

<論 文>

# 재순환 영역이 있는 축대칭 난류확산화염의 구조

—(I) 비연소 유동장 측정 결과—

이 병 무\* · 신 현 동\*

(1984년 3월 26일 접수)

## The Structure of the Axisymmetric Turbulent Diffusion Flame

—(I) Flow Measurement in Isothermal Field—

Byung Moo Lee and Hyun Dong Shin

### Abstract

Time mean velocity and turbulent characteristics measurement by using laser Doppler velocimeter in axisymmetric turbulent recirculating flow which was formed by injection gaseous fluid from circular slit to air stream perpendicularly, are presented.

The nozzle fluid used were air and hydrogen-nitrogen mixture. Species concentration measurement were also made by using gas chromatograph. The distribution of axial, radial, tangential velocity and species concentration show the structure as follows: Nozzle fluid mainly exist at the rightly outside layer of the recirculating zone and mix with surrounding air. From the distribution of the turbulent intensity, isotropic structure of turbulence dominate upstream, however that's structure change to anisotropic downstream. These data are useful to evaluate the turbulent models and turbulent combustion reaction model in combustor with recirculating zone.

### 1. 서 론

실제 연소기에서 형성되는 화염의 시간평균 구조 예측에 관한 연구는 이때까지 상당수 있다. 대부분의 연소기는 그 유동이 난류이면서, 또한 화염안정을 위하여 재순환 영역이 국소적으로 존재한다. 이와같은 연소기내의 흐름과 연소과정을 엄밀히 해석 하려면 화학반응이 존재하는 타원형 편미분 방정식(elliptic partial differential equation)을 연립으로 풀지 않으면 않된다. Gosman<sup>(1)</sup>에 의하여 순환류가 있는 2차원 흐름에 대한

해법이 제안된 후 난류모델로는 주로 2방정식 모델<sup>(2,3)</sup> (two-equation model)이 주로 많이 쓰여 왔으며 난류 연소반응 모델로는 Ballar에 의한 난류 3영역 모델과 Arrhenius형 반응속도 모델의 확장인 Borghi<sup>(4)</sup>의 방법이 많이 채용되었다. 한편 상기와 같이 제안된 계산방법과 난류모델 그리고 연소반응 모델의 타당성 입증은 역시 실험결과에 대하여 평가 되어야 한다. 레이저 도플러 유속계(laser Doppler velocimeter)의 출현으로 재순환 영역에서의 시간평균 유속과 난류성분의 측정이 가능하게 되어 각 모델에 대한 검토와 실험적 연구가 종래 그 어느때 보다 활발히 진행되고 있다. 재순환 영역이 없는 화염에 대한 레이저 도플러 유속계를 사용한 난류특성 측정 결과는 이제까지 다수 발표

\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

되었으며<sup>(5)</sup> 재순환이 있는 경우도 비교적 정밀한 측정이 이루어지고 있다. 그러나 대부분의 실험은 재순환 영역을 형성시키기 위하여 1차공기에 접선방향의 운동량을 부여하여 선회화염(swirling flow)을 주로 그 대상으로 삼고 있다. 따라서 이런 선회화염에는 기하학적으로는 2차원으로 다룰 수 있지만 유동 자체에 3차원 성분이 상당부분 차지하므로 난류모델 및 연소반응 모델의 엄밀한 검토가 불가능하다.

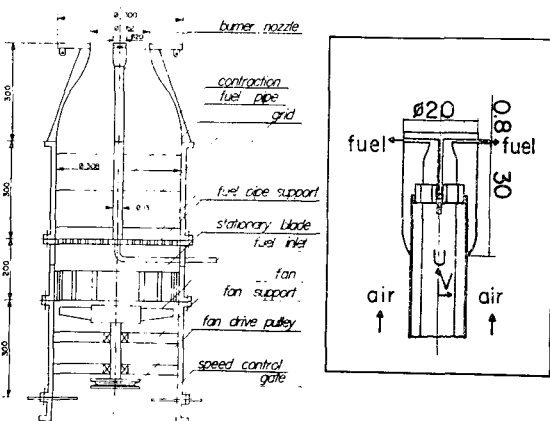
본 연구의 목적은 기하학적으로는 물론이며 유동 자체가 축대칭이 되고 재순환 영역이 있는 노즐을 제작하여 우선 연구의 1차 단계로서 연소가 없을 경우 시간 평균 유속 및 난류 성분을 레이저 도플러 유속계로 비교적 정밀히 측정후, 노즐 유체와 주위공기류와의 시간 평균 혼합특성을 구명하기 위하여 가스크로마토그래프에 의하여 농도 분포를 측정, 모델 검토를 위한 기초 데이터 제공과 실험용으로 채용한 노즐류의 구조를 구명하고자 한다. 특히 노즐유체를 수소/질소 혼합기인 경우와 공기를 사용한 양 경우를 비교, 검토하므로써 부력효과에 대한 평가를 시도하였다.

2. 실험장치 및 방법

실제 연소기는 연료가 공기에 대하여 일정한 각도로 분출하게 되어있다. 본 연구에서는 실제 연소기의 유동형태를 손상시키지 않으면서, 재순환 영역이 있는 축대칭 혼합장을 형성하기 위하여 Fig. 1과 같은 연소장치를 제작하였다. Fig. 1(a)는 유동장의 개요를 나타낸 것이다. 팬(fan)으로 부터 공급된 공기는 축류부(contraction)를 거쳐 축방향 유속이 균일한 공간분포를 갖고 직경 152mm 인 출구로 부터 수직상방으로 분출된

다. 한편, 연료는 공기노즐 출구 중심부에서 직경 20mm의 2개의 평행 원판으로 형성된 0.8mm의 간극으로부터 공기류에 대하여 직각방향으로 분출된다. 연료노즐의 상세도는 Fig. 1(b)에 나타낸다. 한편 공기류의 축방향 유속은 5.1m/sec로 일정하게 하였다. 그리고 연료노즐류는 고온에서의 측정상 어려움과 부력효과 감소 그리고 유속측정시의 산란입자의 첨가 용이성 등을 고려하여 수소(H<sub>2</sub>)와 질소(N<sub>2</sub>)의 혼합기를 채용하였다. 수소와 질소의 체적유량비는 1.46이며 원판 끝단에서 반경방향으로 분출되는 단면평균 유속은 7.44m/sec이다. 또한 본 연구에서는 유동장의 특성의 개요를 파악하고 수치계산의 타당성을 조사하기 위하여 연료노즐로 부터 공기를 분출시켜 속도를 측정하였다. 연료노즐에 사용하는 공기의 체적유량은 283cm<sup>3</sup>/sec로서, 분출단면 평균유속은 5.63m/sec이다. 본 연구에서는 연료노즐로 부터 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기를 분출시킬 경우와 공기를 분출시킬 경우 각각에 대하여 축방향 시간평균속도(U), 반경방향 시간평균속도(V), 축방향 난류성분(w'), 반경방향 난류성분(v') 그리고 접선방향 난류성분(w'')를 각각 측정하였다. 평균유속 및 난류성분 검출에는 레이저 도플러 유속계(laser Doppler velocimeter)를 사용하였다. 유속측정을 위한 산란입자의 첨가는 유동상(fluidized bed)속의 활석(talcum) 분말(평균직경 2μm) 속을 노즐류를 통과함으로써 달성할 수 있다. 산란입자의 농도제어는 아주 좁은 범위이지만 유동상(fluidized bed)의 진동의 정도를 조정함으로써 가능하였다. 특히 노즐류와 주위공기류와의 경계부근 혹은 주위공기류의 유속측정을 위하여 필요시에 산란입자를 주위공기에도 노즐류와 같은 방법으로 첨가하였다. 광원은 He/Ne 레이저(파장; 0.6328×10<sup>-3</sup>mm)로서 그 출력은 15mW이며, 측정부의 크기는 1.4mm, 0.12mm, 0.12mm이다. 레이저 광선의 한쪽은 bragg cell에 의하여 주파수 변위(40MHz)를 주었으므로 역류의 감지가 가능 하도록 하였다. 측정부로부터의 유속에 대응하는 도플러 주파수는 트랙커(tracker)에 의하여 전압으로 전환되어 전압의 통계처리에 의하여 평균유속과 난류성분 즉 유속변동의 r.m.s를 산출하였다.

흐름의 공간분포를 측정하기 위하여 레이저 도플러 유속계는 고정시키고 버어너를 3차원 이동장치에 의하여 이동시켰다. 축방향 속도와 반경방향 속도성분은 측정점에 교차하는 레이저 광선의 두가닥의 광선을 90°회전시킴으로서 얻을 수 있으며 반경방향 속도성분의 접선방향 속도성분도 버어너의 이동방향을 90° 바꾸어



(a) Burner (b) Nozzle  
Fig. 1 Schematics of burner

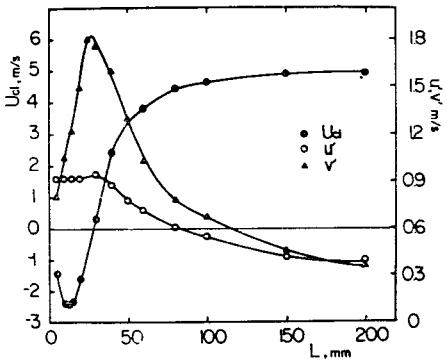
중으로서 측정이 가능하였다. 연료노즐에 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기를 분출시켰을때 분석 해야할 화학종은 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 그리고 N<sub>2</sub>이다. 본 실험에서는 각 측정점에서 추출한 시료 가스를 molecular sieve 가 충전되어 있는 스테인레스 튜브 내부로 통과 시킴으로서 분리시켜 가스크로마토그래프(gas chromatograph)의 열전도 분석방법에 의하여 각 성분을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

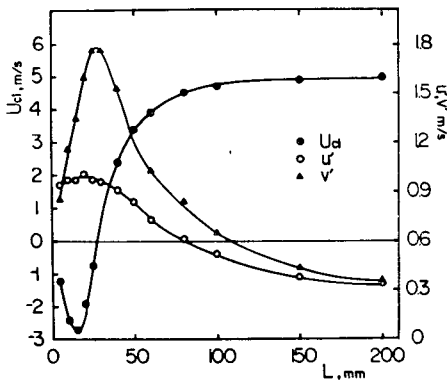
3.1. 평균유속 및 농도분포

Fig. 2(a), (b)에 중심축상에서의 축방향 평균속도분포를, 연료 노즐로부터 공기를 분출할 경우(이하 등(等)밀도분류라 함)와 연료 노즐로부터 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기를 분출할 경우(이하 이(異)밀도분류라 함) 각각에 대하여 나타낸 것이다. 등밀도, 이밀도의 양경우, 노즐원판 표면에서 부터의 거리 L=28mm 근처까지 부(負)속도인 영역임을 알 수 있다. 즉 수직상방을 축방향 정

(正)속도로 잡고 있으므로 L=28mm 근처까지가 시간 평균 재순환 영역으로 볼 수 있다. 이 재순환 영역에서는 등밀도인 경우 L=13mm, 그리고 이밀도인 경우 L=15mm 근처에서 각각 최대 부속도 -2.5m/sec 까지 도달함을 알 수 있다. 대표적인 4개의 단면(L=5mm, 20, 30, 그리고 50mm)의 축방향 평균유속 (U)분포를 Fig. 3에 나타낸다. Fig. 3(a)는 등밀도 분류인 경우이며, Fig. 3(b)는 이밀도분류인 경우를 나타낸다. 등밀도 분류인 경우, L=5mm 단면에서도 반경방향의 재순환 영역은 거의 노즐원판 반경과 같은 R=10mm 까지이며, 하류로 가면서 재순환 영역이 다소 작아져서 L=20mm 단면에서는 R=8.5mm 로 된다. L=5mm 단면분포로부터 노즐원판 중심에서 R이 증가함에 따

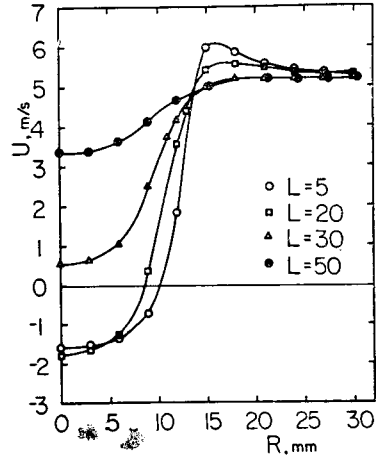


(a) Air-Air

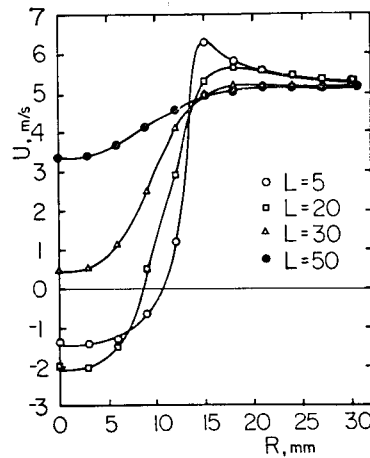


(b) H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Air

Fig. 2 Measured distribution of the velocity and turbulent intensity along the axis



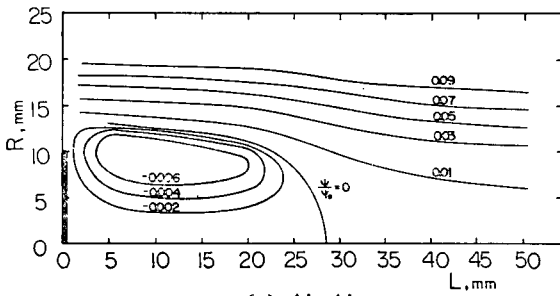
(a) Air-Air



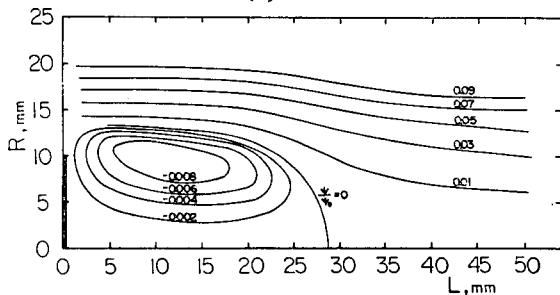
(b) H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Air

Fig. 3 Radial properties of axial velocity

라 역류에서 정(正)의 유속으로 바뀐뒤 급격히 속도가 증가하다가  $R=16\text{mm}$  근처에서 그 최고점에 도달한 후 이와같은 현상은 후술하는 반경방향 유속측정결과(Fig. 5)로 부터도 알 수 있듯이, 노즐원판 가까이에서는 하류에서 재순환 영역으로 들어간 유체가  $R$ 의 증가방향으로 밀려나오면서 주위 공기류와 합하여 가속화된 결과로 해석된다.  $L=20\text{mm}$  단면에서는 이와같은 가속화가 약간 관측되나 그 이후의 하류에서는 유속분포의 극소적인 가속현상은 보이지 않는다. 한편 Fig. 4(a), (b)에는 등밀도 및 이밀도 분포 각각에 대하여 상기에 나타낸 축방향 유속분포로부터 얻어낸 유선의 분포를 도시한 것이다. 유선함수는 다음과 같이 정의된 것이



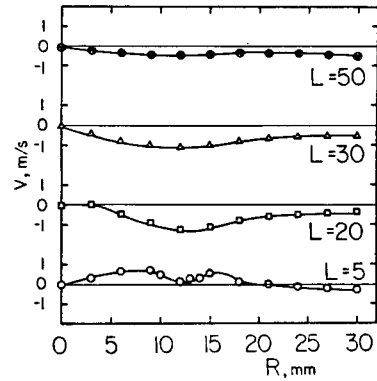
(a) Air-Air



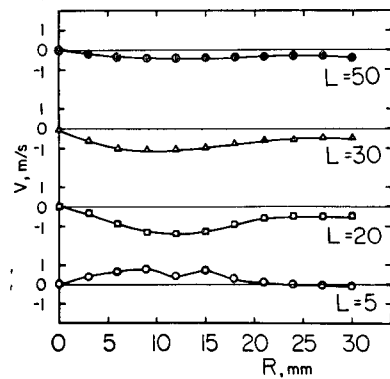
(b)  $\text{H}_2/\text{N}_2\text{-Air}$

Fig. 4 Streamline patterns

며  $\psi = \int_0^R \rho U R dR$ , 주위공기류에 대한 유선함수로 무차원한 양을 사용하였다. 즉  $\psi_0 = \int_{\frac{1}{2}d_0}^{\frac{1}{2}D_0} \rho U R dR$ , 여기서  $D_0$ 는 주위공기류의 노즐직경을 나타내고  $d_0$ 는 연료노즐의 직경이다. 등밀도, 이밀도 양경우 시간 평균적인 유동상태와 거의 같다. 노즐 유체가 주위 공기류에 대하여 직각으로 분출되는 반경 방향의 거리  $R=10\text{mm}$  보다 조금 바깥쪽인  $R=11\sim 13\text{mm}$  근처에 등유선이 밀집하는 것으로 보아 시간 평균적으로 주위 공기와 노즐유체의 혼합이 활발히 일어나는 곳으로 여겨진다. Fig. 4로 부터 재순환 길이(recirculation length)는 양경우 모두 거의  $28\text{mm}(=1.4d_0)$ 가 된다. 그리고 반경방향유속 ( $V$ )의 단면분포를 등밀도 및 이밀도 각각에



(a) Air-Air



(b)  $\text{H}_2/\text{N}_2\text{-Air}$

Fig. 5 Radial properties of radial velocity

대하여 Fig. 5(a), (b)에 나타낸다. 등밀도인 경우, 상류인  $L=5\text{mm}$  단면에서는 축중심에서는 제로이며,  $R$ 이 증가함에 따라 중심에서 바깥 방향으로 흐르는 속도가 증가하다가,  $R=8\text{mm}$  근방에서 그 최고점에 도달한후 감소하여  $R=12\text{mm}$  근처에서 그 최소점이 되고, 다시 증가하여  $R=16\text{mm}$  근처에서 그 최고점에 도달, 다시 감소하여  $R=30\text{mm}$  인 주위류에 도달하면 약간의 부속도가 되어 분류쪽으로의 흐름이 존재함을 알 수 있다. 하류로 가면서( $L=20\text{mm}$  이후) 분류중심에서는 제로인 반경방향 속도를 갖지만, 축으로 부터 반경방향으로 이동한 위치에서는 분류중심쪽으로 들어가는 속도가 전영역을 통하여 존재함을 알 수 있다. 특히  $R=30\text{mm}$  이상에서는 모든 단면에서 반경방향으로 들어가는 속도가 관측되었다. 이 영역은 후술되는 농도분포로부터 연료노즐의 유체가 거의 없고 공기류를 알 수 있다. 즉 주위공기가 분류중심으로 유입되는 과정을 잘 알 수 있다. 한편, 연료노즐에서  $\text{H}_2/\text{N}_2$  혼합기를 분출하였을 경우, 극소 농도분포를 Fig. 6에 나타낸다.  $L=5\text{mm}$  단면에서,  $R=10\text{mm}$  근처까지는  $\text{H}_2$ ,

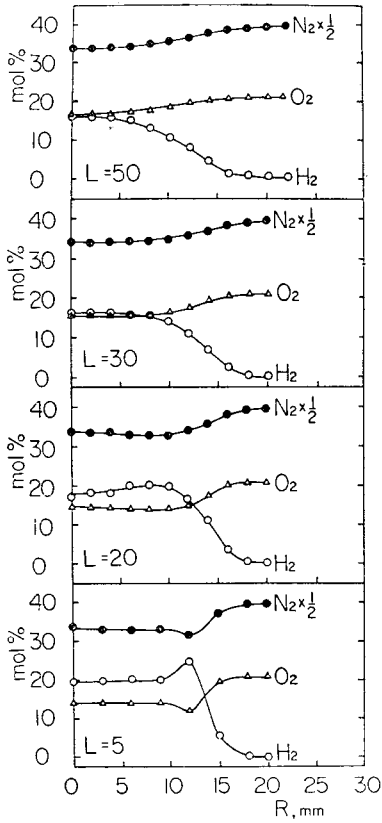
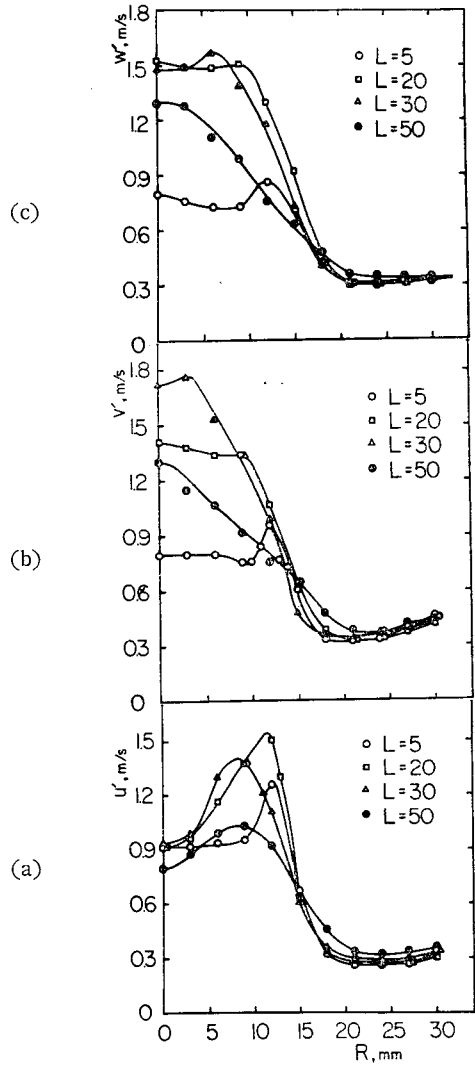


Fig. 6 Radial properties of species concentration

O<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>의 농도분포는 거의 평탄하다. 축방향 유속 분포로부터 이 영역은 재순환 영역임을 알 수 있다. R=12mm~15mm 사이에는 각 농도구배가 상당히 급한 것으로 보아 주위 공기와와의 희석 작용이 매우 활발하다. 또한 축방향 유속분포를 보아도 같은 영역에서 속도구배가 큰 것을 알 수 있다. 하류(L=20mm)로 가면서 이와같은 혼합영역이 넓어짐을 알 수 있다. 그리고 구배자체가 상당히 완만하게 되어있다. 그러나 아직 탈안장과 같은 H<sub>2</sub>의 분포는 약간 남아 있다. 이는 재순환 영역 내부는 노즐 유체와 주위 공기가 잘 혼합되어 균일한 농도장을 형성하고 있으며 그 주변에서 급격한 주위공기와 노즐유체의 혼합층이 형성되어 있음을 알 수 있다. 재순환 영역이 끝나는 L=30mm 또는 그 하류에서는 재순환 영역이 있는 분류의 발달과 유사한 형태로 주위 공기와 혼합 되어감을 알 수 있다. 이상 시간평균 유속분포 및 농도분포로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 재순환 영역내에서는 농도 구배가 거의 없으며 바깥쪽에 상당히 활발한 주위 공기와 노즐유체와의 혼합이 이루어진다. 이와같은 혼합층은 축방향 유속분포



(a)  $u'$  (b)  $v'$  (c)  $w'$   
Fig. 7 Radial distribution of turbulence intensity

의 구배로도 그 영역을 어느 정도 예측할 수 있다. 그리고 주변부에서 반경방향으로 향하는 유입속도가 비교적 크다. 또한 본 실험 유량조건인 경우, 유속장은 노즐 유체에 따라 그 특징이 크게 변하지 않는다.

3.2. 난류성분 분포

Fig. 2(a), (b)에 등밀도 및 이밀도분류 각각에 대한 중심축상에서의 축방향의 난류성분 ( $u'$ )와 반경방향의 난류성분 ( $v'$ )의 분포를 나타낸다. 재순환 영역이 끝나는 L=30mm 근처에서  $u', v'$  전부 최대점을 갖고 있으며,

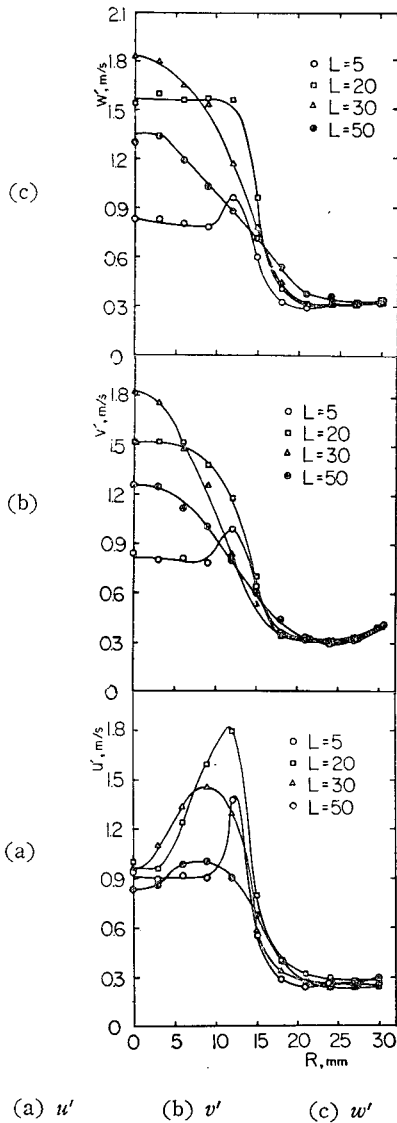


Fig. 8 Radial distribution of turbulence intensity ( $H_2/N_2$ -Air)

축방향 난류성분보다 반경방향 난류성분이 훨씬 크다. 대부분의 중심축에서는 난류구조가 비등방성이며 특히 재순환 영역의 끝부분에서 더욱 현저하다. 이 부분에서의  $v'$  이  $u'$  보다 훨씬 큰 이유는 재순환 영역이 반경방향으로 뻗어 있는 것으로 짐작되나 확인을 위한 실험이 더욱 필요하다. Fig. 7(a), (b), (c) 및 Fig. 8(a), (b), (c)에는 등밀도 및 이밀도의 경우, 각 단면에서의  $u'$ ,  $v'$  그리고 접선방향 난류성분( $w'$ )의 분포를 나타낸다. 등밀도의 경우,  $L=5mm$  단면의  $u'$ ,  $v'$  및  $w'$ 의

분포는  $R=10mm$ 까지는  $0.8m/sec \sim 0.9m/sec$  범위로 일정하다가  $R$ 이 증가함에 따라 급격히 증가하여  $R=12mm$  근처에서 그 최고점을 나타낸다. 이 근처에서는 주위공기와와의 혼합이 가장 활발한 것으로 유추된다. 이와같은 현상은 Fig. 3(a)에 나타난 축방향 평균유속 분포의 구배가 가장 급한 곳이  $R=12mm$  근처임으로부터 유추할 수 있다. 그리고 이 단면에서는 전체적으로  $w'$ 가  $v'$ 보다 약간 크나 거의 같은 정도의 값을 갖고 있어서, 상당히 등방성의 난류구조가 존재함을 알 수 있다. 그러나  $L=20mm$ 인 단면에서는 축방향 난류성분은 중심부는 낮고  $R=12mm$  근처에서 최고점을 갖는 말안장 모습의 분포를 갖고 있으나  $v'$ 와  $w'$ 의 분포는 중심으로부터  $R=9mm$  근처까지 평탄한 분포이고  $R$ 의 증가와 함께 급격히 감소하는 분포를 갖는다. 이 단면에서는  $R=10mm$  근처까지는  $v'$ 와  $w'$ 가  $u'$ 보다 상당히 큰 것으로 보아 비등방성 난류구조가 지배적이거나,  $R$ 이 더 커진 난류장에서는 등방성으로 볼 수 있다.  $L=30mm$  단면에서는  $L=20mm$  단면의 난류구조의 특성과 비슷하지만  $u'$ 의 분포의 최고점 위치가 중심축 쪽으로 이동 하였으며,  $v'$ 와  $w'$ 의 평탄한 분포의 영역이 줄어들었음을 알 수 있다. 더욱더 하류로 가면서  $u'$ ,  $v'$  그리고  $w'$ 의 분포가 접근함을 예측할 수 있으나 본 실험 범위 내에서는  $L=150mm$  정도 까지도 비등방성의 난류구조를 관측할 수 있다. 이상으로부터 재순환 영역이 있는 난류특성은 다음과 같음을 알 수 있다. 축방향 난류성분은 축방향 유속분포의 구배로 어느정도 예측할 수 있으며 주위 공기와와의 혼합이 활발한 곳에서 그 최고점을 갖는다. 그리고 노즐 가까이에서는  $u'$ ,  $v'$  그리고  $w'$ 가 거의 같은 값을 갖고 있어서 등방성 구조임을 알 수 있다. 그러나 재순환 영역이 발달한 하류에서는 비등방성 구조가 현저 해지며  $v'$ 와  $w'$ 의 분포는  $u'$ 의 분포와는 달리 재순환 영역에서 그 최고의 값을 갖는다.

#### 4. 결 론

재순환을 형성시킬 수 있는 노즐에 공기 및  $H_2/N_2$  혼합기를 각각 분사 시켰을때, 유속분포, 난류성분 그리고 농도분포를 측정 함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 연료노즐에서 분출된 연료의 대부분은 재순환 영역의 주위를 접시모양의 층상으로 흐르게 되며 주위 공기류와 급격히 혼합된다.

(2) 분류의 외곽에서도 비교적 많은 양의 공기가 유

입됨을 확인하였다.

(3) 노즐출구 가까운 단면에서는 비교적 등방성의 난류가 지배적이지만, 하류로 가면서 비등방성의 구조를 갖게 된다. 그리고 축방향 난류 성분은 축방향 평균속도 구배와 관련지을 수 있으며, 혼합이 활발한 영역에서 그 최고점을 갖는 분포를 갖는다. 그러나 반경방향 및 접선방향 난류성분은 재순환 영역 중심부에서 그 최고점을 갖고 주위로 가면서 급격히 감소하는 특성이 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) A.D. Gosman, W.M. Pun, A.K. Runchal, D.B. Spalding and M. Wolfstein, "Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows", Academic Press, 1969
- (2) B.E. Launder, D.B. Spalding, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computer Methods in Applied Mechanics, 3, 1974
- (3) A.D. Gosman, E.E. Khalil, J.H. Whitelaw, "The Calculation of Two Dimensional Turbulent Recirculating Flows", Turbulent Shear Flows 1, Springer-Verlag, 1979
- (4) R. Borghi, and P. Moreau, "Acta Astron.", 4, p. 321, 1977
- (5) H.D. Shin, T. Takagi, and A. Ishio, "Properties of Turbulence in Turbulent Diffusion Flames", Combustion and Flame, 40, p.121, 1981