大韓機械學會論文集 第12券 第4號, pp. 847~864, 1988.

〈論 文〉

평판 경계층 확산화염에서의 국부적 가속현상에 관한 실험적 연구

심 성 훈* · 하 지 수** · 신 현 동***

(1988년 4월 14일접수)

An Experimental Study on the Local Velocity Acceleration in a Flat Plate Boundary Layer Diffusion Flame

Sung-Hoon Shim, Ji-Soo Ha and Hyun-Dong Shin

Key Words : Local Velocity Acceleration(국부가속), Boundary Layer Diffusion Flame(경계층 확산화염) Velocity Overshoot(속도초과), Separation of Flow(유동박리)

Abstract

The main purpose of this study is to investigate the local velocity acceleration in a boundary layer diffusion flame over a flat plate. In order to know the effect of separation on the local velocity acceleration, two typical cases, flows with and without separation, are considered. For these cases, flow visualization using paraffine smoke tracers has been made. Mean velocity and r.m.s. value of fluctuating velocity are measured by using a laser Doppler velocimeter. In addition, measurements of time-mean concentration and time-mean temperature have been made. Time-mean density profiles have been obtained from the data of concentration and temperature. The obtained results are summarized as follows : (1) In the case without separation, the local velocity acceleration is clearly observed near the visible flame zone for all flow conditions. On the while, in the case with separation, the local velocity acceleration is observed only at low free stream velocity and high fuel injection velocity. As increasing the free stream velocity or decreasing the fuel injection velocity, it is not distinctly observed in the mean velocity profile. (2) The r.m.s. value of fluctuating velocity is significantly decreased by combustion in the case with separation. But in the case without separation, the r.m.s. value is increased near the visible flame zone in comparison with cold flow. In both cases, the peak value of r.m.s. appeared just at the visible flame zone, where the mean velocity gradient is not too high.

1. 서 론

평판 경계층 확산화염에 관한 연구는 1950년대 후반 Emmons Problem[1]을 시초로 들 수 있으며, 1960년대 이후 하이브리드(hybrid) 로켓엔진내의 연소및 고체 또는 액체 연료의 표면연소의 모델로서, 또한 고속 재돌입체(high speed re-entry bodies)의 과열을 방지하기 위한 용발냉각(ablative cooling)에 대한 응용으로 많은 연구가 진행되어 왔다.

* 한국기계연구소
** 한국과학기술원 기계공학과
*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

평판 경계층 확산화염의 특징적인 현상으로서, 화염대 근방에서의 국부적 가속(local velocity acceleration)현상을 들 수 있는데 이에 관해 1973년 Hirano[2,3]는 층류에서 산화마그네슘(MgO)입자의 궤적 촬영을 통해 화염대 근방에서 공기주류방향의 가속이 있음을 보였고, 1982년 Ueda[4]는 레이저 도플러 유속계(laser doppler velocimeter)를 이용한 측정 결과로 부터 난류화염인 경우에도 국부적 가속현상이 나타남을 보였다. 한편 1984년 Andreotti[5]는 액체및 기체연료를 사용하고 입자궤적 촬영법으로 속도를 측정하였는데, 공기주류속도가 증가하면 가속현상이 관찰되지 않는다고 주장했다.

이렇게 현재까지도 이 현상이 나타나는 조건이나 이에 따른 유체역학적 기구에 관하여 여러 연구에서 서로 상이한 설명을 하고 있다. 현재까지의 연구에 사용된 실험장치의 구조를 면밀히 분석하면 크게 두 가지 유형으로 분류할 수 있다. 그 첫째것은 Hirano, Ramachandra[6], Ueda등이 사용한 장치로서, 연료분출부인 다공판이 풍동의 바닥에 놓여 있는 것이다. 이 경우에는 층류와 난류 영역 모두 화염대 근방에서 가속현상이 뚜렷이 나타남을 보여주었다. 둘째 것으로, Nakagawa[7], Andreotti등의 일련의 연구를 들 수 있는데, 이들 연구에 사용된 실험장치에서는 연료분출용 다공판이 검사부의 중앙에 설치되어 있다.

이상에 언급한 관련 연구들은 실험장치의 특수성으로 인한 유동박리와 국부가속 현상의 관계를 전혀 고려하고 있지 않음에 착목하여, 본 연구에서는 연료분출부에 박리가 있는 경우와 없는 경우 각각에 대하여 화염대 근처의 국부가속 현상이 박리에 의하여 어떻게 영향을 받는가를 실험적으로 규명하고, 나아가서 종래에 행해져 왔던 관련 연구 결과를 재검토할려고 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

(1) 풍동 및 부속장치

본 실험에 사용된 풍동은 Fig. 1에서와 같이 송풍식(blowing type)으로서 송풍기(3Hp, turbo fan, 1735 rpm), 확산실(diffuser), 안정실(settling chamber), 수축실(contraction nozzle), 검사부 그리고 완충탱크(surge tank)로 구성되어 있다.

검사부의 공기주류속도를 송풍기의 공기흡입구에서 조절하면 송풍기에 무리한 부하가 걸려서 송풍기를 통과하는 공기의 온도가 변하는 결점이 있기 때문에 송풍기의 공기흡입구에서 흡입된 공기중 일부분을 송풍기의 출구측에서 다시 외부로 방출함으로해서 송풍기에 무리를 주지않고 또한 흡입된 공기의 온도를 일정하게 유지하면서 원하는 공기주류속도로 조절할 수 있게 했다.

송풍기와 확산실 사이의 연결부는 진동전달을 막기 위해 자바라연결로 하였다. 확산실에는 입구쪽에 분산깃(splitter vane)을 달아 바람이 중앙부에 집중되지 않도록 했으며 안정실에는 유속을 균일하게 하고 정류를 위해 4개의 스크린(screen)과 1개의 하니콤(honeycomb)을 설치하였다.

수축실의 곡면은, 안정실로부터 저속으로 흘러들

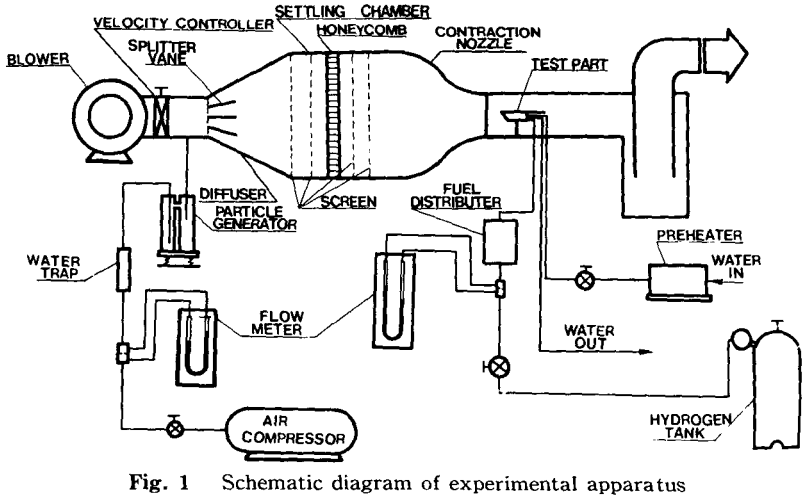


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

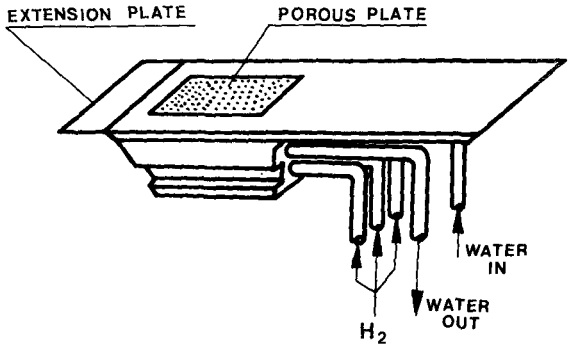


Fig. 2 Schematic diagram of the burner

어오는 유동을 가속시키고 유동박리가 발생하지 않도록 코사인(cosine) 모양으로 제작하였다. 수축실의 출구 면적은 200×200mm이며 수축실 출구 면적에 대한 입구 면적의 비, 즉, 수축비는 9로 하였다.

검사부의 양 옆면은 유동의 가시화와 속도 측정을 위해 상용 석영유리로 되어 있으며 나머지 부분은 아크릴 판으로 구성하였다. 연료공급계는 수소탱크의 압력조절기, 유량계(manometer)그리고 연료분배기로 구성하였다.

(2) 연료분출부

연료분출부(Fig. 2)는 황동으로 만들어진 본체(790×210mm)와 연료분출용 다공판(46×75mm)으로 구성되며 다공판은 본체 선단으로부터 하류측으로 8mm뒤에 설치했다. 또한 연료분출부의 온도를 일정하게 유지하고 수소 연소시에 발생하는 수증기가 표면에 응축되지 않도록 하기 위해 본체 내부에 85℃의 예열수를 순환할 수 있도록 만들었다.

서론에서 언급하였듯이, 연료분출부가 검사부의 밑면에 부착되어 있는 실험장치에 의한 종래의 연구와 검사부의 중앙부에 위치한 연구 결과가 가속현상의 정도에 차이가 보이고 있었다. 본 연구에서는 연료분출부를 검사부 중앙에 설치하고 그리고 상류층으로 연장판을 연료분출부에 부착함으로써 검사부의 밑면에 설치한 연구결과와 같은 효과를 얻도록 했다.

2.2 실험방법 및 실험조건

(1) 유동의 가시화

연료분출부에 연장판을 부착한 경우와 그렇지 않은 경우, 각각의 유동특성을 가시화하기 위해 검사부 입구에 열선(나크롬선 0.3mm)을 설치하고 그 표면에 액체 파라핀을 흘려 가느다란 연기를 발생시켰고, 할로겐등의 빛을 볼록렌즈로 집광시킨 후 슬릿(slit)을 통과시켜 폭 5mm의 평면광을 만들어서 검사부에 비추어 연료분출부 주위로 흘러가는 파라핀 연기를 카메라로 직접 촬영했다.

(2) 평균유속 및 속도변동성분의 r.m.s.값 측정

본 실험에서는 유속과 속도변동성분의 r.m.s.값을 측정하기 위해 레이저 도플러 유속계를 사용하였다.

이에 관한 구성도는 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이, 파장 632.8nm의 15mW He-Ne레이저 발생기, 2중 빔 모드(dual beam mode)로 만들어 주는 빔스플리트(beam splitter), 2개의 집광용 볼록렌즈(F.D. 250mm), 역방향 속도를 검출할 수 있게 하고 저속의 경우에 속도신호와 잡음신호와의 분리를 용이하게 하기 위한 주파수 편이기(frequency shifter), 광전판(photo diode), 신호 처리를 위한 트랙커(tracker), r.m.s.미터(r.m.s. meter), A/D 변환기(converter) 그리고 퍼스널 컴퓨터로 구성되어 있다. 산란입자는 주류속도에 교란을 주지 않도록 송풍기와 확산실 사이의 연결부에 입자 발생기(particle generator)를 연결하여 공급했다. 이때 안정실 내의 스크린이 입자로 인해 막히게 되면 검사부의 공기주류에 맥동이 심해지는데, 이를 방지하기 위해 주기적으로 스크린을 청소해 주어야 한다.

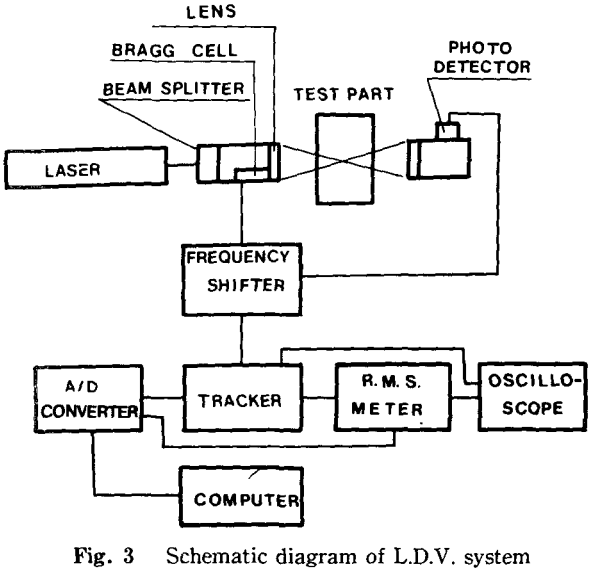


Fig. 3 Schematic diagram of L.D.V. system

광전판에서 검출된 편이 주파수의 신호는 속도로 환산하기 위해 트랙커로 들어간다. 트랙커는 편이 주파수를 순간적으로 속도에 해당하는 전압으로 변환시켜 주고, r.m.s.미터는 트랙커에서 나온, 속도에 해당하는 전압으로부터 속도변동성분의 r.m.s.값으로 변환시킨다. r.m.s.값은 평균시간을 10초로 하였다.

트랙커 및 r.m.s.미터에서 나온 아날로그 신호는 A/D 변환기에서 디지탈 신호로 변환되고 이 값은 컴퓨터에서 시간평균속도와 속도변동성분의 r.m.s 값으로 계산된다. r.m.s값은 트랙커에서 나온 신호를 직접 A/D변환시켜 계산할 수도 있으나, 이렇게 할 경우, A/D변환된 많은 데이타로부터 계산해야 정확한 값을 얻을 수 있으므로 r.m.s.미터를 이용할 때보다 실험시간이 길어지는 결점이 있고, r.m.s.미터에서 나온 신호를 A/D변환하여 평균한 값과 트랙커에서 나온 신호로 부터 직접 계산한 값을 비교한 결과 거의 정확히 일치 했기 때문에 r.m.s.미터를 사용하여 r.m.s.값을 구했다.

(3) 농도 및 온도 측정

농도측정 장치는 Fig. 4와 같이 구성되어 있다. 샘플링 프루브(sampling probe)는 화염의 왜곡을 줄이기 위해 화염면에 직각으로 설치하여 실험했다. 샘플링 프로부에 수집된 시료는 일차로 냉각관을 통과시켜 수분을 응축시키고 다시 유리 섬유(glass wool)와 건조제(silica gel)가 들어있는 관을 통과시켜 나머지 수분을 제거한다.

이 시료는 가스크로마토그래프(gas chromatograph)에서 건가스 농도(dry-basis concentration)로 분석된다. 수분이 제거된 H_2, N_2, O_2의 무기 가스들은 운반 가스(carriergas)로 사용되는 헬륨(He)과의 열전도도 차이를 검출하는 T.C.D(thermal conductivity detector)를 사용하여 분석된다. T.C.D.에서 헬륨(열 전도도 ; 36.9)을 운반가스로

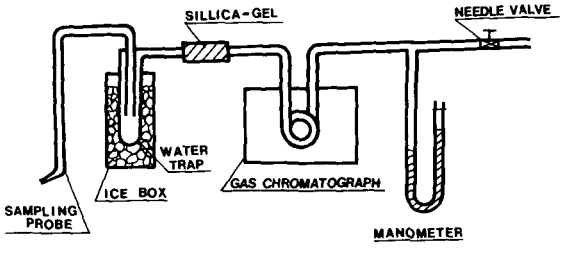


Fig. 4 Gas sampling flow system

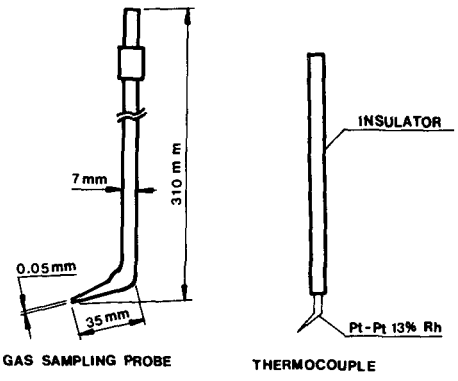


Fig. 5 Gas sampling probe & thermocuple

사용하면, 질소(열전도도 ; 6.4)나 산소(열전도도 ; 6.6)는 헬륨보다 열 전도도가 작고 그 차이도 크기 때문에 감도가 매우 좋고 같은 방향의 뚜렷한 피크(peak)를 나타내지만 수소(열전도도 ; 45.9)는 열전도도가 크고 그 차이도 작아 반대 방향의 피크를 보이며 그 감도도 떨어진다.

3~6%이하의 수소 농도에서는 다른 성분과 같은 방향의 피크를 보이고 정확한 농도를 직접 측정할 수 있었으나 이 이상에서는 질소와 산소의 농도로부터 역으로 산출하였는데 6%이하에서 이 두가지 방법으로 계산된 값을 비교한 결과 오차 1%이내로 거의 일치하였다.

농도를 측정한 위치에서 *R*-type 열전대 온도계를 사용, 시간평균온도를 측정했다. 열전대는 0.1 mm *Pt-Pt* 13% *Rh*를 사용했으며 전도에 의한 영향을 최대한 줄이기 위해 Fig. 5와 같은 형태로 제작했다. 복사, 전도 그리고 촉매작용에 의한 오차는 보정하지 않았다.

(4) 실험조건

Fig. 6(a)는 연장판이 있는 경우의 유동장에 관한 개요도이고, (b)는 연장판이 없는 경우의 유동장에 관한 것이다. 연료분출용 다공판의 시작점을 좌표축의 원점으로 하고 공기주류 방향을 X축, 이에 수직인 방향을 Y축으로 하였다.

평균속도와 r.m.s.값의 분포에 관한 측정시 유동조건은 공기주류속도(U_∞)를 0.82와 1.5m/sec인 경우를 택했고 연료분출속도(V_w)는 0,1.70그리고 2.48cm/sec를 택했다. 또한 연료분출속돌 1.70과 2.48cm/sec인 경우는 연소반응이 있는 경우와 없는 경우로 나누어서 실험했다. 이 때 검사부 높이(200mm)를 특성길이로 하면 공기주류속도, 0.82

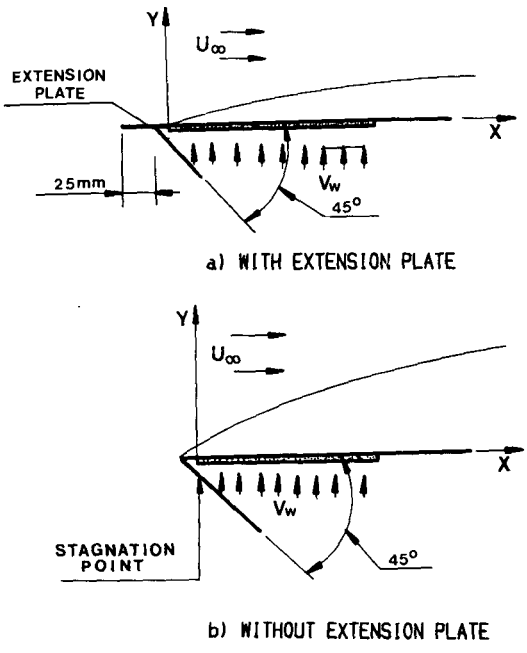
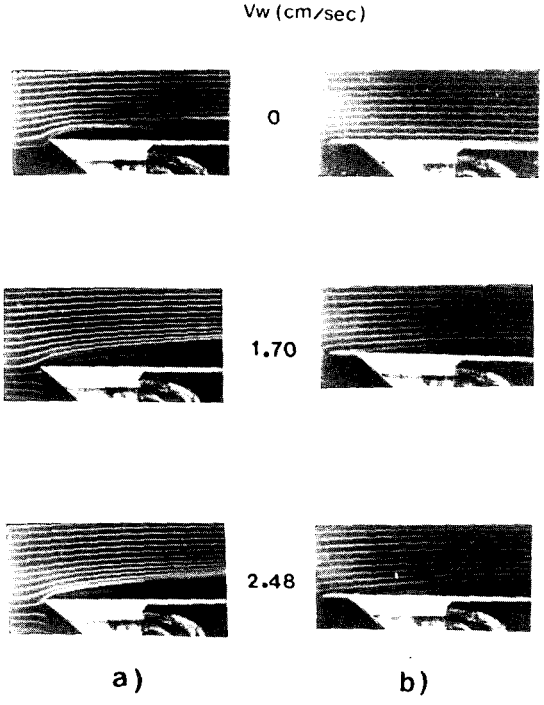


Fig. 6 Schematic diagram of flow fields with & without extension plate



(a) In case without extension plate
(b) In case with extension plate

Fig. 7 Photographs of flow visualization(U_∞=1.5 m/sec)

m/sec와 1.5m/sec에 대한 Reynolds 수는 각각 11081과 20270이 된다.

측정 위치는 X=-8, 0, 10, 20, 30 그리고 40 mm의 각 X단면에서 Y방향으로 1mm에서 20mm 위치까지 1mm간격으로 하였다.

시간평균농도 분포와 시간평균온도 분포에 관한 측정시 유동조건은 위의 유동조건중에서 공기주류 속도 1.5m/sec, 연료분출속도 2.48cm/sec인 경우에만 실험했으며 또한 X=30mm단면에서 Y방향으로 1mm에서 15mm위치까지만 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가시화 결과

Fig. 7(a)는 연장판이 없는 경우의 가시화 사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 V_w가 0cm/sec인 경우, 평판의 선단 아래측 약 10mm에 정체점이 있고 선단부에서 유동박리가 생김을 알 수 있다. 또한 선단부의 재순환 영역 바로 윗쪽에서 유선이 밀집되어 X방향의 속도 증가를 예상할 수 있다. 화염이 있는 V_w=1.70과 2.48cm/sec인 경우에도 마찬가지로 선단에서 유동박리가 발생하며 유동박리로 인해 선단 부근에서 재순환 영역이 형성되어 화염은 선단에서 시작된다.

Fig. 7(b)는 선단에 연장판을 부착한 경우의 가시화 사진인데 연장판이 없을 때 선단에서 유동박리가 일어나는 현상이 이 경우에는 사라지고 화염이 있는 경우, 화염대의 높이는 상대적으로 낮은 위치에 존재함을 알 수 있다.

3.2 평균속도 및 속도변동성분의 r.m.s.값 측정 결과

(1) 연료 분출이 평균속도 및 r.m.s.값의 분포에 미치는 영향

Fig. 8은 연장판이 있을 때, U_∞=1.50m/sec 그리고 V_w=0cm/sec인 경우의 X방향 평균속도(U) 및 X방향 속도변동성분의 r.m.s.값(u')의 분포를 나타낸 것이다. X방향 평균속도 분포에서 알 수 있는 바와 같이, X=-8mm에서 X=40mm로 위치가 변할 때 경계층 두께는 3.0mm에서 4.7mm로

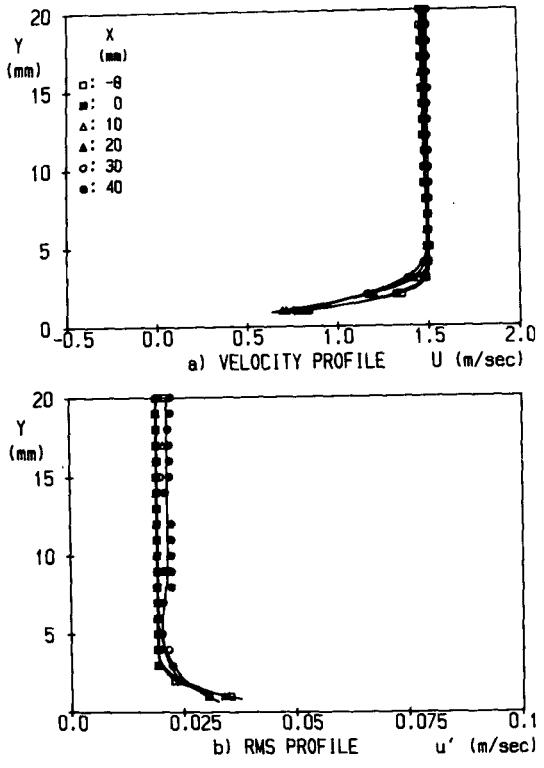


Fig. 8 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with extension plate(U_∞=1.5m/sec, V_w=0cm/sec)

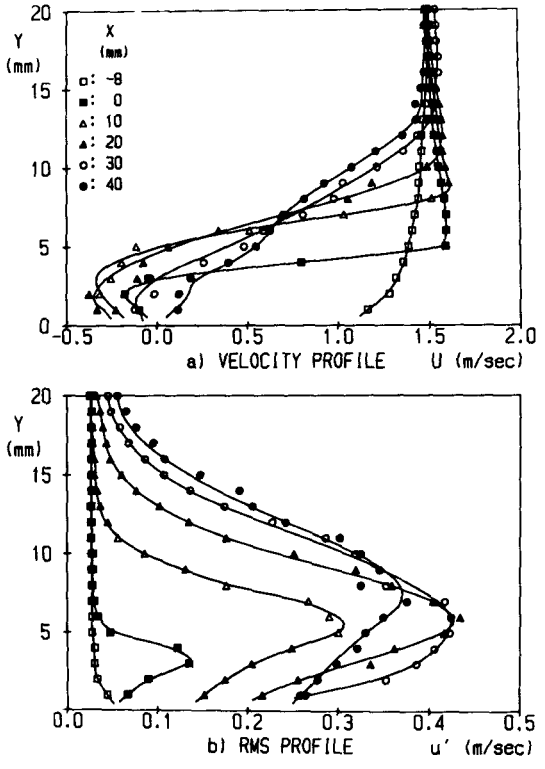


Fig. 9 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case without extension plate(U_∞=1.5m/sec, V_w=0cm/sec)

변하는데, Blasius방정식으로부터 구한 경계층 두께에 관한 이론치가 2.63mm에서 4.50mm 임으로 보아 평균속도 분포에서 실험에 의한 결과와 이론에 의한 결과가 대체로 잘 일치함을 알 수 있다. 벽면 근처(Y=1mm)에서 후류측으로 갈수록 경계층 두께가 증가하면서 Y방향으로의 평균속도 구배가 감소하므로 X=-8mm에서 X=40mm로 위치가 변할 때, r.m.s.값은 0.039m/sec에서 0.030m/sec로 감소하고 벽면에서 떨어진 곳(Y>2mm)보다 벽면 근처(Y=1-2mm)에서 전반적으로 r.m.s.값이 크다. 이러한 r.m.s.값의 분포에 관한 결과로부터 벽면 근처의 난류생성은 속도전단에 의한 것임을 알 수 있다. 한편, X의 모든 단면에서 벽면에서 떨어진 곳(Y>2mm)의 r.m.s.값은 약 0.02 m/sec로 주류 속도의 1.4%정도이다. 이것은 송풍기로 흡입된 공기가 풍동의 확산실, 안정실 그리고 수축실을 지나 검사부로 흘러나올 때 이미 발생된 작은 와류(eddy)에 의한 값이다.

Fig. 9는 Fig. 8과 유량조건이 같으며 연장판이 없는 경우에 평균속도 및 r.m.s.값의 분포를 나타낸 것이다. 우선 평균속도의 분포를 보면 X=0, 10, 20그리고 30mm에서 유동박리로 인해 역방향 속도가 나타나고 X=40mm 정도에서 역방향 속도가 사라짐을 알 수 있다. 그리고 선단부의 재순환 영역 바로 윗측에서 유선이 밀집되었던 가시화 결과〔Fig. 7 (a)〕에서 예견했듯이 X=0mm에서 Y=4~7mm위치, X=10mm에서 Y=9~10mm위치 그리고 X=20mm에서 Y=11~13mm위치에서 공기주류속도보다 평균속도가 크게 나타난다. 연장판이 있는 경우(Fig. 8)는 벽면 근처에서 속도전단 영역이 형성되어 이곳의 r.m.s.값이 다른 Y위치보다 크게 나타났지만 연장판이 없는 경우(Fig. 9)는 유동박리로 인해 형성된 재순환 영역과 그 위측의 주류 영역을 구분하는 분리유선(dividing streamline) 부근에서 벽면 근처의 속도전단 영역과 다른 새로운 속도전단 영역이 형성되는데 이 영역에서의

r.m.s.값은 다른 Y위치보다 크다. 연장판의 유무에 따라 r.m.s.값 최대치의 위치에 차이가 있는 것뿐만 아니라 그 크기에도 큰 차이가 있다. 즉, 연장판이 있는 경우에 $X=40$mm에서 r.m.s.값의 최대치가 0.03m/sec 이었지만 연장판이 없는 경우 $X=40$mm에서 그 값이 0.43m/sec(주류속도의 28.7%)이다. 이렇게 크게 차이가 나는 이유는 유동박리가 있으면 유동박리가 시작되는 연료분출부 선단에서부터 유동박리가 없는 경우보다 더 큰 와류가 발생하고 이러한 큰 와류의 요동에 의해 r.m.s.값이 크게 나타난다고 사료된다.

Fig. 10은 연장판이 없는 경우에 $U_\infty=1.5$m/sec, $V_w=1.70$cm/sec, 즉 Fig. 8과 공기주류조건은 같으나 수소분출이 있으며 그리고 연소 반응이 없을 때의 X방향의 몇 가지 단면에서 평균유속 및 r.m.s.값의 Y방향 분포를 나타낸 것이다. 연료분출의 영향을 받지 않는 $X=-8$mm 단면의 경계층 두께는 3.0mm로서 연료분출이 없는 경우의 경계층 두께와 거의 같으나 연료분출의 영향을 받는 하류측, 예를 들어 $X=40$mm 단면의 경계층 두께는 5.1 mm로서 연료분출이 없는 경우보다 경계층 두께가 0.4mm만큼 증가했음을 알 수 있다. 한편, 속도변동성분의 r.m.s값 분포를 보면, 값의 크기는 연료분출이 없는 경우(Fig. 8)와 전반적으로 대동소이하나 벽면 근처($Y=1$mm)에서는 하류로 갈수록 연료분출이 없는 경우보다 다소 감소하는데 이는 연료분출로 말미암아 하류로 갈수록 연료분출이 없는 경우보다 경계층 두께가 증가하면서 평균속도구배가 감소하기 때문이다.

Fig. 11은 연장판이 없고 유동조건은 Fig. 10과 같은 비연소상태의 유동에 대한 측정 결과이다. 이 경우에는 연료분출로 인한 뚜렷한 변화를 지적하기 어렵다.

지금까지 Fig. 8, 9, 10 그리고 Fig. 11에서 주류속도를 1.5m/sec로 하고 연장판 유무와 연료분출 유무에 따라 X방향 평균속도 분포 및 r.m.s.값 분

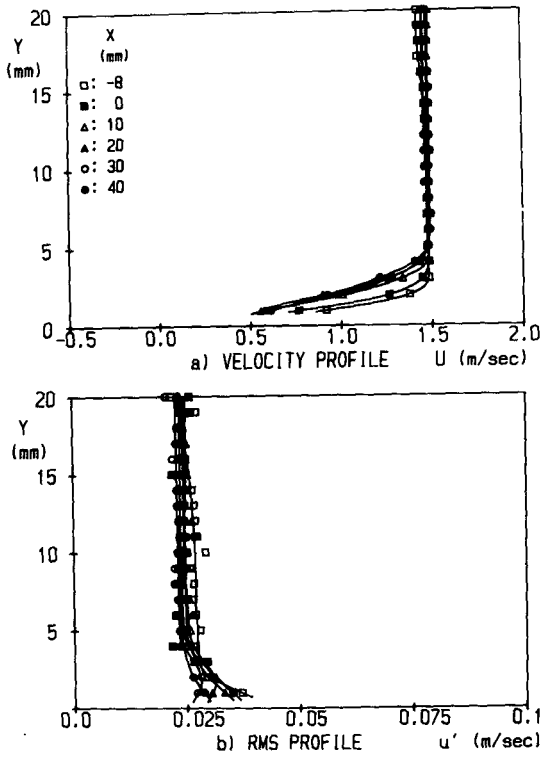


Fig. 10 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with extension plate and without flame($U_\infty=1.5$m/sec, $V_w=0$cm/sec)

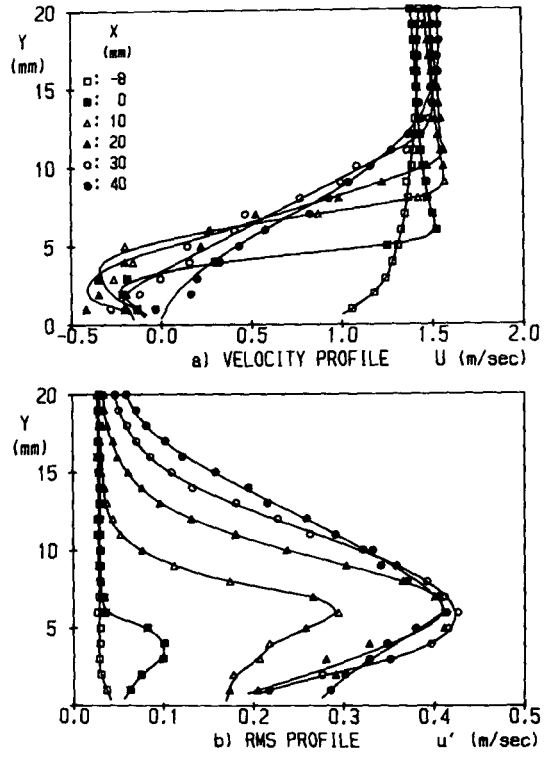


Fig. 11 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case without extension plate and without flame($U_\infty=1.5$m/sec, $V_w=0$cm/sec)

포를 비교하였다. 다음은 공기 주류속도를 0.82m/sec로 하고 연장판 유무와 연료분출 유무에 따라 그 분포들이 어떻게 변하는가를 살펴보기로 한다.

Fig. 12는 연장판이 있을 때, 공기주류속도를 0.82m/sec로 하고 수소분출이 없을 때의 X방향 평균속도와 X방향 속도변동성분의 r.m.s.값 분포를 나타낸 것이다. 경계층 두께는 X=-8mm에서 40mm로 위치가 변할 때, 3.5mm에서 6.0mm로 증가하는데, Blasius 방정식으로부터 구한 경계층 두께에 관한 이론치가 각각 3.56mm와 6.08mm인 것으로 보아 실험에 의한 결과와 이론에 의한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. X방향 속도변동성분의 r.m.s값 분포는, 공기주류속도를 1.5m/sec로 했을 때의 결과(Fig. 8)에서는 벽면 근처(Y=1mm)에서 r.m.s.값이 다른 Y위치보다 뚜렷이 크게 나타났지만 공기주류속도를 0.82m/sec로 했을 때의 결과(Fig. 12)에서는 벽면 근처(Y=1mm)에서 다른 Y위치보다 그 값이 크게 나타나는 것이 뚜렷하지 않다. 이러한 이유는 공기주류속도가 1.5m/sec일 경우보다 0.82m/sec일 경우에 벽면 근처에서 평균속도 구배가 작기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 13은 Fig. 9의 유동조건에서 공기주류속도를 0.82m/sec로 변경했을 때의 결과이다. 즉 연장판이 없는 경우, U_∞=0.82m/sec, V_w=1.70cm/sec인 유동조건에서 X방향 평균속도분포와 r.m.s.값 분포를 나타낸 것이다. 평균속도 분포를 보면, 공기주류속도가 1.5m/sec일 때인 Fig.9의 결과에서와 마찬가지로 X=0, 10, 20그리고 30mm에서 역방향 속도가 나타나며 X=40mm에서 역방향 속도가 사라지고, 또한 X=0, 10, 20 그리고 30mm에서 재순환 영역 윗측에 공기주류속도보다 평균속도가 크게 나타나는 곳이 존재한다. 공기주류속도가 0.82m/sec인 경우에 분리유선 부근의 새로운 속도 전단영역에서 평균속도구배가, 공기주류속도가 1.5m/sec인 경우의 평균속도구배보다 작게 나타나며 이러한 이유로 이 영역에서 공기주류속도가 1.5m/

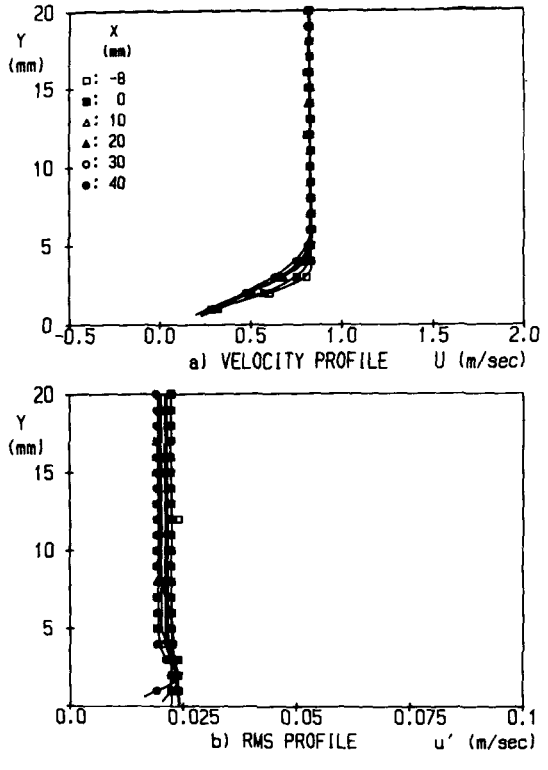


Fig. 12 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with extension plate(U_∞=0.82m/sec, V_w=0cm/sec)

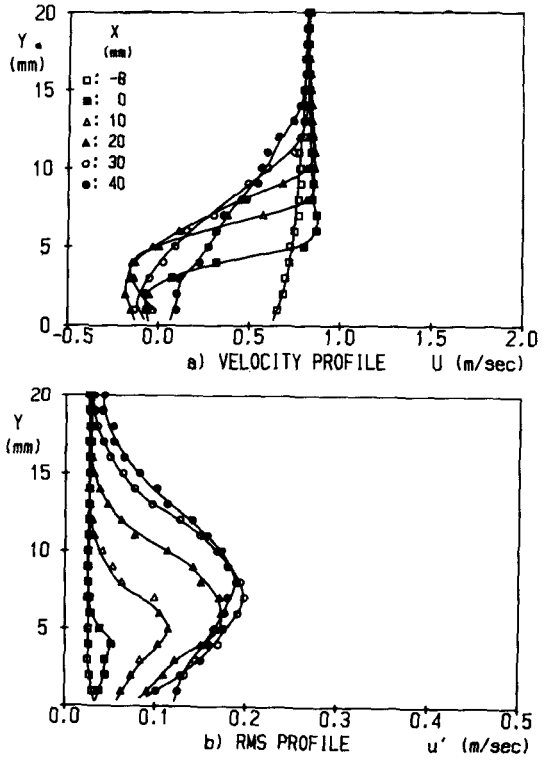


Fig. 13 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of vellocity fluctuation in case without extension plate(U_∞=0.82m/sec, V_w=0cm/sec)

sec일 때보다 0.82m/sec일 때의 r.m.s.값이 작게 나타난다. 예를 들면, $X=40$mm 단면에서 r.m.s. 값 최대치가 $U_\infty=1.5$m/sec일때 0.43m/sec이지만 $U=0.82$m/sec일 때는 그 값이 0.2m/sec로 감소한다.

Fig. 14는 연장판이 있는 경우, $U_\infty=1.5$m/sec, $V_w=1.70$cm/sec 일때의 결과인 Fig. 10의 유동조건에서 공기주류속도만 0.82m/sec로 변경했을 경우의 X방향 평균속도 분포와 r.m.s.값의 분포를 나타낸 것이다. 평균속도 분포에서 경계층 두께를 살펴보면 $X=40$mm 단면에서 그 값이 7.0mm인데 공기주류속도가 같고 연료분출이 없는 경우인 Fig. 12의 결과보다 연료분출에 의해 1mm 정도 경계층 두께가 증가했음을 알 수 있다. 공기주류속도가 1.5m/sec인 경우(Fig. 10)에서와 마찬가지로 공기주류속도가 0.82m/sec인 경우에도 연료분출로 말미암아 벽면 근처에서 평균속도구배가 연료분출이 없는 경우(Fig. 12)보다 감소하기 때문에 r.m.s.값이 벽면 근처에서 감소했다.

Fig. 15는 연장판이 없을 때 Fig. 14와 같은 유동조건, 즉 $U_\infty=0.82$m/sec, $V_w=1.70$cm/sec인 경우에 X방향 평균 속도분포와 r.m.s.값의 분포를 나타낸 것이다. 연료분출이 없는 경우의 결과(Fig. 13)과 비교한 결과, 연료분출에 의해 평균속도 분포와 r.m.s.값의 뚜렷한 차이점을 지적할 수 없음을 알 수 있다.

이상에서 연료분출이 X방향 평균속도 분포 및 X방향 속도변동성분의 r.m.s.값 분포에 미치는 영향을 고찰한 바, 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 즉, 연장판이 부착되어 유동박리가 일어나지 않는 경우에는 연료분출로 말미암아 연료분출이 없는 경우에 비해 경계층 두께가 증가하고, 벽면 근처에서 속도구배가 감소하기 때문에 벽면 근처의 r.m.s.값이 감소하였다. 한편 연장판이 부착되지 않아서 유동박리가 일어나는 경우에는 유동박리로 인해 $X=30$mm 정도까지 역방향 속도가 나타나고

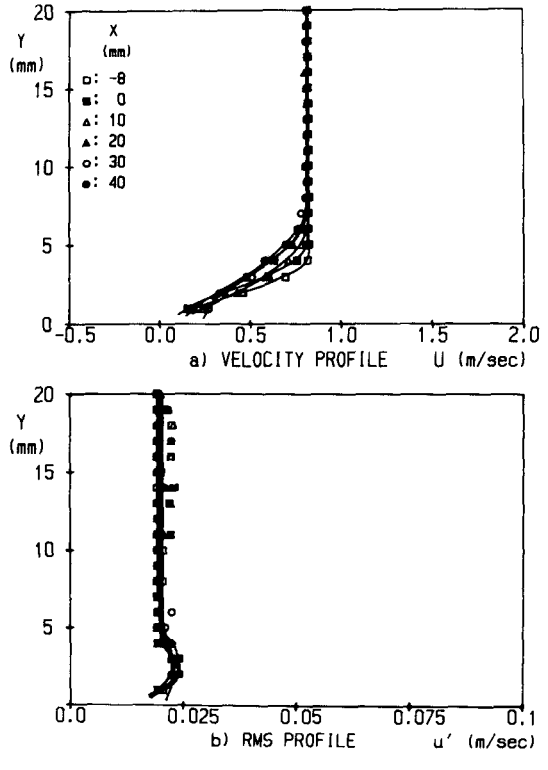


Fig. 14 Profiles of mean velocity & r.m.s. valfue of velocity fluctuation in case with extension plate and without flame ($U_\infty=0.82$m/sec, $V_w=0$cm/sec)

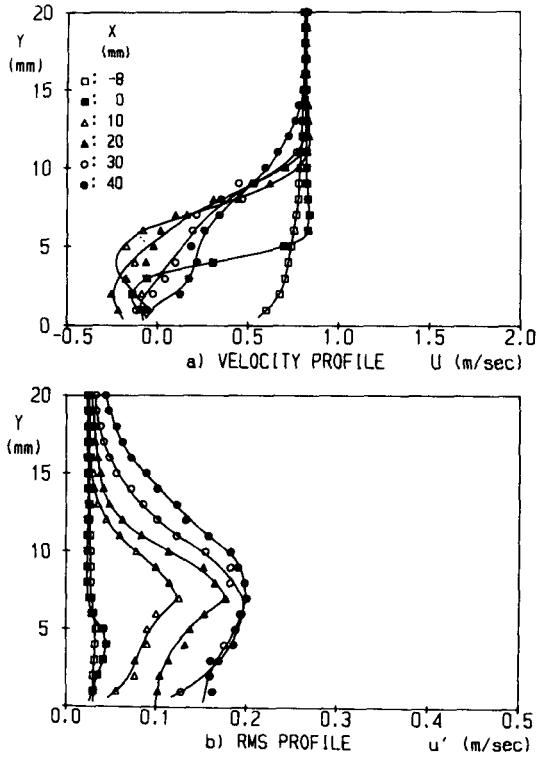


Fig. 15 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case without extension plate and without flame ($U_\infty=1.5$m/sec, $V_w=1.70$cm/sec)

X=40mm에서 역방향 속도가 사라졌으며, 그리고 재순환 영역과 주류 영역이 만나는 분리유선 부근에서 r.m.s.값은 최대가되며 이 값은 유동박리가 없는 경우보다 훨씬 큰 값이었다. 그러나 연료분출로 인한 유동장의 변화는 유동박리가 있는 경우에는 뚜렷하게 지적할 수 없었다.

(2) 연소반응이 평균속도및 r.m.s.값의 분포에 미치는 영향

Fig. 16, 17, 18그리고 Fig. 20은 각각 X=0, 10, 30 그리고 40mm에서 공기주류속도 U_∞=1.5 m/sec일때 연료를 V_w=1.70cm/sec와 2.48cm/sec로 분출하여 연소반응이 있는 경우의 평균속도 및 r.m.s.값의 분포를 연장판이 있는 경우와 연장판이 없는 경우를 함께 나타낸 그림이다. 먼저 X=0 mm(Fig. 16)에서의 X방향의 평균속도 분포를 보면, 연장판이 부착된 경우, V_w=1.70cm/sec로 연료를 분출하여 연소반응이 있는 경우의 평균속도 분포와 비연소반응의 결과인 Fig. 10에서의 평균속도 분포를 비교하면, 경계층 두께가 연소반응에 의해 약 1mm정도 증가한 것을 알 수 있다. 연장판이 부착되지 않은 경우에 연소반응이 있을 때는 벽면 근처로 산화마그네슘(MgO) 입자가 침투하지 못하여 Y=1-3mm에서의 측정 결과가 없지만 Y=4mm이상의 평균속도 분포 결과로부터, 같은 유동조건에서 비연소반응의 결과인 Fig. 11과 비교하면 뚜렷한 차이점이 없음을 알 수 있다. X방향 속도변동성분의 r.m.s.값의 분포를 보면, 연장판이 있을 때 비연소반응인 경우의 결과인 Fig. 10에서의 r.m.s.값 분포에서는 벽면 근처(Y=1mm)에서 평균속도구배에 의한 속도전단으로 말미암아 그 값이 다른 곳(Y>1mm)보다 크게 나타났지만 연소반응이 있는 Fig. 16의 결과중 연장판이 있는 경우를 보면 벽면 근처(Y=1mm)보다도 벽면에서 약간 떨어진 곳(Y=2mm)에서 r.m.s.값의 최대치가 나타난다. 연소반응이 있을 때, 연장판이 없는 경우의 r.m.s.값 분포를 보면 연료분출량에 관계없이 최

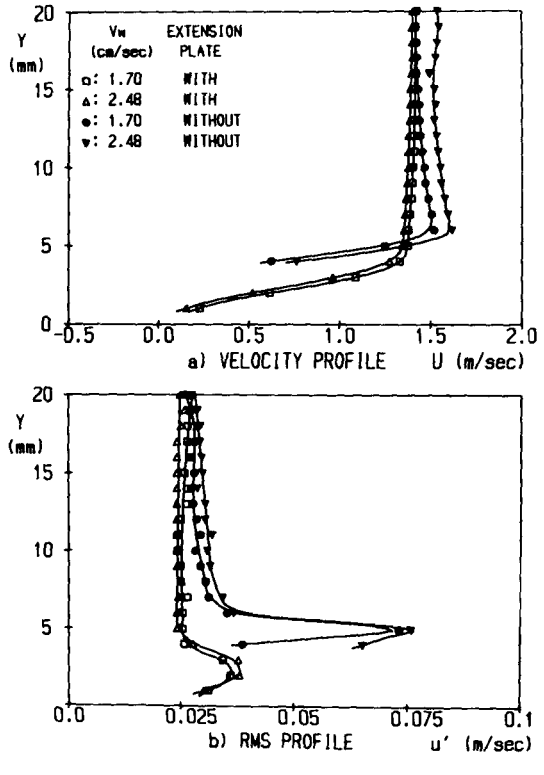


Fig. 16 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame(U_∞= 1.5m/sec, X=0mm)

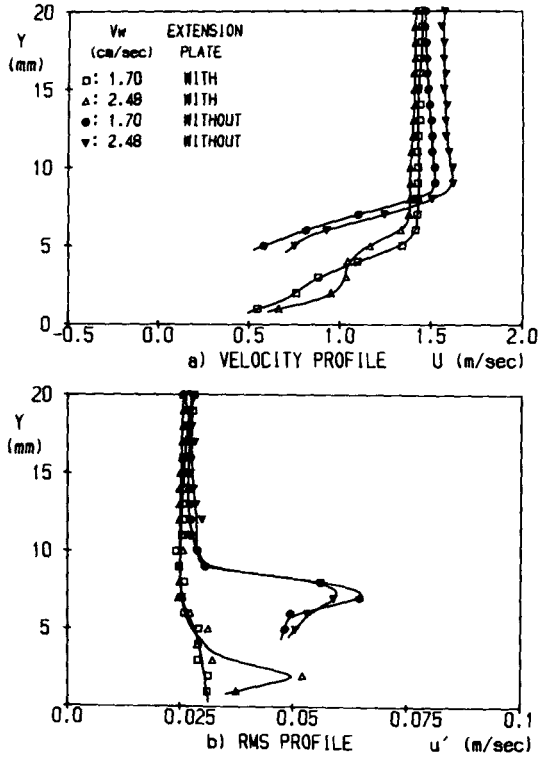


Fig. 17 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuatidon in case with flame(U_∞ =1.5m/sec, X=10mm)

대치가 $Y=5$mm에 위치한다. 비연소반응일 때의 결과인 Fig. 11에서의 r.m.s.값 분포에서는 그 최대치가 0.1m/sec였는데 연소반응이 있는 경우에는 그 값이 0.075m/sec이므로 연소반응에 의해 r.m.s. 값이 약간 감소했음을 알 수 있다.

Fig. 17은 Fig. 16과 같은 유동조건, 즉 $U_\infty=1.5$ m/sec일 때 연소반응이 있는 경우에 $X=10$mm 단면에서의 X방향 평균속도 분포와 r.m.s.값 분포를 나타낸 것이다. 연장판이 없는 경우에는 평균속도분포에서 연소반응이 없을 때(Fig. 11)와 별다른 차이점이 없으나, 연장판이 있는 경우에는, $V_w=1.70$cm/sec일 때 $Y=2$mm 부근에서 평균속도 분포가 약간 왜곡되는 것이 보이고 연료분출속도를 증가하여 $V_w=2.48$cm/sec일 때는 평균속도가 $Y=3$mm 부근에서 화염에 의해 $V_w=1.70$cm/sec일 때보다 더 현저히 가속되는 현상을 관찰할 수 있다. 연장판이 있을 때의 r.m.s.값 분포를 보면 $V_w=1.70$cm/sec일 때는, 연소반응이 있는 같은 유동조건의 $X=0$mm에서의 결과(Fig. 16)에서 관찰된, 벽면에서조금 떨어진 곳($Y=2$mm)에서 r.m.s.값의 최대가 나타나는 현상이 보이지 않으나 $V_w=2.48$ cm/sec일 때는 r.m.s.값 최대치가 화염대 부근($Y=2$mm)에서 나타나고 그 크기는 0.05m/sec로 $X=0$mm 단면에서 보다 더 증가되었고 이 값은 연장판이 있고 비연소반응일 때, 어느 유량조건, 어느 X단면에서의 r.m.s.값보다 더 큰 값이다. 이러한 사실로부터 연장판이 있을 때 화염대 부근에서 연료분출량이 많으면 연소반응에 의해 r.m.s.값이 비연소반응일 때보다 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 연장판이 없을 때 연소반응이 있는 경우의 r.m.s.값 분포를 보면 $Y=7$mm에서 최대치가 나타나며 이 위치는 비연소반응일 때 같은 유동조건의 결과(Fig. 11)보다 Y방향으로 1mm정도 증가했음을 알 수 있다. 그리고 r.m.s.최대치는 $V_w=1.70$ cm/sec와 2.48cm/sec일 때 각각 0.065m/sec와 0.058m/sec인데, 연장판이 없는 같은 유동조건에서 비연소반응일 때(Fig. 11)의 r.m.s.값 최대치가 0.3m/sec인 것으로보아 이 부근에서 연소반응으로 말미암아 r.m.s.값이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 이렇게 감소하는 이유는 연소반응으로 온도가 증가함에 따라서 점성효과가 커져, 유동박리가 일어날 때 발생된 큰 와류의 요동이 억제되기 때문인 것으로 사료된다.

$X=20$mm에서는(Fig. 18) 연장판이 있는 경우의

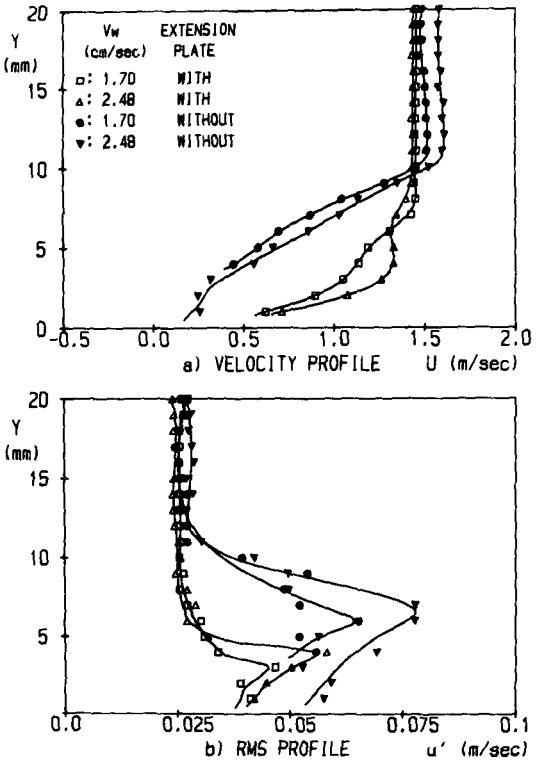


Fig. 18 Prolfiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity flucturation in case with flame($U_\infty=1.5$m/sec, $X=20$mm)

평균속도 분포를 보면 화염에 의한 국부적 가속현상으로 말미암아 $X=10$mm에서 나타났던 평균속도의 왜곡이 더 현저히 나타난다. 한편 연장판이 없는 경우, 비연소반응의 결과(Fig. 11)에서 나타났던, 재순환 영역에서의 역방향속도가, 같은 유동조건에서 연소반응이 있는 경우에는 사라짐을 관찰할 수 있다. 이것은 $X=10$mm 단면에서의 결과(Fig. 17)에서 언급했듯이 연소반응에 의해 유동박리의 효과가 감소하여 재순환 영역이 좁아졌기 때문인 것으로 생각된다. 연장판이 있는 경우 re.m.s. 값의 분포를 보면 $V_w=1.70$cm/sec일 때에는 최대치가 0.046m/sec이고 그 위치는 $Y=3$mm이며 $V_w=2.48$cm/sec일 때는 그 값이 0.058m/sec이고 그 위치는 $Y=4$mm인데 이 위치는 화염대 부근이며 이곳의 평균속도구배는 다른 곳보다 크지 않고, 또한 연료분출속도가 증가하면 r.m.s.값의 최대치의 크기가 증가하는 것으로 보아 이곳의 r.m.s.값은 속도전단에 의한 것이라기보다 연소반응에 의한 것임

을 알 수 있다. 연장판이 없을 때에도 연료분출속도가 클 때에 연료분출속도가 작을 때보다 r.m.s.값의 최대치가 크게나타나는데, 연장판이 없을 때 연소반응으로 인해 유동박리의 효과가 감소하여 비연소반응의 경우보다 r.m.s.값이 상당히 감소하지만 연료분출속도를 증가하면 화염대 부근에서 화염에 의해 r.m.s.값이 증가함을 알 수 있다.

$X=30$mm에서(Fig. 19) 연장판이 있는 경우의 X방향 평균속도 분포를 보면 $X=20$mm 단면에서(Fig. 18)와 마찬가지로 계속적으로 속도의 가속현상이 진행되고 있음을 관찰할 수 있고, 연료분출속도가 $V_w=2.48$cm/sec인 경우는 화염대 부근의 속도가 공기주류속도와 크기가 비슷해졌음을 알 수 있다. 연장판이 없는 경우, 연소반응이 있을 때의 r.m.s.값 분포는 $X=20$mm 단면에서의 결과와 유사하다. 연장판이 있고 연소반응이 있는 경우는 r.m.s.최대값이 $X=20$mm단면에서의 결과보다 약간 증가했고 그 위치도 Y방향으로 1mm정도 증가했다.

$X=40$mm 단면에서(Fig. 20) 연장판이 있는 경우의 평균속도 분포를 보면 연료분출속도가 $V_w=2.48$cm/sec일 때, $X=0$mm에서부터 계속적으로 진행 되어왔던 국부적 가속이 누적되어 공기주류속도보다 평균속도가 큰 부분이 관찰된다. 이러한 현상을, 평판 경계층 확산화염의 특징적인 현상으로서 속도초과(veocity overshoot)라고 한다. 연소반응이 있을 때, 연장판이 없는 경우에는 이러한 현상이 아직까지 관찰되지 않는다. r.m.s.값의 분포를 보면 연장판이 있는 경우에 최대값의 크기는 $X=30$mm 단면에서의 값에서 그다지 변하지 않았으나 그 위치는 Y방향으로 1mm 증가했다. 연장판이 없는 경우에도 최대값의 크기는 $X=30$mm 단면에서의 결과와 유사하나 그 위치는 $V_w=1.70$cm/sec일 때, $X=30$mm 단면의 결과보다 Y방향으로 1mm증가했고 $V_w=2.48$cm/sec일 때는 2mm증가했다.

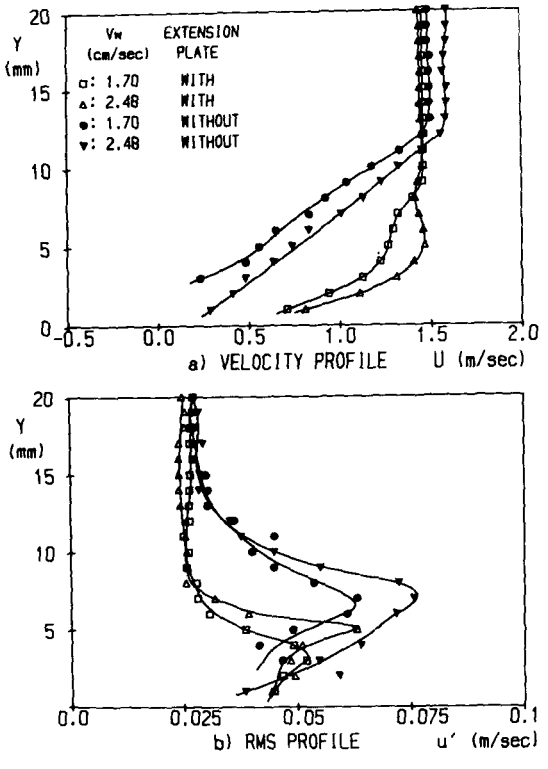


Fig. 19 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame($U_\infty=1.5$m/sec, $X=30$mm)

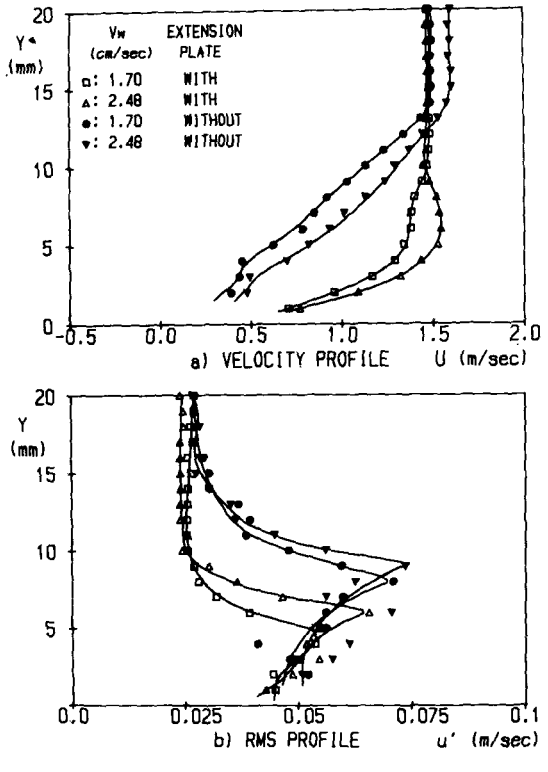


Fig. 20 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame($U_\infty=1.5$m/sec, $X=40$mm)

지금까지 공기주류속도가 1.5m/sec인 경우에 연소반응이 있을 때, 연장판이 있는 경우와 연장판이 없는 경우 모두에 대하여 X의 몇 가지 단면에서 X방향의 평균속도 분포와 X방향 속도변동성분의 r.m.s.값 분포를 살펴보았다. 이제는 공기주류속도를 0.82m/sec로 했을 때, 연소반응으로 평균속도 분포와 r.m.s.값 분포가 연장판 유무에 따라 어떻게 변하는가를 살펴보기로 한다.

Fig. 21, 22, 23, 24그리고 Fig. 25는 $U=0.82$ m/sec일 때, 각각 $X=0$, 10, 20, 30그리고 40 mm 단면에서 연소반응이 있는 경우에 연장판이 있을 때와 없을 때를 함께 나타낸 그림들이다.

$X=0$mm 단면에서(Fig. 21)의 X방향 평균속도 분포를 보면 연장판이 있고 연료분출속도가 $V_w=1.70$cm/sec일 때의 경계층 두께는 6.5mm인데 유동조건이 같고 비연소반응인 경우(Fig. 14)에는 5.1mm이었다. 이것으로 보아 연소반응으로 경계층 두께가 1.4mm 증가했음을 알 수 있다. 연장판이 없는 경우, 같은 X단면에서 비연소반응일 때(Fig.15), $Y=3$mm 위치는 역방향속도 영역이었으나 연소반응이 있는 경우에는 역방향속도 영역에서 벗어나 있다. 연소반응이 있는 경우, $Y=3$mm 이하의 평균속도는 측정이 되지않아서 역방향속도의 존재여부를 확인하기 어렵다. 한편 연장판이 있는 경우나 없는 경우 모든 X방향 속도변동성분의 r.m.s.값 분포는 연소반응 유무에 따른 뚜렷한 차이를 지적할 수 없다.

$X=10$mm 단면에서는(Fig. 22) 연장판이 있는 경우에 평균속도 분포가 화염에 의해 상당히 왜곡되고 있음을 알 수 있다. 특히 연료분출속도가 큰 $V_w=2.48$cm/sec인 경우에는 $Y=3$mm 위치에서 평균속도가 공기주류속도와 크기가 비슷하다. 연장판이 없는 경우의 평균속도 분포를 보면 비연소반응의 경우(Fig. 15), $X=40$mm 단면에서 사라졌던 역방향속도가 연소반응이 있는 경우에는 $X=10$ mm단면에서 이미 사라짐을 알 수 있다. r.m.s.값

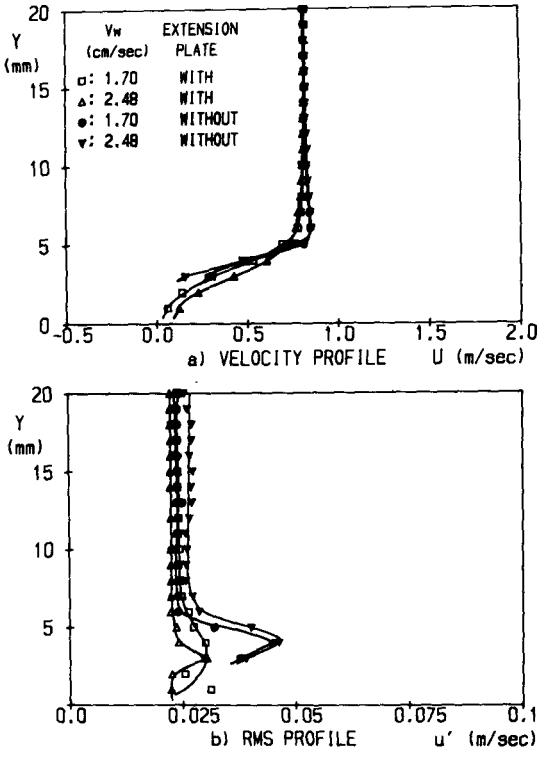


Fig. 21 Profiles of mean velocity & r.m.s. vlaue of velocity fluctuation in case with flame($U_\infty=0.82$m/sec, $X=0$mm)

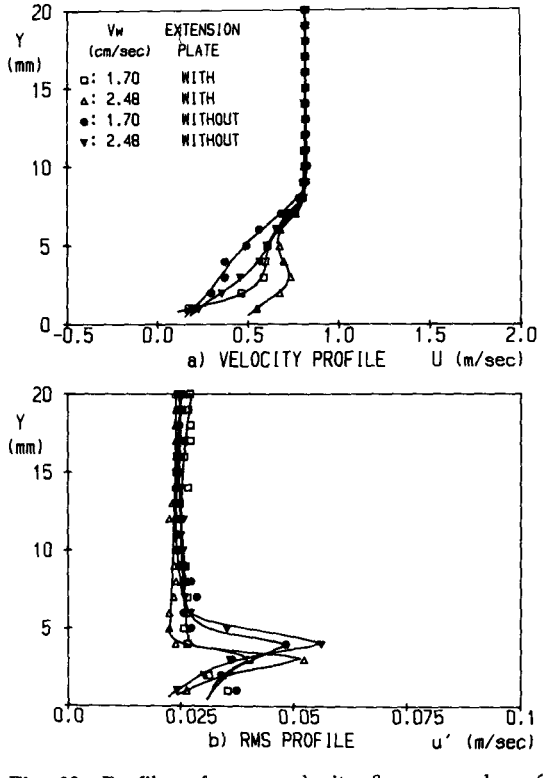


Fig. 22 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame($U_\infty=0.82$m/sec, $X=10$mm)

분포를 보면 연장판이 있을 때, $Y=3$mm에서 최대값이 나타나며 그 크기도 비연소반응의 경우(Fig. 14)보다 증가했는데 이곳은 평균속도구배가 그다지 크지 않은 곳이며 화염에 의해 속도가 가속되는 부분이다. 이것으로보아, 공기주류속도가 1.5 m/sec인 경우에 이미 언급했듯이 이곳에서의 r.m.s.값은 평균속도구배에 의한 것이라기보다 연소반응에 의한 것임을 알 수 있다. 한편 연장판이 없는 경우는, 비연소반응일 때 같은 유동조건에서 r.m.s. 최대값이 $Y=7$mm에 위치하고 그 값이 0.1m/sec이던 것이 같은 유동조건에서 연소반응이 있는 경우에는 그 값이 0.05m/sec로 감소하여 나타났다. 이러한 이유는 공기주류속도가 1.5m/sec인 경우에 언급했듯이 연소반응으로 말미암아 온도가 증가함에 따라 유체의 점성이 증가하여 유동박리와 더불어 발행한 큰 와류의 요동이 억제되기 때문인 것으로 사료된다.

$X=20$mm 단면에서는(Fig. 23) 연장판이 있는 경우, 공기주류속도가 1.5m/sec일 때는 $X=40$ mm 단면에서 연료분출속도가 큰 경우($V_w=2.48$ cm/sec)에만 관찰되던 속도초과 현상이 주류속도를 0.82m/sec로 했을 때는 여기($X=20$mm단면)에서 이미 관찰된다. r.m.s.값의 분포를 보면 연장판이 있을 때 최대치는, $V_w=1.70$cm/sec일 때 $Y=4$mm 위치이고 $V_w=2.48$cm/sec일 때는 $Y=5$ mm 위치에 있는데 이 위치는 평균속도 분포에서 속도초과가 가장 크게 나타나는 부분이며 평균속도구배가 크지 않은 곳이고 화염대 부근이다. 연장판이 없는 경우에는 최대치의 위치가, $V_w=1.70$cm/sec와 $V_w=2.48$cm/sec일 때 각각 $Y=5$mm와 $Y=6$mm에 위치한다.

$X=30$mm 단면(Fig. 24)와 $X=40$mm 단면(Fig. 25)에서의 X방향 평균속도 분포를 보면 연장판이 있는 경우는 물론이고 연장판이 없는 경우에도 연료분출속도가 큰 경우인 $V_w=2.48$cm/sec에서 속도초과 현상이 관찰된다. 그러나 연장판이 없는 경

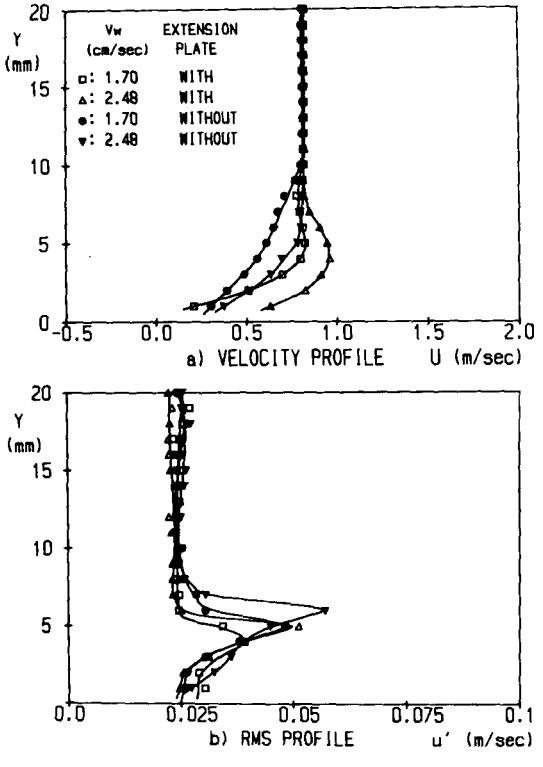


Fig. 23 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame($U_\infty=$ 0.82m/sec, $X=20$mm)

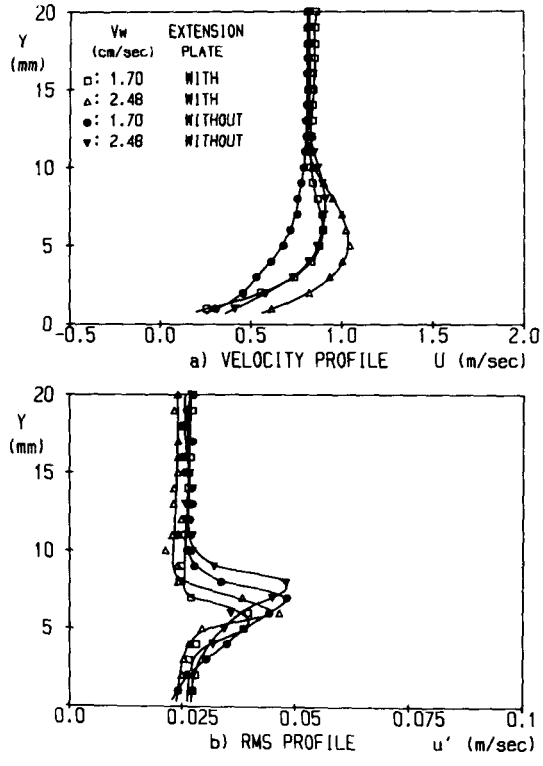


Fig. 24 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame($U_\infty=$ 0.82m/sec, $X=30$mm)

우에 연료분출속도가 작을 때(V_w=1.70cm/sec)는 속도초과 현상이 여지껏 관찰되지 않는다. r.m.s.값 분포는 연료분출속도가 큰 경우(V_w=2.48cm/sec), 연장판 유무에 따른 최대치 크기의 차이는 거의 없고, 다만 그 위치에 차이가 조금 있을 뿐이다. r.m.s.값의 최대치가 나타나는 Y위치는 연장판이 있을 때와 없을 때 모두 그곳에서 평균속도구배가 크지않은 곳이며 속도초과가 가장 현저히 나타나는 곳이다.

지금까지 두 가지 공기주류속도(U_∞=1.5m/sec 그리고 U_∞=0.82m/sec)에 대하여 수소를 1.70 cm/sec 또는 2.48cm/sec 속도로 분출하여 연소시켰을 때, 연장판 유무에 따라 X방향 평균속도 분포와 r.m.s.값의 분포를 몇 가지 X단면에서 살펴보았다.

다음은 평균속도 분포에서 유동박리의 유무에 따른 화염대 부근에서의 가속현상의 경향을 다른 각도에서 알아보기 위하여, X=30mm 단면에서 연소반응이 있을 때와 없을 때의 평균속도의 최대 차이값을, U_∞=1.50m/sec, V_w=1.70cm/sec일 경우를 기준으로 무차원화시켜(이 값을 D_{max}) Fig. 26(a)에 나타내었으며, 연소반응이 있을 때와 없을 때의 평균속도의 차이들을 Y방향으로 적분한 값을 무차원화시켜(이 값을 D_{int}) Fig. 26(b)에 나타내었다. 여기서 가로축의 V_r은 V_w/U_∞를 마찬가지 방법으로 무차원화한 값이다. D_{max} D_{int}, V_r을 자세히 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D_{max}=\frac{(U_f-U_c)_{max.\ at\ x=30mm}}{\{(U_f-U_c)_{max.\ at\ x=30mm}\}_{ref.}}$$

$$D_{int}=\frac{\int_{Y=1mm}^{Y=20mm}(U_f-U_c)_{at\ x=30mm}dy}{\left\{\int_{Y=1mm}^{Y=20mm}(U_f-U_c)_{at\ x=30mm}dy\right\}_{ref}}$$

$$V_r=\frac{(V_W/U_\infty)}{(V_W/U_\infty)_{ref}}$$

여기에서 U_f는 연소반응이 있을 때 X방향의 평균속도이고 U_c는 연소반응이 없을 때의 X방향 평

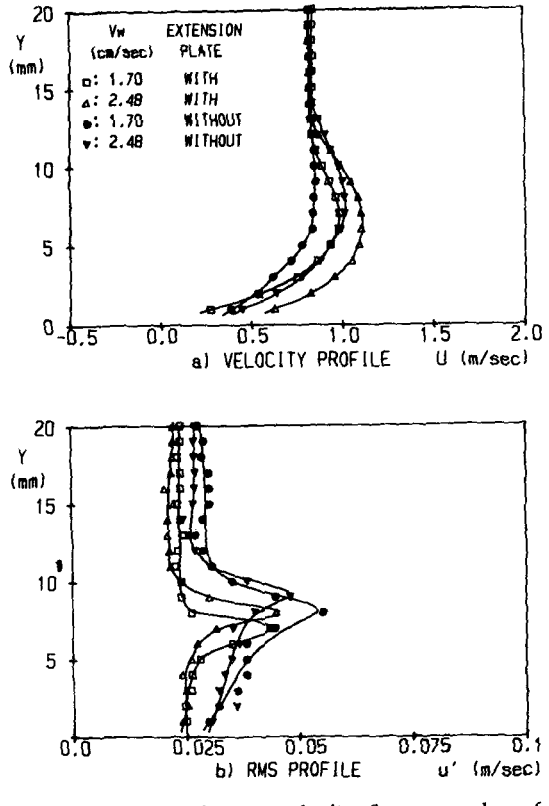
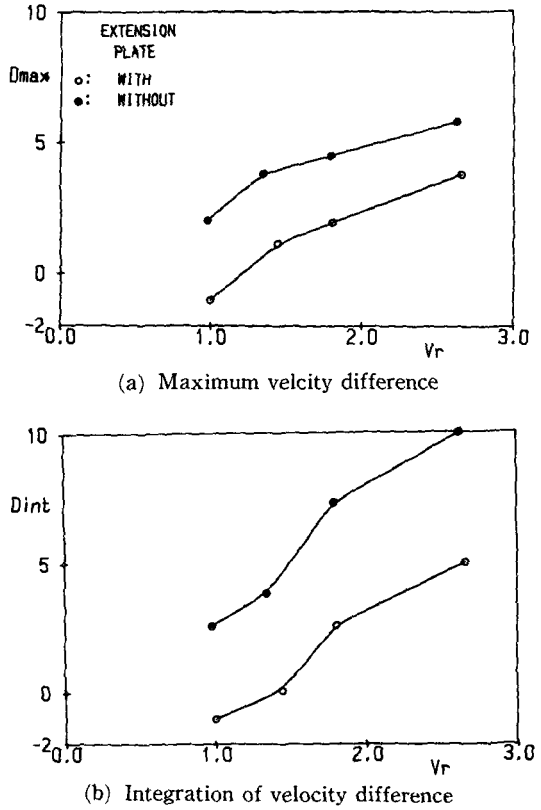


Fig. 25 Profiles of mean velocity & r.m.s. value of velocity fluctuation in case with flame(U_∞=0.82m/sec, X=40mm)



(a) Maximum velcity difference

(b) Integration of velocity difference

Fig. 26 Nondimensional velocity difference between cases with and without flame at X=30mm

균속도이다. 그리고 ref.는 U_∞=1.5m/sec, V_w=1.70cm/sec일 경우를 기준으로 한다는 표시이다.

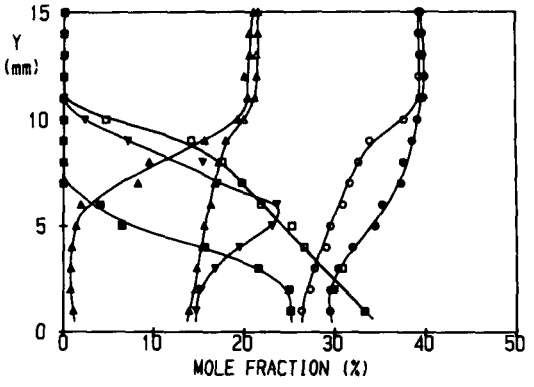
이 그림으로부터 화염 유무에 따른 평균속도의 차이는 오히려 연장판이 없을 때 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며 이는 화염의 존재로 말미암아 역방향 속도가 크게 줄어들기 때문인 것으로 생각된다. 또한 V_r이 증가하면 즉, 공기주류속도가 작거나 연료분출속도가 크면 화염유무에 따른 속도의 차이는 증가함을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 화염대 부근에서의 국부적 가속현상은 유동박리가 없을 때에는 분포도상에서 뚜렷이 가속현상을 관찰할 수 있으며 유동박리가 있는 경우에는 유량조건에 따라 달라진다. 즉, 공기주류속도가 작고 연료분출속도가 크면 X 방향의 평균속도 분포에서 가속현상을 확실히 관찰할 수 있으나 상대적으로 공기주류속도가 커지고 연료분출속도가 작아지면 분포도상에서 가속을 확인하기 어렵다. 어느 경우에나 화염으로 인해 속도분포가 왜곡되며 하류로 갈수록 화염대 부근에서 X방향의 속도가 증가한다. r.m.s.값은 유동박리가 있을 때에는 화염에 의해 화염이 없을 때보다 현저히 감소하지만 유동박리가 없는 경우에는 화염대 부근에서 증가한다. 이 두 경우 모두 최대치는 화염대 부근에 위치한다.

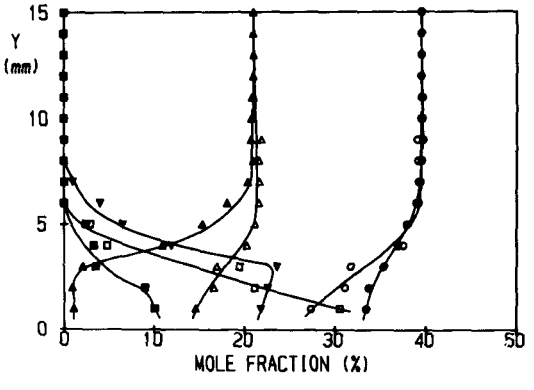
3.3 시간평균농도, 시간평균온도 측정 결과 및 시간평균밀도 계산 결과

연장판의 유무에 따라 평균속도 분포가 현저히 다른 양상을 보이는 유동조건과 위치, 즉, 유동조건이 U_∞=1.50m/sec, V_w=2.48cm/sec일 때 X=30mm 단면에서 시간평균농도 분포를 비교한 것이 Fig. 27 에, 시간평균온도 분포를 비교한 것이 Fig. 28에 그리고 시간평균밀도를 비교한 것이 Fig. 29에 각각 나타나 있다.

연장판이 없고 비연소반응인 경우, 시간평균농도 분포〔Fig. 27(a)〕를 보면 수소가 Y=11mm까지 나타나며 수소의 몰분율은 벽면 근처(Y=1mm)에서 33.5%이고 산소의 몰분율은 13.8%이다. 연장판이 없고 연소반응이 있는 경우〔Fig. 27(a)〕에는 수소가 Y=7mm까지 나타나고 수수와 산소가 공존하는 영역이 Y=7mm이하에 넓게 퍼져있으며 벽면 근처(Y=1mm)에서 수소의 몰분율은 25.0%이고 산소의 몰분율은 1.2%이다. 연소반응이 있을 때, 연소반응으로 발생한 H_2O의 분포를 보면 Y



(a) In case without extension plate



(b) In case with etemsion plate

Fig. 27 Time-mean concentration profiles(U_∞=1.5 m/sec, V_w=2.48cm/sec, X=30mm)

Without flame : ○ : $N_2\times\frac{1}{2}$, △ : O_2, □ : H_2

With flame : ● : $N_2\times\frac{1}{2}$, ▲ : O, ■ : H, ▼ : H_2O

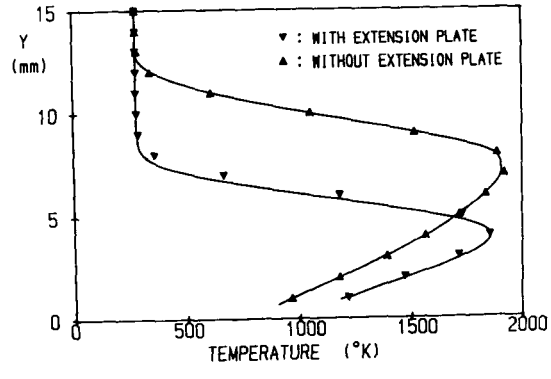


Fig. 28 Time-mean temperatue profiles(U_∞=1.5m/sec, V_w=2.48cm/sec, X=30mm)

=6mm 위치에서 최대값이 나타나는데 이러한 사실로부터 이곳에서 연소반응이 가장 활발한 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 28의 시간평균온도 분포를 보면 연장판이 없는 경우, 온도의 최대치가 $Y=7$ mm에 위치한다. 연소반응이 가장 활발히 일어나는 곳과 최대온도의 위치가 이렇듯 차이가 나는 것은 연소반응이 가장 활발히 일어나는 곳에서 H_2O가 가장 많이 발생하므로 연소반응으로 방출되는 열이 H_2O에 복사에너지로 많이 흡수되기 때문으로 사료된다. 같은 유동조건 즉, 연장판이 없고 연소반응이 있는 경우의 시간평균밀도 분포(Fig. 29)를 보면 공기주류 영역($Y>13$mm)에서 시간평균밀도가 0.00123g/cm³이지만 온도가 최대인 위치($Y=7$ mm)에서는 0.000123g/cm³로 감소한다.

연장판이 있고 연소반응이 있는 경우의 시간평균농도 분포〔Fig. 27(b)〕를 보면 수소는 $Y=6$mm위치까지 분포하며 벽면 근처($Y=1$mm)에서 수소의 몰분율은 31.0%이고 산소의 몰분율은 14.6%이다. 같은 유동조건에서 연소반응이 있는 경우에도 수소는 $Y=6$mm위치까지 나타나며 벽면 근처($Y=1$ mm)에서 수소의 몰분율은 10.0%이고 산소의 몰분율은 1.2%이다. 연장판이 없는 경우와 마찬가지로 이 경우에도 수소와 산소가 공존하는 영역이 $Y=6$mm 이하에 넓게 퍼져있다. 연소반응으로 발생한 H_2O의 몰분율의 최대치는 $Y=3$mm에 위치하며 같은 유동조건에서 시간평균온도 분포(Fig. 28)를 보면 $Y=4$mm위치에서 온도의 최대치가 나타나는데, 연장판이 없는 경우에서 이미 언급했듯이 연소반응이 있는 경우, 최대온도 위치와 연소반응이 가장 활발히 일어나는 곳의 위치가 다르다. 같은 유동조건에서 시간평균밀도 분포(Fig. 29)를 보면 $Y=4$mm(최대온도 위치)에서 시간평균밀도가 가장 작고, 연장판이 없고 연소반응이 있는 경우의 최대온도 위치에서의 시간평균밀도와 그 크기가 같다.

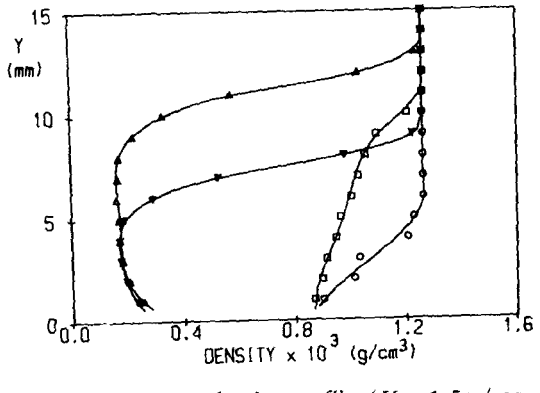


Fig. 29 Time-mean density profiles($U_\infty=1.5$m/sec, $V_w=2.48$cm/sec, $X=30$mm)
With extension plate ; ○ : without flame, ▼ : with flame
Without extension plate ; □ : without flame, ▲ : with flame

4. 결 론

평판 경계층 확산화염에서 유동박리의 유무에 따라 유동의 가시화, X방향의 평균속도 및 X방향 속도변동성분의 r.m.s.값, 시간평균농도 그리고 시간평균온도 분포들을 측정하고 측정된 농도와 온도로부터 시간평균밀도를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 화염대 부근에서의 국부적 가속현상에 관하여

연장판이 부착되어 유동박리가 일어나지 않는 경우, X방향 평균속도 분포는 전반적으로 화염에 의해 화염대 근처에서 국부적 가속을 보이고, 공기주류속도가 작고 연료분출속도가 클수록 그리고 후류로 갈수록 현저히 나타난다.

연장판이 부착되지 않아서 유동박리가 일어나는 경우는 공기주류속도가 작고 연료분출속도가 클 때에는 연장판이 있는 경우와 마찬가지로 화염대 근처에서의 가속이 현저하게 나타나나, 공기주류 속도가 증가하고 연료분출속도가 감소하면 분포도상에서 뚜렷한 가속현상은 관찰하기 어렵다.

그러나 어느 경우에나 화염에 의해 화염대 부근에서 속도분포는 왜곡되어 나타나고 후류로 갈수록 화염대 부근에서 X방향의 속도가 증가한다. 특히, 유동박리가 있는 경우에는 재순환 영역의 역방향 속도가 화염으로 인해 현저히 줄어든다.

(2) 속도변동성분의 r.m.s.값 분포에 관하여

연장판이 있는 경우에는 화염이 존재하면 화염이 없을 때에 비해 화염대 부근에서 r.m.s.값이 증가하며, 연장판이 없는 경우에는 유동박리로 말미암아 발생된 큰 와류(eddy)의 요동이 연소반응에 의해 억제되기 때문에 r.m.s.값이 전반적으로 감소한다. 이 두 경우 모두 연소반응이 있을 때의 r.m.s.값의 최대치는 화염대에 위치하며 이 위치는 평균속도의 구배가 큰 곳은 아니다.

(3) 시간평균농도, 시간평균온도 및 시간평균밀

도 분포에 관하여

연장판 유무에 관계없이 연소반응이 있는 경우, 수소와 산소가 공존하는 영역이 넓게 분포되어 있으며 연소반응으로 발생된 H_2O의 몰분율이 최대가 되는곳 즉, 연소반응이 가장 활발한 곳의 위치보다 최대온도가 나타나는 위치가 Y방향으로 조금 위 측에 있고 이곳에서 밀도는 최소가 된다.

참 고 문 헌

(1) H. Emmons, 1956, "The Film Combustion of Liquid Fuel", Z. Agner, Math. Mech. 36, 60.

(2) T. Hirano and Y. Kanno, 1973, "Aerodynamic and Thermal Structures of the Laminar Boundary Layer Over a Flat Plate with a Diffusion Flame", 14th Symposium(Int.) on Combustion, pp. 391~398.

(3) T. Hirano and M. Kinosita, 1974, "Gas Velocity and Temperature Profiles of a Diffusion Flame Stabilized in the Stream Over Liquid Fuel", 15th Symposium(Int.) on Combustion, pp. 379~387.

(4) T. Ueda, M. Mizomoto and S. Ikai, 1982, "Velocity and Temperature Fluctuations in a Flat Plate Boundary Layer Diffusion Flame", Combustion Science and Technology, Vol. 27, pp. 133~142.

(5) S. Andreotti, P. Andreussi and L. Petarca, 1984, "Boundary Layer Burning of Fuel Surfaces: Thermal and Aerodynamic Structure of the Flame", Combustion Science and Technology, Vol. 40, pp. 279~291.

(6) A. Ramachandra and B. N. Raghunandan, 1984, "An Analysis of a Boundary Layer Diffusion Flame Over a Porous Flat Plate in a Confined Flow", Combustion Science and Technology, Vol. 38, pp. 59~73.

(7) Y. Nakagawa, N. Nishiwaki and M. Hirata, 1971, "Effect of Combustion on a Laminar Boundary Layer", 13th Symposium(Int.) on Combustion, pp. 813~819.