

〈論 文〉

# 축대칭 급확대관으로 분사되는 난류분사류의 초기유동 특성

김동식\* · 한용운\*\*

(1994년 6월 23일 접수)

## Initial Flow Characteristics of the Turbulent Circular Jet Discharging into the Sudden Expansion Pipe

Dong Sik Kim and Yong Oun Han

**Key Words :** Sudden Expanding Pipe(급확대관), Similarity Law(상사법칙), Centerline Characteristics(중심선 특성), Anisotropy(비등방성)

### Abstract

The initial flow characteristics of the turbulent circular jet discharging into the sudden expansion pipes have been investigated by the hot wire anemometry. Evolutions of similarity, centerline behavior, jet boundary and typical turbulent quantities were looked into for the expansion ratios. The results show that the spreading rates of discharging jet seem not to be dependent of the expansion ratio and that the velocity profiles in the radial directions exhibit the similarity in the regions, 2-5d, 2-6d and 3-8d for the corresponding expansion ratios of 2, 3 and 5, respectively. With the increase of expansion ratio the centerline velocity decays rather slowly. The anisotropic behaviors of the discharging jets into the sudden expansion pipe look stronger than those of the free jet.

### 1. 서 론

급격히 확대되는 관에서의 난류유동은 노즐 끝에서 발생하는 전단효과에 의해 유동의 박리, 재순환과 재부착으로 특징 지워지는 복잡한 내부 유동이다. 이런 유동현상은 열교환기, 머플러, 배관 등에서 유동의 질을 저하시키는 문제와는 상관없이 단면 변화가 요구될 때나, 연소로의 연소과정에서와 같이 화염유지나 연료, 공기혼합을 위해 인위적인 장치로서 사용된다.

급확대관 유동은 큰 속도섭동으로 난류 운동에너지의 확산이 활발한 분리유선(separation streamline)을 경계로 대체로 2개의 주요 영역으로 나눌

수 있다. 즉, Fig. 1에 도시된 바와 같이, 하나는 급격히 확대된 후 유동이 박리되어 평균 속도는 낮지만 높은 난류강도를 나타내는 재순환 유동영역(recirculation region)이고, 다른 하나는 중심선 부근의 주유동영역(main flow region)이다. 실제 공학적으로 많이 사용되고 있는 축대칭형 급확대관은 형상의 급격한 변화에 의해 중심유동의 입장에서 볼 때 초기에 분사류의 형태를 갖는다. 이때, 분사류가 가지는 분사각, 유량, 분류 경계면, 전단 구조, 난류구조, acoustic coupling 및 열전달효과, 연소로 중형비 등은 분사류 초기의 유동 발달 구조에 대하여 매우 민감하게 반응하므로 분사류 초기의 유동상태에 대한 세밀한 분석이 요구된다.<sup>(1,2)</sup>

Yang<sup>(3)</sup>은 확대되는 모형 연소기에서 유동의 특성과 운동을 실험적으로 연구하였으며, Moon<sup>(4)</sup>은

\*정회원, 포항전문대학 자동차과

\*\*정회원, 영남대학교 기계공학과

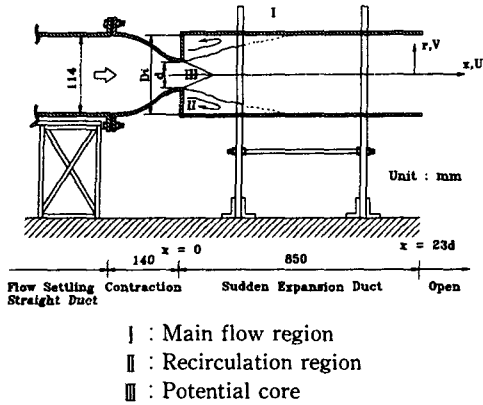


Fig. 1 Schematics of experimental setup and coordinate system

직경이 급격히 증가하는 연소로의 확대비가 1.4인 경우에 재순환 유동의 운동에 대해 실험 및 해석적으로 연구 하였다. Teyssandier<sup>(5)</sup>는 Borda-Carnot 형 확대에 대해 벽면 압력을 측정하여 재부착점은 확대비가 클수록 더 하류(downstream)에서 일어난다는 것, 포텐셜 코어는 upstream에서 끝나는 것을 보여주고 있다. Ha Minh 등<sup>(6)</sup>은 급격한 경계조건 변화에 갖는 유로에서, 난류 유동구조의 재형성에 대해 실험과 이론적 고찰을 통하여 전단층 구조는 급확대원관이 계단진 덕트관보다 더 빨리 성장한다는 것을 보여 주고 있다. Durst 등<sup>(7)</sup>은 원관 속에 축대칭 링형태의 수축부를 두고 유동 통로를 축소 및 확대시킨 장치의 실험에서, 중심선상의 특성치들은 Re No.가 1000 이상일 때 상사성은 Re No.에 무관함을 보여주고 있다. 한편, Stieglmeier 등,<sup>(8)</sup> Chaturvedi<sup>(9)</sup>은 축대칭 디퓨저의 각도 변화에 따른 유동구조의 발달변화과정 및 난류 생성(production)에 대한 연구결과를 발표하였다.

이렇듯이 대부분의 연구가 확대비가 2배 이하인 경우 재순환 영역내에서 LDV<sup>(10,11)</sup> 또는 열선풍속계장치 및 가시화실험으로 난류 유동구조와 재부착거리 측정에 주안점을 두고 있다. 그러나, 이러한 급확대관의 유동 해석결과는 실제적으로는 앞에서 본 바와 같이 연소기내의 연료분사 등과 같이 중심 유동의 초기에 발달되는 분사류 특성에 의한 적용예가 훨씬 많기 때문에 초기에 분사류가 전개되는 모습이 확대비 변화에 따라 어떻게 변할 것인지 보는 시각이 오히려 중요하다. 한편, 지금까지 다양한 확대비 변화에 따른 유동구조 변화에 대해서는 구조 변경에 따른 실험의 번거로움과 실험 시간이

매우 길어져서 나타나는 실험조건의 일관성 유지가 어렵기 때문에 확대비 변화에 따른 연속된 자료가 제시되지 못하고 있으며, 특히 큰 평균속도 구배와 높은 난류성분을 함유하여 에너지 변환이 주로 일어나는 난류전단층(turbulent shear layer)의 성장과 중심유동에 대한 자세한 분석과 초기의 분류특성에 대한 세밀한 분석이 결여 되어 있다.

따라서, 본 연구에서는 열선풍속계를 사용하여 축대칭 급확대관에서, 확대비를 변화시키면서 초기 영역에서의 평균속도와 난류속도 성분들의 변화과정을 측정하고, 이들 특성치들을 이용하여 상사성을 적용할 수 있는 영역이 존재할지를 분석하고 평균속도 및 난류성분의 중심선 속도 감쇠 등을 분석하여 확대비 변화에 따른 확대관 초기의 난류분사류들의 유동 특성에 대하여 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

유동 발생장치는 원심식 송풍기, 유동 전개부, 1차 수축부, 유동 안정화장치, 2차 수축부를 가지며, 이 수축부의 끝에 원형 급확대관을 부착하여 분사류가 전개되도록 구성하였으며, 이 급확대관은 떼었다가 붙일 수 있도록 하였다. 송풍기는 5마력 원심식으로 인버터 콘트롤 방식으로 팬의 회전수를 조절하여 유동속도를 조절한다. 송풍기 출구에서부터 내경 39 cm의 원형관으로 확대된 전개부에서는, 기계적인 노이즈 감소와 유동을 안정화시키기 위해 스크린과 Straw honey-comb(내경 0.45 cm)을 각각 2개소에 전 단면에 꼭 차도록 설치하였고 이어서 1차 수축부가 연결되도록 하였다. 입구 내경 39 cm, 길이는 입구 직경의 1.5배인 1차 수축부는 Morel형으로 제작되었으며, 면적비 13:1이며, 하류 22 cm 위치에 1차 Screen을, 22 cm 위치에 길이 5 cm짜리 Straw를, 이후 20 cm 위치에 정교한 2차 Screen을 설치하였다. 이후 50 cm 구간을 두어 관내 완전발달 유동이 되도록 유동을 안정화시켰다. 이후 입구내경 11.4 cm, 길이는 입구 내경의 1.2 배로 한 2차 수축부도 Morel형으로 알루미늄으로 제작하였고, 면적에 대한 수축비가 9:1이 되도록 하였다. 이후, 90°로 급확대되는 축대칭 원관의 직경  $D_2$ 는 노즐 출구직경  $d$ 와의 비  $D_2/d$ 가 2, 3, 5으로 하였으며, 확대 원관의 축방향 길이  $L$ 은 노즐 직경의 23배로 하였다. 지지대로 확대관을 견고하게 지지하므로써, 확대관의 무

계가 노즐에 직접 미치지 않도록 하며 유동에 의한 진동 등에 대비하여서 장치 하였다. 이 확대 원관 이후의 유동은 주위 정지유체속으로 그대로 분출되도록 하였다. (Fig. 1)

평균속도 및 난류성분의 계측은 2채널의 정온형 열선풍속계(CTA; KANOMAX 7000)로 하였으며, 열선(hot wire)은 직경  $5\mu\text{m}$ , 유효 측정길이 1.2 mm인 I-자 및 X-자형 텅스텐 열선을 사용하였다. 센서에 의한 출력신호들은 가변증폭기(KYOWA, DA-360A) 및 저역 주파수 필터(KANOMAX 1015)를 통하여 정류된 신호로 바뀐 후 15비트(회상력 0.3 mV)의 A/D 변환기에 연결 되고 이에 온-라인된 IBM 호환 PC에 의해 수치 처리 되었다. 열선의 보정은 다항식 원리에 의하여 4차식으로 가정하였으며, 방향 민감도는 수정 코사인법칙을 사용하였다.

Probe의 이송은 2차원 이송장치를 사용하였고 축방향 및 반경방향으로 이송하였다. 축방향 이송은 9 또는 13단계로  $x=1d\sim 22d$ 까지 하였으며, 반경방향 이송은 그 각 단계에서 한쪽 반경방향으로 15포인트에서 25포인트 되게 이송하였다. 중심선 부근과 큰 전단이 예상되는 반경방향으로  $r=0.5d$  부근에서는 1mm~2mm로 하고, 이 외에는 4~20 mm 간격이 되도록 이송시켰다.

저역 주파수 필터를 통한 신호를 A/D 변환기와 병렬 연결된 동적 신호분석기(HP 3562A)로 유동의 상태를 관찰하고, 적분시간 척도(integral time scale)는 이 분석기의 스펙트럼으로 연산된 시간에 2배의 안전도를 주었다. 그래서 0.1초(sampling frequency 10 Hz)의 빠르기로 데이터를 추출했으며, 실험시간과 신뢰도를 고려하여 한 측정점에서의 데이터 추출수는 2048개 씩으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

평균속도 및 난류성분들은 열선 센서들을 분류 축방향의 여러 위치마다 중심축에서 반경방향으로 급확대관의 벽면 부근까지 이동시킴으로 측정되었다. 세 종류의 확대관을 교체할 때마다 하류의 배경압력 효과가 달라지기 때문에 각각의 경우에 노즐 출구에서의 유동조건은 유량을 조절하여 동일하게 유지시켰다. 상류에서 전달되는 교란은 하류의 박리 경계층과 고유구조(coherent structure)에 영향을 미치므로 일관성 있는 초기 조건을 설정할 필

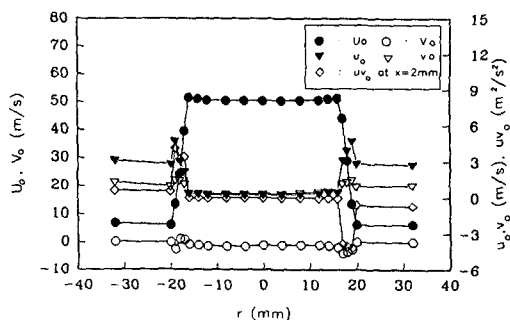


Fig. 2 Initial flow condition of turbulent circular jet discharging into the sudden expansion pipe with diameter ratio of 2 at the nozzle exit

요가 있다. 이를 위하여 특히, 유동이 축대칭이 되도록 유동중심을 잡는데 많은 노력을 들였으며 또한, 각 확대비에 따라 초기 조건이 가능한 갈도록 하였다. Fig. 2는 확대비 2일 경우에  $x=2\text{mm}$ (약  $0.05d$ )인 노즐 출구에서 측정된 유질을 나타내고 있으며 난류강도가 0.3~0.5%의 크기를 보였다. 또한, 중심에 대하여 평균속도와 난류강도는 대칭성을 유지함을 보였고 노즐 끝(edge)에서부터 바깥의 데이터를 무시하면 평균유속은 약 2%의 불균일 분포를 보였다. 확대비가 3 및 5일 경우에도 유사한 분포를 보였다.

#### 3.1 평균속도

평균속도  $U(r)$ 는 노즐중심에서의 분출속도  $U_0$ 로 무차원화 시켜 무차원 유동거리  $x/d$  및 각 확대비 변화에 따라서 발달되어 가는 과정을 Fig. 3에 나타냈다. 분사류를 발생시키기 위하여 사용된 노즐내부의 곡면을 따라 형성되는 유선은 급확대관으로 빠져 나옴에 따라 노즐 끝에서 수축 및 가속되는 영향에 의하여, 확대비에 상관없이 평균유속의 분포는 약  $2d$ 까지 Tophat형태의 속도 분포를 나타낸다. 또한, 확대비가 2, 3, 5배의 각각의 경우에 대하여 약  $10d$ ,  $12d$ ,  $16d$  정도 하류에서 비교적 균일한 유동분포를 갖는 것으로 판단할 때, 확대비가 작을수록 벽면의 영향을 일찍 받는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, Tophat분포에서 균일분포로 전개되는 구간은 확대비에 따라 달라지며 확대비가 커질수록 긴 전개구간을 갖는 것을 보이고 이 구간에서는 정규분포에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이들의 결과로 볼 때, 확대비에 따라서 기하학적인 상사이론을 적용할 수 있는 구간이

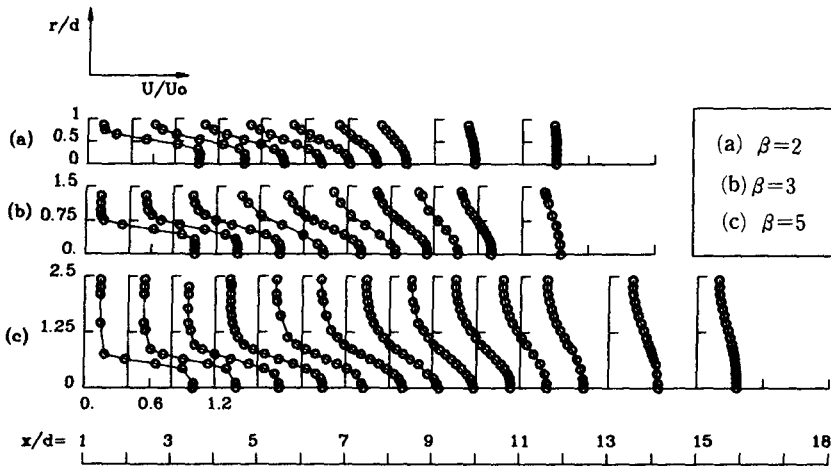


Fig. 3 Evolutions of axial mean velocities in the downstream direction for the expanding ratios of 2, 3 and 5, respectively

달라짐을 알 수 있다.

3.2 난류분포

확대비 변화에 따른 분류방향 및 반경방향 난류강도  $u$ ,  $v$  들은 노즐 출구속도  $U_0$ 로 무차원화 되어 각각 Figs. 4, 5에 도시 되었다. Fig. 4의 분류방향 난류성분들의 발달특성을 보면, 노즐 출구에서 매우 낮은 값을 나타내었던 난류강도는 초기의 전개구간으로 들어가면서 커지며 각각의 확대비 2, 3, 5에 대응하여 반경방향으로는  $0.54d$ ,  $0.65d$ ,

$0.76d$  분류방향으로는  $4d$ ,  $5d$ ,  $9d$  들의 위치에서 최대값들이 나타나는 것을 알 수 있다. 이 부근은 노즐의 끝효과에 의한 전단력의 발생으로 난류에너지가 활발하게 발생하는 영역으로 판단이 되며 이러한 추세는 확대비가 커질수록 후방까지 좀 더 지속되는 것으로 설명된다. 또한, 전개구간의 전단층에서 발생된 활발한 난류에너지는 확대비가 커질수록 중심 및 반경방향으로 쉽게 확산이 되고 확대비 2인 경우에 비교해 볼 때, 난류분포들은 확대비가 커감에 따라 최대값들은 작아지나 폭 넓게 분포하

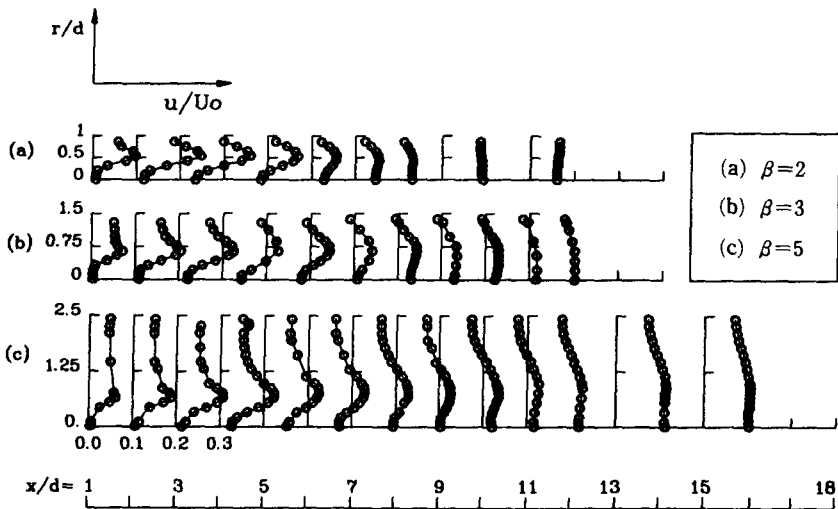


Fig. 4 Evolutions of axial turbulent intensities in the downstream direction for the expanding ratios of 2, 3 and 5, respectively

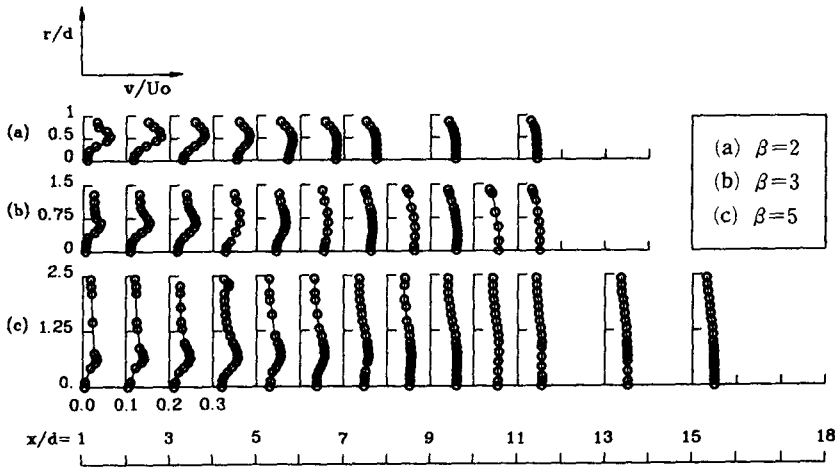


Fig. 5 Evolutions of radial turbulent intensities in the downstream direction for the expanding ratios of 2, 3 and 5, respectively

는 특징을 보였다.

한편, 반경방향의 난류강도는 성장과정이 Fig. 5에서 보듯이 분류방향 난류강도와 유사한 변화 추세를 보이지만 그 크기는 2, 3, 5의 각각의 확대비에서 분류방향 최대값들과 비교해 볼 때, 51%, 54%, 54% 크기로 나타나 거의 절반의 세기를 보임을 알 수 있다. 이 위치에서의 비등방성률이 클 것으로 생각된다.

### 3.3 Reynolds 응력

각 확대비에 있어서의 Reynolds 응력에 대한 성

장 과정을 Fig. 6에 나타냈다. 난류강도와 비슷한 경향으로, 노즐 선단 부근에서는 전단유동(shear flow)이 급하게 성장함으로써 하류로 갈수록 침탐형상으로 증가하다가 더욱 하류로 갈수록 넓게 퍼지는 만큼 그 크기는 감소해져 가는 것을 볼 수 있다. 각 경우 전단력의 최대값과 그 때의 반경방향 거리는  $x=(4-9)d$  사이에서 최대값  $\overline{u'v'}/U_0^2=0.007$ 을 가지며, 이는 Yang<sup>(3)</sup>의 급확대 바로 뒤에서의 값 0.0245보다 더 낮은 값을 나타낸다. 이것은 본 실험에서는 초기에 곡면을 갖는 노즐을 사용했기 때문에 직선관을 사용한 Yang의 실험결과 보다

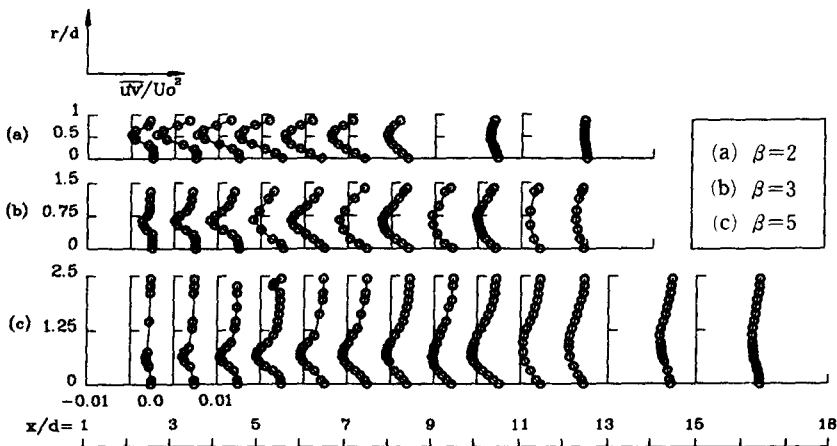


Fig. 6 Evolutions of Reynolds stresses in the downstream direction for the expanding ratios of 2, 3 and 5, respectively

초기 응력이 매우 작은 상태부터 시작했기 때문인 것으로 판단된다. 그림에서 보듯이, 확대비가 작을수록 초기의 난류응력이 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 작은 관이 초기에 배압효과 보다는 와형식(eddy formation) 생성에 의한 저항이 훨씬 크고 따라서, 균질유동으로 전환되기 위하여 짧은 기간 동안 빨리 전개되기 위한 유동구조를 갖는다는 것을 암시한다.

### 4. 상사성의 적용

일반적으로 급확대관의 초기 영역에서는 노즐 끝에서의 유동박리, 고유구조(coherent structure) 형성 등의 자유분사류의 유동특성에 제한된 확대관의 벽면에 의한 재순환, 재부착 등의 문제가 부가되어 매우 복잡한 유동구조로 전개된다. 재순환, 재부착으로 보는 시각은 Mixing 효율을 높이기 위한 관점인데 반하여 분사류 특성은 제한된 영역 내에서 얼마나 쉽게 확산되어 가느냐를 보는 관점이다. 연소실과 같은 문제에서는 후자의 관점이 오히려 중요하다. 본 연구에서는 후자에 의미를 두는 관점이기 때문에 자유분사류<sup>(12)</sup>의 초기유동 해석방식을 이용하여 급확대 유동에 상사성 해석방식을 적용시켜 본다.

#### 4.1 속도반폭 및 분류경계

분류방향의 각 위치에서 평균속도 분포  $U(r)$ 의 값이 중심속도  $U_c$ 의 0.5배가 되는 반경방향 위치를  $r_{1/2}/d$ 으로 정의하여<sup>(13)</sup> 속도반폭  $r_{1/2}/d$ 의 분포를 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 보듯이 확대비와는 무관하게 성장하는 것을 볼 수 있으며 특

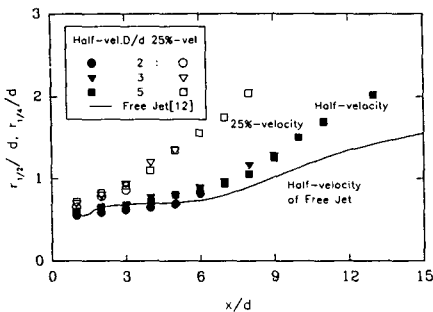


Fig. 7 Spreading rates of half-velocity widths and quarter-velocity widths for expanding ratios of 2, 3 and 5, respectively

히, 자유분사류 보다 더 큰 기울기로 성장하는 것을 볼 수 있다. 이는 자유분사류의 경우에 대하여 확대관 초기에 유동의 재순환을 유발하는 흡입압력이 존재함을 보여 준다. 각 확대관의 경우 분리거리들이 각각 6d, 9d, 13d 이후에는 벽면의 반향 효과에 의하여 벽면근처의 평균속도가 이미 중심속도의 50%를 넘어 속도반폭을 감지할 수가 없었다.

급확대관에서는 벽면의 영향때문에 자유분사류의 경우와 같이 분류경계를 잡기가 용이하지 않다. 특히, 방향성에 대하여 둔감한 열선풍속계 센서로는 급확대관 초기의 순환유동을 잡을 수가 없다. 그렇지만, 전단층(mixing layer)의 폭이 서서히 자라가는 추세는 확실히 보이기 때문에 중심속도의 약 25%의 속도를 갖는 위치를 이용하여 대략의 분류경계를 예측해 보았다. 이들의 결과는 보통 중심속도의 5~10%의 속도 크기를 갖는 점들을 분류경계로 잡는 경우들<sup>(12,14)</sup>에 비하여 매우 개략적이지만 비교적 근사한 관계를 얻을 수가 있다. 또한, 그림에서 보듯이 각 확대비의 경우 분류방향 거리들이 각각 3d, 5d, 8d 이후에는 계측이 불가능했지만 초기에 전개되는 추세와 속도반폭들의 결과로 유추해 볼 때, 확대비에 무관한 분류경계가 형성될 가능성을 보여준다.

#### 4.2 평균속도의 상사성

계측된 속도반폭과 분류경계의 개략을 기초로 하여 판단할 때, 급확대관에서도 비록 구간의 차이는 있지만 초기에 상당한 구간 동안 상사성이 존재할 것을 쉽게 예측할 수 있으므로 평균 유속분포에 중첩원리를 적용시켜 보았다. Fig. 3에서 제시된 자료에서 특히 확대비 5인 경우를 살펴보면 중심을 따라서 압력에 의한 영향보다는 초기에 분출된 유동에 의한 모멘텀의 크기가 노즐끝( $r_0$ )을 경계로한 내부에서 하류로 가면서 상당한 구간동안 연속되는 것을 관찰할 수 있으므로 다음과 같은 상사변수를 선택했다.<sup>(12,15)</sup> 즉,

$$\frac{U(r)}{U_c} = f(\eta)$$

$$\eta = \frac{(r - r_0)}{x}$$

여기서,  $U(r)$ 은 반경  $r$  위치에서 유동방향의 속도,  $U_c$ 는 축방향 중심선의 평균속도,  $r_0$ 는 노즐 출구 반경이고  $x$ 는 유동방향에서 여러 측정 위치

즉,  $1d, \dots, 15d$  등의 분류방향 거리를 나타낸다. 각각의 확대비에 대한 무차원 속도분포를 Figs. 8~10에 도시 하였다. 그림에서 보듯이 위의 상사변수 선택은 자유분사류가 속도반쪽이나 적분반쪽을 사용한 경우<sup>(12)</sup>에 비하여 확대관의 제한면에 의한 영향을 잘 반영할 수 있는 변수로 선택 되었음을 보여 주고 있다. 이들의 그림에서 나타난 속도 분

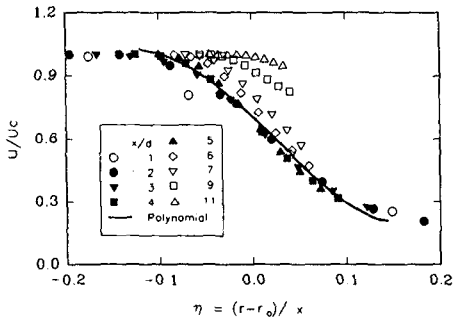


Fig. 8 Similarity consideration of axial mean velocities in the radial direction for expanding ratio of 2

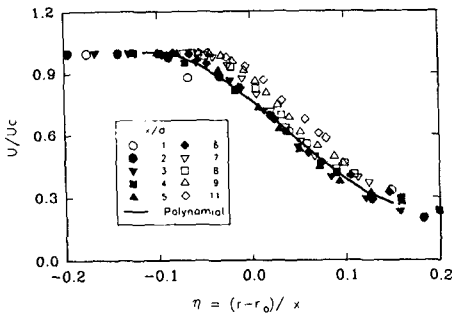


Fig. 9 Similarity consideration of axial mean velocities in the radial direction for expanding ratio of 3

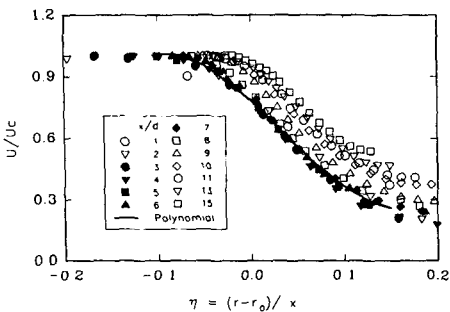


Fig. 10 Similarity consideration of axial mean velocities in the radial direction for expanding ratio of 5

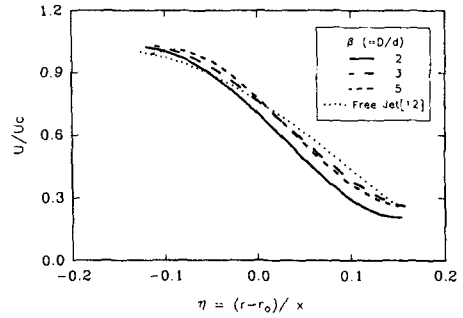
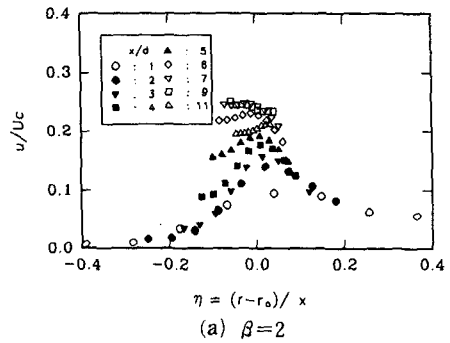
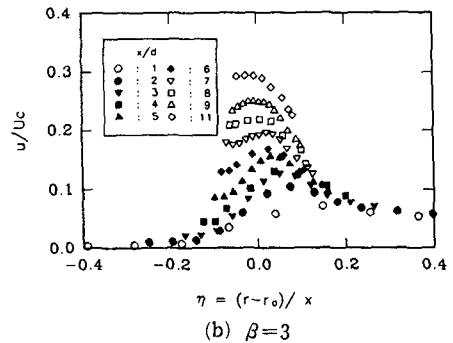


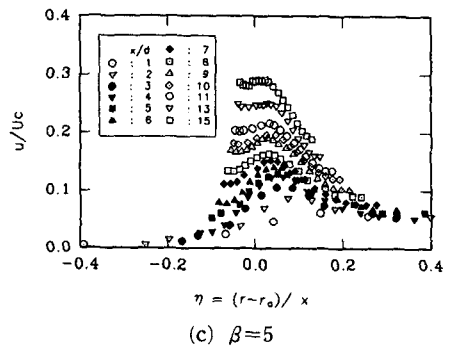
Fig. 11 Comparison of axial mean velocity similarity using their polynomial curves



(a)  $\beta=2$



(b)  $\beta=3$



(c)  $\beta=5$

Fig. 12 Similarity consideration of axial turbulent intensities in the radial direction for expanding ratios of (a) 2, (b) 3 and (c) 5

포들 중에서 중첩이 가능한 부분을 검게 칠하여 상사성이 존재하는 영역을 예측했다. 확대비 2인 경우는 분류방향으로  $2d \sim 5d$ 까지 무차원속도의 중첩성을 유지하였고 3인 경우는  $2d \sim 6d$ 까지, 5인 경우는  $3d \sim 8d$ 까지 중첩성능이 우수함을 보였다. 이들의 중첩 자료들 만을 이용하여 4차 다항식 곡선을 그린 결과들을 Fig. 11에 도시하였다. 벽면효과로 급확대관은 평균속도 분포에서 전단층이 급한 경사를 갖는 반면 자유분사류는 상대적으로 완만한 변화를 나타낸다. 따라서, 평균속도의 경우는 초기의 확대비가 커짐에 따라서 상당한 구간 동안에 상사법칙이 적용될 수 있는 구간이 존재함을 확인하였다.

한편, 난류강도에 대한 중첩성을 같은 원리를 통해 적용시켰지만 결과는 같은 영역에서 상당히 이산된 모습을 보이고 있어서 급확대관 유동에서는 난류강도에 대하여는 상사원리가 적용되는 구간이 없음을 보여 주고 있다. (Fig. 12(a), (b), (c)) 이들의 결과는 자유분사류에서는 상당한 중첩 가능성을 보인데 비해 벽면효과에 의한 난류강도의 변형이 훨씬 더 활발하게 이루어 지고 있음을 나타낸다.

### 5. 중심선축 유동특성

확대비가 2, 3, 5배로 변할 때, 중심속도의 변화 추세를 Fig. 13에 도시하였다. 2의 경우에 약  $12d$  근처 까지 감쇠한 다음 일정한 속도로 유지되고 3의 경우는  $17d$  근처, 5의 경우는 충분한 데이터를 얻지 못했지만  $22d$  근처로 전망된다. 또한, 이들은 확대비가 작을수록 급한 감쇠를 나타내어 빨리 균질유동으로 전개되고 있음을 보여주고 있다. 이

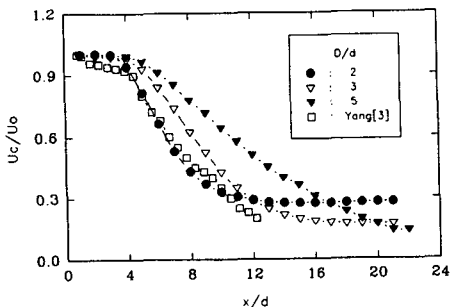


Fig. 13 Evolution of centerline mean velocity along the axes of sudden expansion pipes

현상은 Yang 등<sup>(3)</sup>이 예측한 확대비가 클수록 감쇠율이 크다는 조건과 상반되는 것으로 밝혀졌다. 이 사실은 확대비가 커질수록 초기의 분사유동 효과가 오래 지속되어 자유분사류의 경우 처럼 완만한 중심속도 감쇠가 이루어지는 것으로 판단된다. 따라서, Yang 등의 예측은 확대비가 2.7의 경우에 대한 실험을 기초로하고 다른 자료의 경우는 확대비가 2~3 근처의 기존의 몇몇 단편적인 결과들만 가지고 비교 해석한 결과의 오류로서 판단된다.

중심선을 따라서 난류강도의 변화추이를 분류방향 성분은 Fig. 14에 반경방향 성분은 Fig. 15에 각각 도시 하였다. 분류방향 난류성분들은 확대비가 2인 경우가 초기에 가장 큰 값을 나타냈고 또한 일찍 쇠퇴하여 가는 추세를 보였고 확대비가 커질수록 최대값은 하류에서 나타나고 절대크기도 작아지며 전체적으로 완만하게 쇠퇴해 가는 것을 볼 수 있다. 반경방향 난류성분들도 역시 유사한 추세를 보이고 쇠퇴해가지만 절대 크기들은 분류방향 성분에 비하여 매우 작아서 비등방성율은 자유분사류에 비하여 월등히 커진다. 자유분사류에서  $u^2=2v^2$ 의

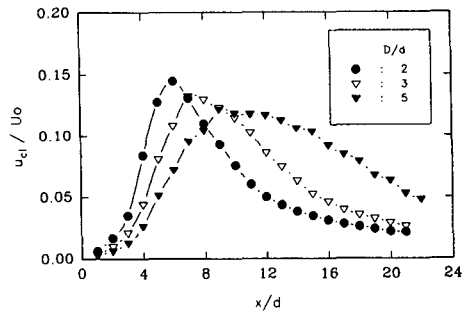


Fig. 14 Evolution of axial turbulent intensities along the axes of sudden expansion pipes

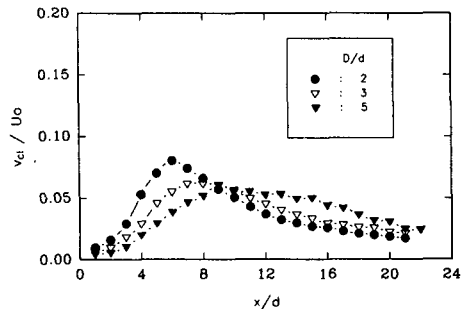


Fig. 15 Evolution of radial turbulent intensities along the axes of sudden expansion pipes



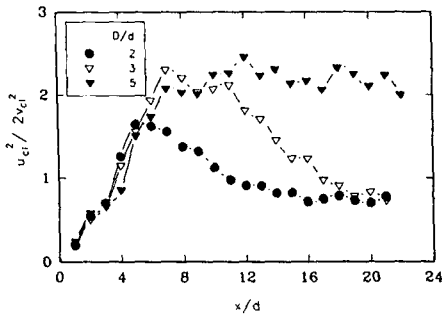


Fig. 16 Anisotropic behaviors of centerline turbulences in terms of the relation of  $u^2/2v^2$

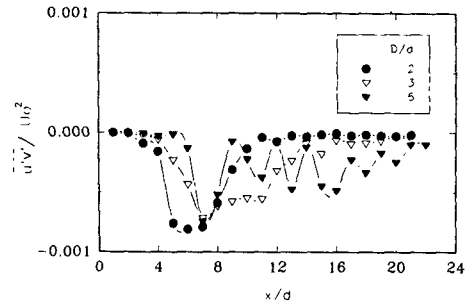


Fig. 18 Evolution of Reynolds stresses along the axes of sudden expansion pipes

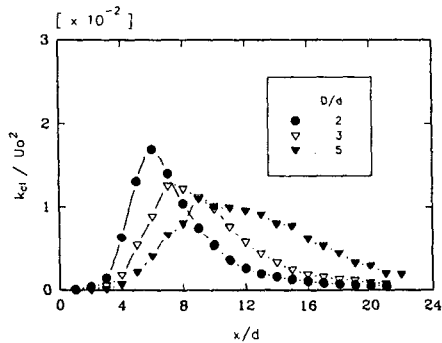


Fig. 17 Evolutions of turbulent kinetic energies along the axes of sudden expansion pipes

비등방성(Anisotropy) 구조<sup>(17)</sup>를 보인 것에 비해서  $u^2 > 2v^2$ 로 계산되기 때문에 확대관의 벽면효과에 의해 전개구간에서 훨씬 강한 비등방성 난류 구조를 갖고 있음을 말해준다. (Fig. 16)

이러한 현상은 급확대관의 벽면효과가 반경방향의 난류생성에 중심까지 영향을 미치고 있다는 사실을 입증해 주고 있다. 이들의 결과들을 이용하여 난류 운동에너지의 발달과정을 Fig. 17에 나타냈다. 그림에서 보듯이 확대비에 따라 달라지지만 초기에 상승했다가 감쇠하면서 먼 하류에서는 무차원화된 난류에너지의 크기들은 확대비에 상관없이 특정한 값에 수렴할 가능성을 볼 수 있었다.

Reynolds 응력 분포들은 결과들이 충분한 통계적 수렴성을 보이진 않았지만 확대비가 작을수록 초기에 왕성한 난류생성을 갖고 있음을 보여주고 있고 하류로 감에 따라 세 경우 모두 비슷한 수준의 미세한 크기로 바뀌는 것으로 미루어 보아 중심에 있어서의 난류생성은 초기(4d~20d)에 이미 대다수 이루어짐을 보이고 있다. (Fig. 18)

위의 난류특성들의 결과로 유추해 보면, 일반적으로 확대비가 클수록 수직단면의 전체 영역에서는 난류에너지의 생성이 활발해질 것으로 알려져 있지만 중심유동의 경우는 초기에 거의 상반된 양상을 보이고 있다. 이러한 현상은 확대비가 작을수록 초기에 배압의 영향을 쉽게 받지만 큰 경우는 초기에 분사류의 모멘텀의 영향이 훨씬 커서 배압조건이 무시되는 이유로 해석된다.

## 6. 결 론

급확대관으로 분사되는 축대칭 비압축성 유동장의 초기난류 특성을 조사하기 위하여 2, 3, 5배의 확대비 변화에 따른 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

초기에 발달되는 속도반쪽이나 분류경계들은 확대비에 상관없이 발달되는 것으로 확인되었다. 확대비가 2인 경우에 2~5d 구간에서 분류방향 평균 속도 분포가 반경방향으로 상사성을 갖는 것으로 확인 되었으며 3배의 경우는 2~6d, 5배의 경우는 3~8d 구간에서 상사성을 갖는다. 또한 이들의 중첩 구간에서는 확대비에 상관없는 속도분포의 상사성이 존재함을 밝혔다. 확대비가 커질수록 중심속도 감쇠는 완만하게 이루어졌다. 또한, 확대비가 작은 경우가 오히려 초기에 중심 난류강도가 크게 나타나고 일찍 소멸되었으며 급확대관의 비등방성 질은 벽면효과에 의해 자유분사류보다 크게 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 첨단유체

공학연구센터(AFERC)의 일부지원에 의해 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Back, L. H. and Roschke, E. J., 1972, "Shear-Layer Flow Regimes and Wave Instabilities and Reattachment Lengths Downstream of an Abrupt Circular Channel Expansion<sup>1</sup>," *J. of Applied Mechanics, Trans. ASME*, Vol. 94 E, pp. 677~681.
- (2) Drewry, J. E., 1978, "Fluid Dynamic Characterization of Sudden-Expansion Ramjet Combustor Flowfields," *AIAA J.*, Vol. 16, No. 4, pp. 313~319.
- (3) Yang, B. T. and Yu, M. H., 1983, "The Flow-field in a Suddenly Enlarged Combustion Chamber," *AIAA J.*, Vol. 21, No. 1, pp. 92~97.
- (4) Moon, L. F. and Rudinger, G., 1977, "Velocity Distribution in an Abruptly Expanding Circular Duct," *J. of Fluids Eng., Trans. ASME*, Vol.99, No. 1, pp. 226~230.
- (5) Teysandier, R. G. and Wilson, M. P., 1974, "An Analysis of Flow Through Sudden Enlargements in Pipes," *JFM*, Vol. 64, Part1, pp. 85~95.
- (6) Ha Minh, H. and Chassaing, P., 1977, "Perturbation of Turbulent Pipe Flow," *Turbulent Shear Flow 1*, eds. Durst, F., Launder, B. E., Schmidt, F. W., Whitelaw, J. H., Springer-Verlag, pp. 178~197.
- (7) Durst, F., Founti, M. and Wang, A. B., 1987, "Experimental Investigation of the Flow Through an Axisymmetric Constriction," *Turbulent Shear Flow 6*, eds. Andre, J.-C., Cousteix, J., Durst, F., Launder, B. E., Schmidt, F. W., Whitelaw, J. H., Springer-Verlag, pp. 338~350.
- (8) Stieglmeier, M., Tropea, C., Weiser, N. and Nitsche, W., 1989, "Experimental Investigation of the Flow Through Axisymmetric Expansions," *J. of Fluids Eng., Trans. ASME*, Vol. 111, pp. 464~471.
- (9) Chaturvedi, M. C., 1963, "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansions," *J. of Hydraulics Division*, Vol. 89, May, pp. 61~92.
- (10) Stevenson, W. H., Thompson, H. D. and Craig, R. R., 1984, "Laser Velocimeter Measurements in Highly Turbulent Recirculating Flows," *J. of Fluids Eng., Trans. ASME*, Vol. 106, pp. 173~180.
- (11) Freeman, A. R., 1975, "Laser Anemometer Measurements in the Recirculating Region Downstream of a Sudden Pipe Expansion," *Proc. LDA Symposium*, Copenhagen, pp. 704~709.
- (12) 김동식, 한용운, 1992, "축대칭 자유분사류의 초기유동 특성에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제20권, 제1호, pp. 95~108.
- (13) Wygnanski, I. and Fiedler, H., 1969, "Some Measurements in the Self-Preserving Jet," *JFM*, Vol. 38, Part 3, pp. 577~612.
- (14) Wall, T. F. et al, 1980, "Direct Measurements of the Entrainment by Single and Double Concentric Jets in the Regions of Transition and Flow Establishment," *Trans. J. of Chemical Engineering*, Vol. 58, pp. 237~241.
- (15) Davies, P. O. A. L., Fisher, M. J. and Barratt, M. J., 1962, "The Characteristics of the Turbulence in the Mixing Region of a Round Jet," *JFM*, Vol. 15, pp. 337~367.
- (16) 한용운, 남경덕, 1992, "상류 유동 전개부, 수축부 및 자유분사류로 이어지는 유동장에서의 난류에너지 천이에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제12호, pp. 2368~2375.
- (17) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Edition, McGRAW-HILL, New York.