

<論 文>

## 동축 이중제한분류의 상사성에 대한 실험적 연구

사용철\* · 이태환\* · 이준식\*\*

(1994년 8월 3일 접수)

### An Experimental Study on the Similarity of Confined Coaxial Jets

Yong-Cheol Sa, Tae-Hwan Lee and Joon-Sik Lee

**Key Words :** Confined Coaxial Jets(동축 이중제한분류), Similitude Parameter(상사매개변수) Form Factor(형태인자)

#### Abstract

In confined coaxial jets, the flow-mixing characteristics depend on the initial conditions at the nozzle outlet such as velocity ratio and nozzle radius ratio. In this study, nozzle radius ratio(inner/ outer) was 0.3. Longitudinal axial velocity, turbulent intensity and Reynolds shear stress were measured by CTA. Measurements were made from the duct inlet to the region where similarity solution could exist. This study investigated flow characteristics according to the variation of similitude parameter which was derived from the theory of Craya-Curtet. The range of similarity region depends on the variation of the similitude parameter. The form factor obtained from the axial velocity profile in the similarity region was constant. The higher the similitude parameter, the wider the spread rate of the jets. Due to this fact, the similarity conditions developed more quickly and the region where the similarity holds became narrow. Present experimental data confirmed the validity of Craya-Curtet theory.

기 호 설 명			
$D$	: 원관의 직경	$k$	: 형태인자
$f$	: 무차원 과잉속도	$l$	: 유효반경
$F_1(x, \eta)$	: $\int_0^\eta 2\eta f d\eta$	$m$	: Craya-Curtet의 상사파라미터
$F_2(x, \eta)$	: $\int_0^\eta 2\eta f^2 d\eta$	$P$	: 압력
$G$	: 형태인자	$q$	: 과잉유량
	$\frac{1}{4G_1} = \int_0^{\eta_a} fF d\eta$	$Q$	: 전체유량
	$\frac{G_2}{G_1} = \int_0^{\eta_a} (F_2 - kF_1) d\eta$	$r$	: 반경방향거리
	$\frac{G_3}{G_1} = \int_0^{\eta_a} \eta f d\eta$	$r_i$	: 내측 노즐출구반경
		$r_o$	: 원관의 반경
		$R_q$	: 과잉유량비
		$U$	: 축방향 평균속도성분
		$U_a$	: 축방향의 주위속도
		$U_d$	: 축방향의 과잉속도
		$U_j$	: 축방향의 노즐출구에서의 중심속도
		$U_m$	: 축방향 평균속도의 면적평균 $Q/A_o$

\*서울대학교 대학원 기계공학과

\*\*정희원, 서울대학교 기계공학과

$U_0$	: 축중심에서 축방향 과잉속도
$u$	: 축방향의 순간속도의 rms값
$v$	: 반경방향 순간속도의 rms값
$x$	: 노즐출구부터 축방향거리
$\eta$	: 무차원 반경방향좌표
$\sigma$	: 식(7)에 의해 정의되는 전단응력계수
$\rho$	: 밀도
$\tau$	: $-\rho u'v'$ 전단응력
$\xi$	: $\int_0^x \frac{\sigma}{r_0} dx$ 로 정의되는 축방향 무차원길이

#### 하첨자

$a$	: 주위유동
$o$	: 원관벽면의 위치

## 1. 서 론

동축 이중제한분류는 분사기, 연소기, 제트분사 펌프, 가스토치 등과 같이 서로 크기가 다른 속도를 가진 두 유동이 서로 인접하여 그 사이에서 혼합이 이루어지는 기구의 설계에 응용되며, 역압력 구배에서의 경계층유동, 층류속도영역, 경계층바리, 재부착, 완전발달된 관내유동 등을 포함하는 기본적인 유동현상을 이해하는데 기초가 된다.

중심분류의 속도가 환상분류의 속도보다 큰 경우의 제한분류는, 유동이 진행함에 따라 크게 3개의 영역으로 나누어진다. 첫째 영역은 2개의 포텐셜유동과 2개의 전단유동이 존재하는 초기 영역으로서 중심분류의 포텐셜유동영역과 환상분류에 의해 형성되는 포텐셜유동영역, 그리고 중심분류와 환상분류의 경계에서 형성되는 전단유동영역과 벽면 경계층에서의 전단유동영역을 포함하며 하류로 유동이 진행함에 따라 포텐셜유동영역은 감소하고 전단유동영역은 확대된다. 이때 중심포텐셜영역이 먼저 사라진다. 둘째 영역은 중심분류의 포텐셜유동은 존재하지 않고 환상분류의 포텐셜유동과 2개의 전단유동이 존재하는 영역이다. 하류로 유동이 진행하면서 전단유동영역이 확대됨에 따라 환상분류의 포텐셜유동영역은 감소한다. 이 영역에서는 평균속도의 상사해가 존재하는 것으로 알려져 있다. 셋째 영역에서는 포텐셜유동영역이 존재하지 않고 유동영역 전체가 경계층에 포함되는 영역으로 완전 발달된 관내유동이 될 때까지 속도분포는 계속 변

화한다.

제한분류의 경우 상사파라미터(similitude parameter)는, 벽면에서 마찰손실을 무시할 수 있어 운동량이 보존된다고 가정하면, 단순히 입구에서의 속도비와 노즐반경비에 의해서만 결정된다. 이 상사파라미터를 Craya-Curtet 상사파라미터라고 한다.

제한분류에 대한 지금까지의 연구동향은 다음과 같다. Forstall과 Shapiro<sup>(1)</sup>는 동축 제한분류에서의 속도와 농도분포를 측정하여 물질확산이 운동량의 확산보다 빠르며, 혼합영역의 속도와 농도분포를 결정하는 주된 독립변수는 속도비임을 밝혔다. Curtet와 Ricou<sup>(2)</sup>는 중심분류의 속도가 환상분류의 속도보다 큰 동축 제한분류에서 평균속도의 상사성이 존재하고 환상분류의 운동에너지가 일정하다는 가정하에서 운동량방정식의 경계층 근사이론을 적용하여 상사파라미터를 도입하였다. 여기서 측정된 속도분포가 완전한 상사성을 가지지는 않지만 상사성 가정에서 무시한 항들이 작다는 것을 입증하였다. Becker와 Hottel 등<sup>(3)</sup>은 중심분류의 속도가 대단히 커서 재순환이 존재하는 경우에 재순환영역에서 Craya-Curtet의 상사파라미터와 난류혼합과의 관련성에 대해 연구하였으며 보다 일반적인 유동형태에 적용할 수 있는 Craya-Curtet 상사파라미터를 제시하였다. Razinski와 Brighton<sup>(4)</sup>은 원관 내에서의 동축 이중분류의 혼합에 대해서 반경비, 속도비 등의 조건을 변화시켜가며 압력, 속도 등을 측정하였으며 유동이 발달해 가는 과정을 크게 3개의 영역으로 구분하여 이에 따른 유동특성을 분석하였다. 환상분류속도에 대한 중심분류속도의 비로 정의되는 속도비가 1보다 작은 경우는 압력이 입구부터 감소하고 속도비가 1보다 크면 압력이 증가하다가 감소한다. 속도비가 1보다 클수록 중심분류의 포텐셜영역이 짧아져서 환상분류의 포텐셜영역보다 먼저 사라지게 된다. Barchilon과 Curtet<sup>(5)</sup>는 관내에서 재순환영역이 존재하는 경우에 대하여 Curtet<sup>(2)</sup> 등의 근사이론을 적용하였으며 유동을 가시화하였다. 가시화를 통해 전단영역과 재순환영역에서 난류량이 매우 높음을 확인하였으며, 제한분류의 근사이론을 발전시켜 재순환을 가지는 분류의 하류영역까지 적용하여 상사파라미터에 따른 재순환 에디(eddy)의 평균구조의 특성을 고찰하였다.

그러나 앞에서 언급한 연구들에서는 주로 외측 노즐반경에 대한 내측 노즐반경의 비로 정의되는 노즐

반경비가 0.1 정도의 작은 경우에 대하여 이론해석하고 이를 실험적으로 검증하였다. 이러한 조건에서는 노즐출구에서의 과잉유량비가 영에 가까운 경우이다.

본 연구에서는 노즐반경비가 0.3으로 비교적 큰 경우, 즉 노즐출구에서의 과잉유량비가 일정한 값을 가지는 경우에 재순환영역이 존재하지 않는 범위에서 속도비를 4가지로 변화시켜 가면서 실험하였다. 각 속도비에 따라 축방향 평균속도, 난류강도, Reynolds응력 등을 측정하였으며 이들이 유동의 진행에 따라 어떻게 변하는지를 고찰하고 첫째 영역과 둘째 영역에서 Craya-Curtet의 근사이론을 적용하여 구한 과잉유량비를 실제 측정된 결과와 비교하였다. 평균속도분포의 상사성을 검토하기 위하여 먼저 실험결과에서 형태인자  $k$ 를 계산하여 상사해가 존재하는 영역을 찾은 후, 이 영역에서 평균속도의 상사성이 성립함을 확인하였다. 또한 난류강도에 대해서도 상사성이 성립하는 영역이 있는지 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 대한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 송풍기, 소음기, 분기관, 냉각기, 서지탱크(surge tank), 노즐, 시험체적, 이송장치, 히터제어기 등으로 구성된다. 원심송풍기(11 kW, 25 m<sup>3</sup>/min)에서 공급되는 공기는 소음기를 거쳐 분기관에서 중심분류와 환상분류로 나뉘어진다. 분기관에서 나뉘어진 공기는 냉각기를 통과하여 서지탱크로 공급된다. 각각의 서지탱크 내부에 설치된 전기히터(2 kW)로 공급되는 전력을 비례적분 제어방식으로 조절하여, 전 실험기간 동안 공기의 온도를 일정하게 유지하였다. 이 방법으로 공기온도를  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  오차 범위 내에서 일정하게 유지할 수 있었다. 공기온도는 온도센서(AD590)를 이용하여 감지하였으며, 온도센서에서 발생한 신호를 A/D 변환기를 거쳐 PC에서 받아들여 히터에 가할 전력을 계산한 후, 타이머와 히터제어기를 거쳐 전기히터에 부하를 가하였다. 그리고 각각의 서지탱크의 바깥면은 유리섬유를 사용하여 단열하였다. 유동을 균일하게 하기 위해서 각각의 서지탱크에서 노즐로 연결되는 파이프 내부의 서지탱크 출구 근처와 노즐입구에 메쉬 스크린을 설치하였다.

실험에 사용한 외측노즐은 내경이 100 mm, 단면

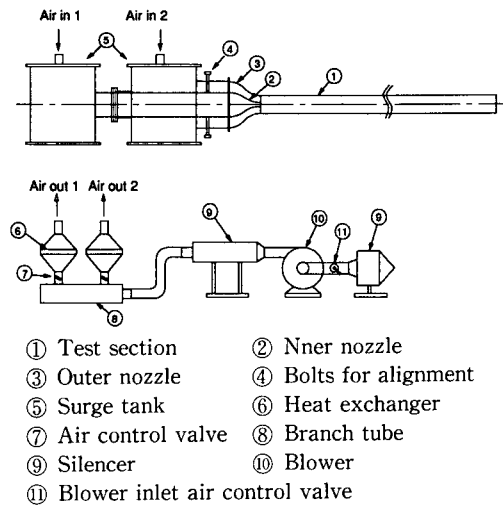


Fig. 1 Experimental setup

수축률이 25 : 1이고, 내측노즐은 외경 30.5 mm, 내경 29.5 mm, 단면수축률 125 : 1이다.

시험체적이 되는 원관은 내경 100 mm의 아크릴관으로 제작하였다. 시험에 요구되는 구간은 1 m이지만 이 구간에서 안정된 상태의 유동을 얻기 위해서 길이가 약 1 m의 아크릴관 5개를 연결하여 구성하였다. 시험체적의 한 쪽면에 슬롯홀을 내어 측정 프로브가 들어갈 수 있도록 하였고 이곳에서 공기가 유출되는 것을 방지하기 위하여 셀로판 테이프를 내면에 부착시켰다. 시험체적에서의 온도를 균일하게 유지하기 위해서 원관의 바깥면을 단열하였다.

속도측정은 열선풍속계(DANTEC 56C01 CTA)로 측정하였다. 실험에 사용한 프로브는 X형 열선(DANTEC 56P06, 5  $\mu\text{m}$ -tungsten)이다. 그리고 열선풍속계의 신호는 선형화기(DANTEC 56N21 Linearizer)를 거쳐서 14비트 A/D 변환기가 내장된 신호분석기(DATA PRECISION, DATA6100 & 611-1)에서 처리되고 GPIB를 통하여 PC에 저장된다. 자료의 샘플링속도는 20 kHz로 행해졌고, 자료의 길이는 축방향 평균속도 측정시에는 80키로워드, 난류량 측정시에는 120키로워드로 처리하였다.

열선은 내측 노즐출구의 중심부에서 피토크관을 사용하여 교정하였으며 교정시 최대유속은 50 m/s이다.

프로브의 이송은 PC에서 제어되는 스텝모터를 이용하여 1~2 mm씩을 반경방향으로 이송하였다. 축방향으로의 이송은 직선운동 가이드 위에서 수동

으로 하였다. 실험에 사용한 열선프로브의 지지대의 반경이 3mm이므로 벽면에서 3mm 되는 지점에서 축중심쪽으로 프로브를 이동하며 측정하였다.

### 3. 결과 및 검토

분류속도  $U$ 와 환상공간의 주위속도  $U_a$ 의 차이를 과잉속도(excess velocity)  $U_a$ 라 하고 중심축에서의 과잉속도를  $U_0$ 로 나타내면 과잉유량  $q$ 과 유효반경  $l$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$q = \int_0^{r_a} U_a 2\pi r dr = U_0 \pi l^2 \quad (1)$$

반경방향거리  $r$  및 과잉속도  $U_a$ 는 다음과 같이  $\eta$  및  $f$ 로 무차원하였다.

$$\eta = r/l(x) \quad (2)$$

$$\frac{U_a}{U_0} = \frac{U - U_a}{U_0} = f(\eta, k(x)) \quad (3)$$

과잉속도를 축중심에서의 값으로 무차원한  $f$ 가 무차원반경과 형태인자의 형태로 나타낸다.  $k$ 는 형태인자(form factor)로서  $x$ 만의 함수이다. 만약  $k$ 가  $x$ 의 함수가 아니라면 상사해가 존재하게 된다.

$$k(x) = \int_0^{\eta_a} 2\eta f^2 d\eta \quad (4)$$

#### 3.1 분류의 혼합

동축 이중제한분류의 혼합특성은 노즐출구의 조건인 속도비와 노즐의 반경비 등에 의해 달라진다. 본 연구에서는 노즐반경비가  $r_i/r_o=0.3$ 인 경우에 대해 속도비를 4가지로 변화시켜 가면서 실험하여 상사파라미터에 따른 유동특성을 고찰하였다. Craya-Curtet의 상사파라미터는 다음과 같은 형태로 정의된다.

$$m = \frac{\pi r_o^2}{Q^2} \iint_s \left( U^2 + \frac{P}{\rho} \right) ds - \frac{1}{2} \\ = R_q + R_l^2 \left( \frac{k}{R_l^2} - \frac{3}{2} \right) + 2 \frac{R_q}{R_l^2} \int_0^{\eta_o} \frac{u'^2 - \bar{v}^2}{U_0^2} \eta d\eta \quad (5)$$

여기서,  $R_q = q/Q$ 이고  $R_l = l/r_o$ 이다. 상사파라미터는 난류성분항을 무시하면 노즐출구에서 중심분류와 환상분류의 속도비와 노즐의 반경비에 의해 결정된다. Table 1에 각 경우에 대한 유동조건을 나타내었다. 이 값들은  $x/D=0.05$ 에서의 값들이다.

상사파라미터  $m=0.398$ 인 경우의 평균속도, 난류강도, Reynolds응력 분포를 Figs. 2, 3, 4에 각각 나타내었다. 원관의 입구에서는 두 분류 사이의 전단층을 경계로 매우 균일한 유동이 존재하고 이곳에서의 작은 값의 난류강도와 Reynolds응력을 보인다. 유동이 발달함에 따라서 전단층 영역이 확대되어  $x/D=2.0$  근처에서 중심분류의 포텐셜유동영역이 사라지고 난류강도가 전반적으로 증가하는데 중심축에서 더 급격히 증가한다. 유동이 더욱 발달하여  $x/D=3\sim 3.5$  정도에서 환상분류의 포텐셜유

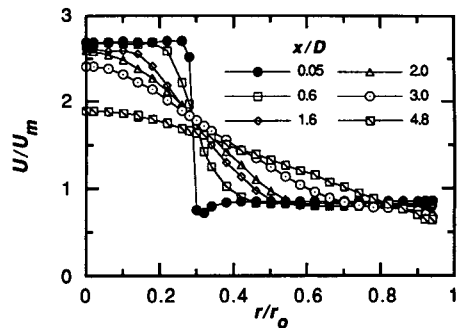


Fig. 2 Axial velocity profiles for  $m=0.398$

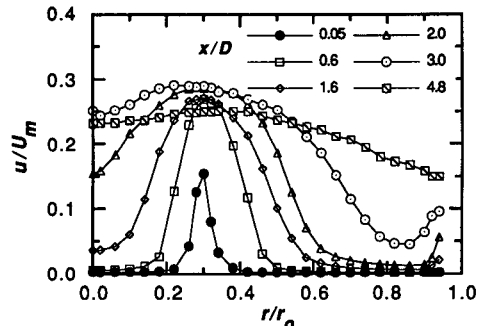


Fig. 3 Longitudinal turbulence intensity distribution for  $m=0.398$

Table 1 Flow condition

No.	Initial jet $U_j$ (m/s)	Outer jet $U_a$ (m/s)	Similitude parameter	Mean $U_m$ (m/s)
1	28.18	15.07	0.107	16.03
2	28.09	13.69	0.157	14.40
3	38.16	15.04	0.269	16.18
4	37.88	11.94	0.398	14.03

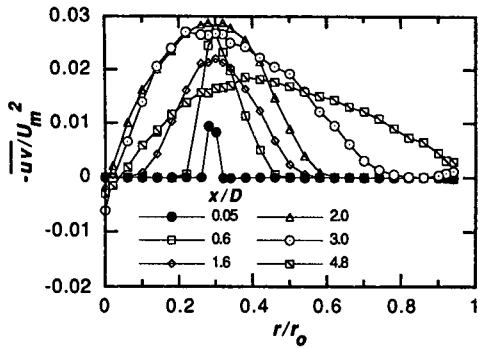


Fig. 4 Reynolds stress distribution for  $m=0.398$

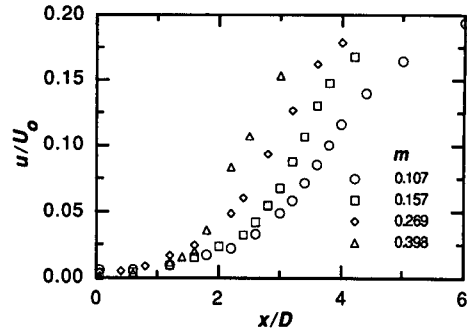


Fig. 6 Longitudinal velocity fluctuation variation along the center line

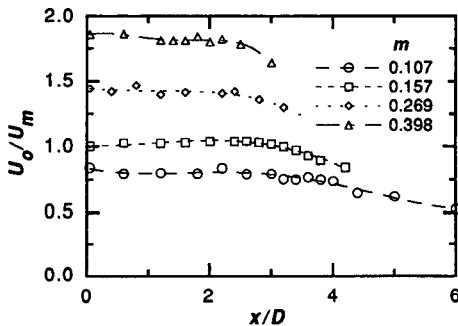


Fig. 5 Excess velocity variation along the center line

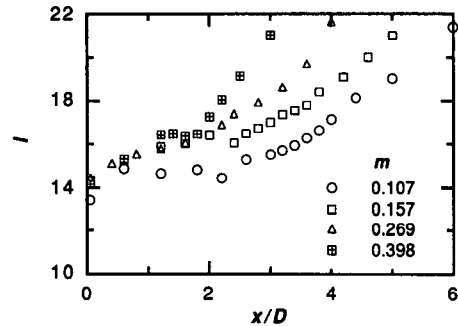


Fig. 7 Effective width variations

동영역이 사라지면서 환상분류쪽에서 난류강도의 증가율이 높게 나타난다. 그러나 난류강도가 최대가 되는 곳은 두 분류의 전단영역이며 유동이 축방향으로 진행하더라도 그 위치는 크게 변화하지 않는다.

Fig. 5에 각 상사파라미터에 대하여 중심축을 따른 과잉속도의 변화를 나타내었다. 중심축에서 과잉속도는 중심분류의 포텐셜영역이 존재하는 동안 ( $x/D=2.0$ 까지) 거의 일정한 값으로 유지하고 이 포텐셜영역이 사라지면서 감소하기 시작한다. 또한 상사파라미터가 클수록 환상분류의 포텐셜영역이 더 빨리 소멸함을 알 수 있다.

Fig. 6에서 중심축을 따른 과잉속도로 무차원화된 난류강도의 변화를 나타내었다. 포텐셜영역이 존재하는 구간에서는 서서히 증가하다가 그 이후부터는 상대적으로 증가율이 크게 높아지며 상사파라미터가 클수록 더 큰 난류강도를 나타낸다.

각 상사파라미터에 대하여 유효반경  $l$ 의 중심축에 따른 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 유효반경  $l$ 은 분류가 확산되는 정도를 나타낸다. 분류의 확산

은 노즐출구 바로 근처에서 증가하다가 중심분류의 포텐셜유동이 존재하는 동안에는 두 분류의 속도차에 의한 영향이 적은 전단층 근처에만 미치기 때문에 유효반경이 크게 증대되지 않으나, 전단층이 확대 되면서 유효반경이 급격히 증가한다. 상사파라미터가 클수록 유효반경 증가하는 시점이 빨라지며 증가율이 크다. 따라서 상사파라미터의 값이 커질수록 분류가 빠르게 확산되어 환상분류의 포텐셜유동이 존재하는 구간이 짧아지고 완전발달된 관내유동으로 빠르게 변화해 간다. 본 실험의 경우 유효반경이 20~22 정도가 되면 환상분류의 포텐셜유동영역이 사라진다.

### 3.2 이론해석과의 비교

과잉유량비  $R_q$ 와 축방향 무차원길이  $\zeta$ 와의 관계가 이론적 해석으로부터 미분방식의 형태로 다음과 같이 된다.

$$\frac{d\zeta}{dR_q} = \frac{k^{1/2} (C_0 + C_1 R_q + C_2 R_q^2 + C_3 R_q^3 + C_4 R_q^4)}{(m - R_q + 1.5 R_q^2)^{5/2}} \quad (6)$$

여기서,  $\zeta$ 는 아래와 같이 전단응력계수로 정의되는  $\sigma$ 를  $x$ 에 대해 적분한 값으로 정의되었다.

$$-\sigma(x) = \int_0^{r_0} \frac{2\eta r}{\rho U_0^2} G_1 d\eta \quad (7)$$

$$\zeta = \int_0^x \frac{\sigma(x)}{r_0} dx \quad (8)$$

식(6)의 계수인  $C$ 의 값들은 상사파라미터  $m$ 와 형태인자  $k, G_1, G_2, G_3$ 들로부터 다음과 같이 된다.

$$C_0 = \frac{1}{4} m^2$$

$$C_1 = m \left( \frac{3}{2} + G_2 \right)$$

$$C_2 = (1 + 3m) \left( \frac{1}{4} - G_2 - G_3 \right) + G_3 m (1 - k)$$

$$C_3 = \frac{3}{4} (6G_2 - 1) + 2G_3 k$$

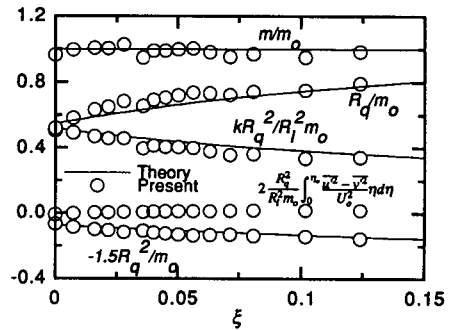
$$C_4 = \frac{3}{2} \left( \frac{3}{8} - 3G_2 - G_3 k \right)$$

위 식(6)의 과잉유량비와 무차원길이와의 관계가 미분방정식이므로  $R_q$ 의 초기값이 필요하다. Barchilon과 Curtet<sup>(5)</sup>의 연구에서는 원관 입구에서의 중심분류를 점생성(point source)으로 가정하고 이곳에서의 과잉유량비를 0으로 하여 해석하였다. 그러나 본 실험에서는 입구에서의 중심분류가 유한한 면적을 가지므로 이에 대응하는  $R_q$ 를 입구조건으로 하였을 때의 이론해석과 실험의 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 이론적으로 과잉유량비  $R_q$ 와 무차원길이  $\zeta$ 의 관계를 구하기 위해서 평균속도분포를 Gauss함수로 가정하였다. 이로부터 형태인자가  $k=0.5, G_1=0.963, G_2=0.125, G_3=0.427$ 로 구해진다.

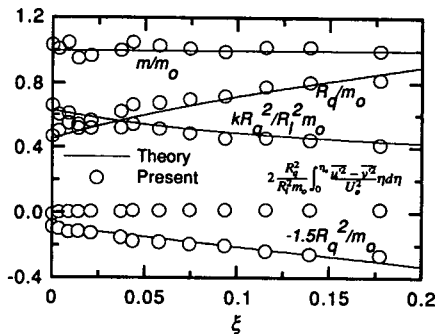
과잉유량비  $R_q$ 와 무차원길이  $\zeta$ 의 관계에 있어서 과잉유량의 초기값이 유한한 값을 가지는 본 연구

에서 이론과 실험의 결과가 비교적 잘 일치하며 상사파라미터의 값이 클수록 과잉유량비의 초기값이 크고  $\zeta$ 가 커짐에 따라서 과잉유량비도 크게 증가함을 알 수 있다.

$R_q$ 와  $\zeta$ 의 관계로부터 상사매개변수를 계산하는 식(5)의 각 항들의 값들을 구할 수 있다. 상사매개변수  $m=0.157$ 와  $m=0.269$ 일 때의 결과를 Fig. 9(a), (b)에 나타내었다. 이론적으로 상사매개변수는 운동량보존을 의미하며 일정한 값을 가진다. 본 실



(a)  $m=0.157$



(b)  $m=1.269$

Fig. 9 Contribution of each term to similitude parameter

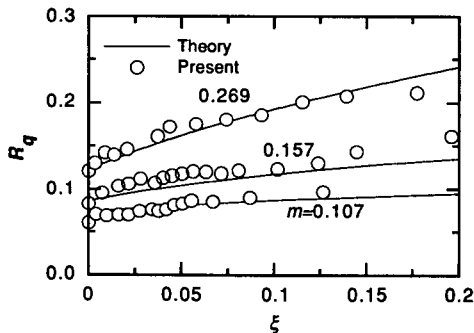


Fig. 8 Nondimensional excess flow rate

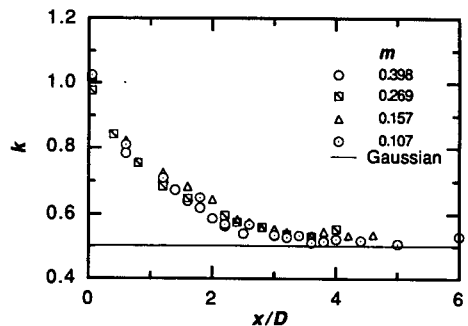


Fig. 10 Form factor,  $k$

험에서는 그림에서 보여지듯이 상사매개변수가 5% 이내에서 일정하였다. 실험과 이론해석의 결과 비교에서 상사매개변수에 기여하는 각 항들이 잘 일치하였고 상사매개변수를 계산하는데 난류섭동항을 무시할 수 있음을 알 수 있었다.

3.3 평균속도 및 난류강도의 상사성

내측 포텐셜유동이 사라지면서 축중심의 과잉속도가 감소하기 시작하고 유효반경이 증가가 되는 지점부터는 분류의 혼합이 활발하게 일어나 평균속도의 상사성이 존재하게 된다.

이론해석에서 평균속도분포를 형태인자의 함수로 가정하였다. 평균속도의 상사성이 존재하기 위해서는 무차원 과잉속도  $f$ 가 무차원반경  $\eta$ 만의 함수이어야 하고 이를 만족하기 위해서는 형태인자  $k$ 가 상수라는 조건이 필요하다. 실제 실험에서  $k$ 가 상수인 영역을 확인하기 위해  $k$ 의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림으로부터 노즐출구에서는  $k=1$ 의 값을 가지며, 유동이 발달함에 따라 감소하여  $x/D=3$  이상에서  $k=0.5\sim 0.55$ 로 일정한 값으로

유지되고, 상사매개변수가 작아짐에 따라서 형태인자가 일정한 영역이 길어짐을 확인하였다. 이러한 결과로부터 형태인자가 일정한 영역에서 평균속도의 상사성을 Fig. 11(a), (b), (c), (d)에 나타내어 상사성 가정이 타당함을 알 수 있다. 또한 상사매개변수가 커짐에 따라 상사성이 성립하는 영역이 줄어드는 것을 알 수 있었다.

중심분류속도가 환상분류속도보다 큰 경우 첫번째 영역에서 두번째 영역의 상류지점까지, 포텐셜코어위치에 해당하는 곳에 2개의 낮은 난류강도 영역과 전단영역에 해당하는 부위에서 높은 난류강도 영역을 가진다. 평균속도의 상사성이 성립하는 구간인 두번째 영역에서 중심부분의 난류강도가 급격히 증가하며 전체적으로 높은 난류강도를 가지며 외측의 포텐셜코어 부분에서 낮은 난류강도를 가지고 벽 근처에서 경계층이 확대되면서 난류강도가 증가한다. 과잉속도가 상사성을 가지는 것과 같이 난류강도도 상사성이 성립하는지의 여부를 보기 위하여 무차원 난류강도  $u/u_{max}$ 와 무차원 반경거리  $(r-r_{0.5})/(r_{0.1}-r_{0.9})$ 의 관계를 Fig. 12(a), (b), (c), (d)

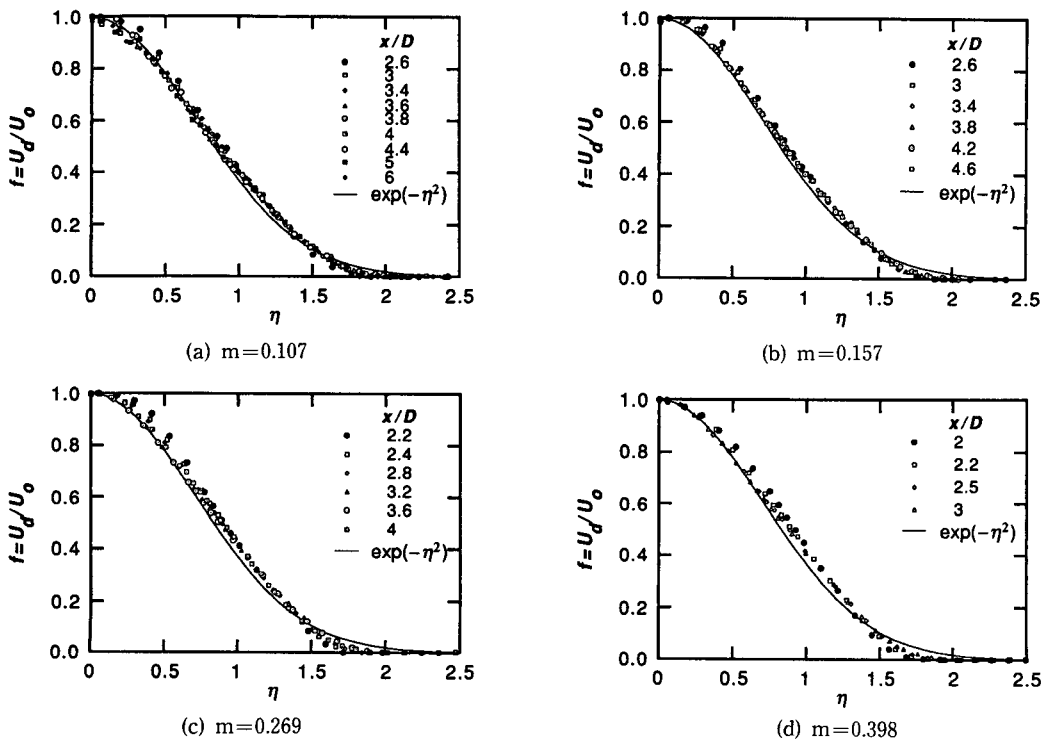


Fig. 11 Similarity of axial velocity profile

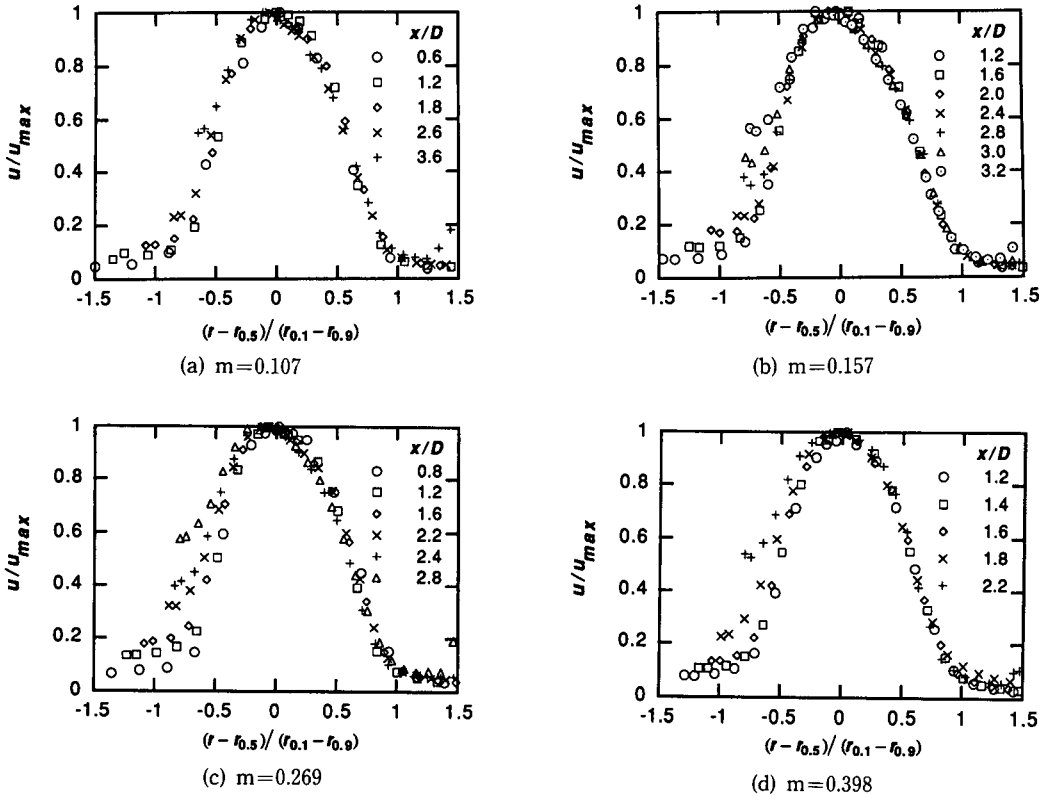


Fig. 12 Similarity of turbulence intensity distribution

에 나타내어 보았다. 여기서,  $r_{0.9}$ ,  $r_{0.5}$ ,  $r_{0.1}$ 은 각각 과잉속도  $U_d$ 가  $0.9U_0$ ,  $0.5U_0$ ,  $0.1U_0$ 에 해당되는  $r$ 의 위치를 나타낸다. 그 결과 일정한 구간에서 난류강도도 상사해를 가지며, 그 영역은 대체로 노즐출구 근처에서부터 축중심에서 난류강도가 급격히 증가하기 전인 두번째 영역의 상류지점까지임을 확인하였다. 난류강도가 증가함에 따라서 분류의 중심부인  $(r-r_{0.5})/(r_{0.1}-r_{0.9}) < 0$ 인 위치에서는 상사성을 가지지 않게되며  $(r-r_{0.5})/(r_{0.1}-r_{0.9}) > 0$ 인 위치에서는 대체로 상사성을 가진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 외측노즐과 내측노즐의 반경비가 1:0.3인 동축 이중제한분류에 대한 실험을 수행하였다. 일정 온도에서 속도비를 4가지로 변화시키며 평균속도, 난류강도 레이놀즈응력 등을 측정하였다. 실험결과를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상사매개변수가 클수록 분류가 빠르게 확산되어 상사성이 성립하는 구간이 짧아지고 과잉유량이 크게 증가한다.
- (2) 축방향 무차원길이에 대한 과잉유량비가 Craya-Curtet의 이론해석과 비교적 잘 일치함이 확인되었다.
- (3) 형태인자가 일정한 구간에서 과잉속도의 상사성이 존재하며 난류강도도 일정한 구간에서 상사성이 존재한다.

#### 참고문헌

- (1) Forstall, W. Jr. and Shapiro, A. H. 1950, "Momentum and Mass Transfer in Coaxial Gas Jets," *J. Applied Mech.*, Vol. 17, *Transaction of the ASME.*, Vol. 72, No. 4, pp. 399~408.
- (2) Curtet, R. and Ricou, F. P. 1964, "On the Tendency to Self Preservation in Axisymmetric Ducted Jets," *Journal of Basic Engineering*, Vol.



- 86, No. 4, pp. 765~776.
- (3) Becker, H. A., Hottel, H. C. and Williams, G. C., 1933, "Mixing and Flow in Ducted Turbulent Jets," *Ninth Symposium(International) on Combustion*, Academic Press, London, pp. 7~20.
- (4) Razinsky, E. and Brighton, J. A., 1971, "Confined Jet Mixing for Nonseparating Conditions," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 93, No. 3, pp. 333~349.
- (5) Barchilon, M. and Curtet, R., 1964, "Some Details of the Structure of an Axisymmetric Confined jet with Backflow," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 86, No. 4, pp. 777~787.