동속도 성분의 RMS값들로부터 얻어진 무차원 난류운동에너지를 나타낸 그림들이다.

슬릿부를 중심으로 발달한 난류운동에너지는 스윙베인의 회전유동에 영향을 받아 콘형의 경우 시계방향으로 길게 늘어져 동일한 하류영역에서 얻어진 플랫폼보다 더 버너 중심부 쪽으로 크기가 크게 확산되어 분포되며, 슬릿부에서 형성되는 크기도 더 크게 형성됨을 보여주고 있다. 이것은 경사진 배플판의 영향을 받아 콘형이 플랫폼보다 유동을 더 버너 중심부쪽으로 향하게 하여 유동축방향 성분의 평균속도 기울기를 더 크게 형성시키기 때문에 그만큼 더 난류가 크게 발달한 원인으로 본다.

3.4 레이놀즈 전단응력 분포

Fig. 16과 Fig. 17은 각각 두 버너모델에 대해

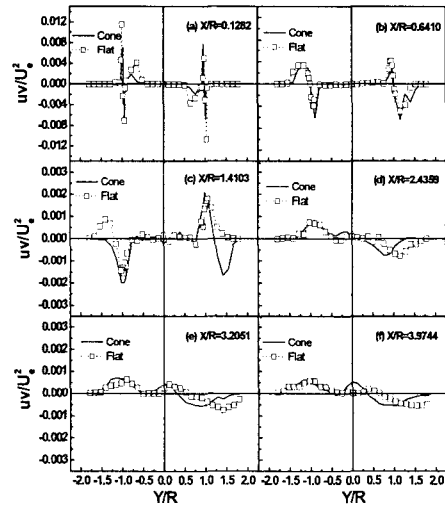


Fig. 16 Reynolds shear stress uv profiles along the radial distance in the X-Y plane

X-Y평면내의 6곳에서 축방향 거리 증가에 따라 측정된 축방향 및 반경방향 성분의 변동속도에 의해 얻어진 레이놀즈 전단응력 uv 와 축방향 및 회전방향 성분의 변동속도에 의한 레이놀즈 전단응력 uw 를 버너출구 속도 U_c^2 으로 무차원화하여 나타낸 그림들이다.

레이놀즈 전단응력 uv 는 버너 선단으로부터 초기영역인 $X/R=0.1282$ 에서는 두 버너 모델 모두 비교적 대칭적인 분포를 보이며, 슬릿부근인 $Y/R = \pm 1.0$ 을 중심으로 부호가 서로 바뀌면서 크기가 약간 다른 Peak치를 나타낸다. 또 스윙베인부에서는 플랫폼이 콘형보다 더 버너 중심부쪽으로 약간 치우쳐 슬릿부에서보다는 작은 크기의 Peak치를 나타낸다. 이 같은 현상은 uw 에서도 비슷한 경향으로 나타나 있다. Kilm 등⁽¹⁷⁾도 레이놀즈 전단응력을 평균속도의 양, 음의 기울기와 연관지어 각각 음, 양의 값을 갖는다고 언급한바 있다. 또 Lilley 등⁽¹⁸⁾은 스윙링유동에 대하여 레이놀즈 전단응력은 비등방성(non-isotropic)이 강하며, 이것은 유동장에 있어서 스윙도(degree of swirl)와 위치의 함수라고 언급한바 있다.

레이놀즈 전단응력 uv 는 $X/R=0.6410$ 의 경우 슬릿부근과 스윙베인부 바깥쪽에서 부호가 서로 바뀌는 Peak치가 양, 음의 값으로 두 개 형성되며, $X/R=1.4103$ 에서는 이것이 반경방향으로 더 확대되는 경향을 보이고 있다. 반면 $X/R=1.4103$ 의 슬

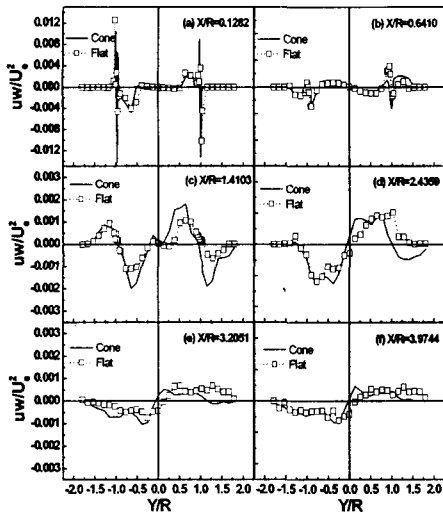


Fig. 17 Reynolds shear stress uw profiles along the radial distance in the X-Y plane

릿부 외측에서 두 모델간 약간의 크기 차이를 보이는 것을 제외하면 두 모델들의 uv 값들은 거의 같은 크기를 보이고 있다. 특히 $X/R=0.1282$ 의 경우 버너 내부영역인 $Y/R=\pm 0.5$ 부근에서 0의 값을 갖는 uv 값은 $X/R=1.4103$ 에서는 $Y/R=\pm 0.75$ 부근까지 존재하고 있다. 그러나 $Y/R=0.6410$ 에서 형성된 레이놀즈 전단응력 uw 는 슬릿부근과 스윙베인부에서 uv 와는 달리 뚜렷한 크기 차이를 보여주지 못하고 그 크기 또한 작다. 그러나 버너 내부영역인 $Y/R=\pm 0.75$ 부근에서는 0이 아닌 값으로 존재하여 $X/R=1.4103$ 이후에서는 더욱 더 큰 기울기를 형성하는 특징을 보이고 있다. 이것은 스윙베인부에 의한 회전유동이 지배적으로 영향을 미치므로 반경방향 성분의 변동속도보다는 회전방향성분의 변동속도가 더 크게 형성되기 때문이다. 또 $X/R=1.4103$ 의 슬릿부근과 스윙베인부에서 형성되는 uw 값은 콘형의 경우가 플랫형보다 다소 크게 얻어지며, 특히 콘형의 경우가 버너 중앙부쪽으로 더 치우쳐 발달하고 있음도 알 수 있다. 이런 현상은 $X/R=2.4389$ 에서 더욱 잘 알 수 있다. 이것은 아마도 콘형의 경우가 플랫형보다 경사진 배플판에 의한 회전유동을 버너 중심부쪽으로 더 치우치게 하여 회전방향 변동속도성분의 영향을 더 증대시킨 요인으로 생각된다. 그 밖의 $X/R=2.4389$ 와 $X/R=3.9744$ 까지의 레이놀즈 전단응력들은 두 모델에서 다소 크기 차이는 보이지 않

큰 차이를 나타내지 않으며, 마치 단일유동으로 변해 가는 전형적인 유동분포를 보여주고 있다. 그러나 uw 값이 uv 보다 더 뚜렷하게 발달하는 분포모습을 보여주고 있다.

4. 결 론

배플판의 형상이 다른 건식 가스버너의 3차원 난류유동장을 열선유속계의 X-probe를 이용하여 X-Y평면 및 Y-Z평면에서 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 건식 가스버너에서 슬릿부의 빠른 체트유동은 배플판의 종류에 관계없이 스윙베인부의 회전유동을 감싸는 에어커튼의 역할을 한다.

(2) 콘형 배플판은 평균속도 U 와 난류강도 및 난류운동에너지를 각각 버너 중심부쪽으로 플랫형보다 더 크게 집중 발달시키며, 그 영향도 $X/R=1.0\sim 2.0$ 부근에서 가장 크게 나타난다. 그러나 그 외의 영역에서는 두 버너 모델 모두 유사한 크기분포를 보여주고 있다.

(3) 콘형 배플판은 $X/R=1.4103$ 의 경우 슬릿부에서 형성된 평균속도 U 와 난류강도 u 및 난류운동에너지를 플랫형보다 더 크고 넓게 형성시킨다.

(4) 콘형 배플판은 $Y/R=\pm 0.75$ 인 버너 중심부에서 레이놀즈 전단응력 uw 를 플랫형보다 더 버너 중심부쪽으로 치우치게 하며, uv 보다 더 강하게 발달시킨다.

참고문헌

- (1) Lefebvre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, pp. 126~135.
- (2) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley & Sons, pp. 102~104.
- (3) Syred, N. and Beer, J. M., 1974, "Combustion in Swirling Flows : A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, pp. 143~201.
- (4) Van der Lans, R. P., Glarborg, P., Damjohansen, K. and Larsen, P. S., 1997, "Residence Time Distributions in a Cold, Confined Swirl Flow," *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, No. 16, pp. 2743~2756.
- (5) Relations, H. L., Battaglioli, J. L. and Ng, W. F., 1998, "Numerical Simulations of Nonreacting

- Flows for Industrial Gas Turbine Combustor Geometries," *Transactions of the ASME(J. of Eng. for Gas Turbines and Power)*, Vol. 120, pp. 460~467.
- (6) Lee, Y. L., Lee, K. B., Sim, K. S., Jun, Y. D. and Ryu, J. E., 2003, "Study of Hydrogen Combustion with a Gun-type Burner," *Transactions of the KSME (Part B)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1579~1586.
- (7) Kim, J. K. and Jeong, K. J., 2001, "The Structure of Three-dimensional Turbulent Flow Fields of a Cone Type Gas Swirl Burner," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 22~29.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Kitoh, O., Nakabayashi, K., Nakagawa, Y. and Kamiya, K., 1990, "Turbulent Characteristics of Swirling Flow in a Circular Straight Pipe," *Transactions of the JSME(Part B)*, Vol. 56, No. 527, pp. 1934~1942
- (13) Champagne, F. H. and Kromat, S., 2000, "Experiments on the Formation of a Recirculation Zone in Swirling Coaxial Jets," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 494~504
- (14) Ahn, Y. H., Han, Y. O. and Kim, D. S., 2002, "Flow Characteristics of Axi-symmetric Swirl Jet in the Initial Regions," *Transactions of the KSME (Part B)*, Vol. 26, No. 4, pp. 531~538.
- (15) Bruun, H. H., 1996, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, pp. 132~163.
- (16) Dantec, 2000, *Streamline User's Reference Manual*, Chapter 8.3 Algorithms.
- (17) 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.
- (18) 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.