

단일 경사열선을 이용한 원형노즐의 유동해석

정의준^{**} · 오상한^{*}

Analysis of the Flow of a Circular Nozzle using a slant Hot-Wire

Chung Wui Jun^{**}, Oh Sang Han^{*}

Key Words : Slant-HotWire(경사열선), Circular-Nozzle(원형노즐), Inward-Flow(내향류), Outward-Flow(외향류), Similarity(상사성), Virtual Origin(가상원점)

ABSTRACT

The program using C/C++ which could calculate 3-D velocities from data of the flowfield obtained by a slant hot-wire has been developed. The characteristic of the exit flowfield of a circular nozzle with a curved surface was investigated. From the result, the inward-flow was verified at adjacent layers near the boundary of the exit flowfield of a circular nozzle in 1d and outward-flow was sensed gradually from down-flow of 1d. Similarity of the nondimensional velocity profile properly could be obtained except near 1d and the virtual origin reasonably could be obtained.

기호설명

\vec{A} : 선의 방향벡터

B_{bou}, B_{vel} : 경계 반폭, 속도반폭

$b_0 \sim b_9$: 각도 검정 계수

d : 노즐 출구 지름

E_L : 출력전압

k : 상사변수에서 정의되는 요소

K_1, K_2, K_3 : 속도 검정 계수

R, T, Z : 축방향, 원주방향 좌표(열선기준)

\vec{V}, V : 속도벡터, 속도

V_e : 유효속도

V_{ea}, V_{eb}, V_{ec} : a, b, c 에서의 유효속도

$\vec{V}_R, \vec{V}_T, \vec{V}_Z$: 반경, 원주, 축방향 속도벡터

V_R, V_T, V_Z : 반경, 원주, 축방향 속도

V_o : 노즐출구에서의 축방향 속도

V_{zc} : 축 중심에서의 축방향 속도

Z : 기준 좌표축(노즐기준)

Z_o : 가상원점

Z_p : 열선이 ZT 평면에 투영된 방향

θ : 피치각

θ_0 : 프로브 경사각

$\bar{\theta}$: 평균 피치각

Ψ : 스월각(swirl angle)

$\Delta\Psi$: $\Psi_p - \Psi$

$\bar{\Psi}$: 평균 스월각

Ψ' : 서치 프로그램의 유동방향 스월각

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c : a, b, c 위치에서의 스월각

Ψ_m : 측정방향의 절대속도 스월각

α : 요우각(yaw angle)

$\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$: a, b, c 위치에서의 요우각

η : 상사변수

* 울산대학교 기계자동차공학부

† 교신저자, E-mail : wjchung@mail.ulsan.ac.kr

1. 서론

현대생활에 다용도로 이용되어지는 자유분사류는 내부유동에서 외부로 방출되는 과정이 벽면효과가 제거되면서 먼 하류까지 전개되는 특성을 갖고 있다. 지금까지 이에 대한 연구는 단일 자유분사류^{(1),(2)}에 대한 것이 대부분이 었으나 최근에는 단일 자유분사류에 다른 유동이 혼합되는 혼합 자유분사류가 관심사가 되고 있다. 자유분사류의 초기영역은 Tophat형 유동구조를 가지며 이 영역에서는 상사성이 성립하지 않는다. 따라서 자유분사류의 연구는 이를 포함한 성질 및 구조를 파악하는 것이 매우 중요하다. 최근의 관심사인 혼합 분사류에 대한 정확한 유동구조를 파악하기 위해서는 먼저 이들을 구성하고 있는 단일 분사류의 전 영역에 대해 정확한 해석⁽³⁾이 전제되어야 한다.

유체 유동장의 해석은 실험적 방법과 수치해석적 방법이 있다. 실험적 방법은 수치해석적 방법보다 시간과 비용면에서 불리하지만 최종 결과를 검정하는 수단으로 이용되고 있으므로 소홀이 할 수 없는 분야라 하겠다. 이런 의미에서 측정기술은 앞으로도 계속 발전 되어 갈 것이다.

따라서 본 연구는 단순한 단독 유동인 원형노즐 출구유동에 대하여 경사열선을 이용한 유동장 측정방법을 확립하고 이로부터 얻은 실험 데이터로 부터 평균 속도, 무차원 속도분포 및 가상원점을 구하여 유동구조를 해석하였다.

2. 이론

단일경사열선 풍속계를 사용하여 속도를 측정하기 위해서는 열선의 형상에 대한 이해와 이를 바탕으로 한 검정실험이 필요하다.

2.1 열선의 기하학적 형상

Fig. 1은 단일 경사열선이 유동방향에 대한 기하학적 관계를 나타내고 있다. 열선과 속도벡터의 사이각인 요우(yaw)각 α 는 열선의 방향벡터 \vec{A} 와 속도벡터 \vec{V} 를 내적한 결과 식(1)과 같이 된다.

$$\cos \alpha = \cos \theta_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos(\psi + \Delta\psi) + \sin \theta_0 \cdot \cos \theta \tag{1}$$

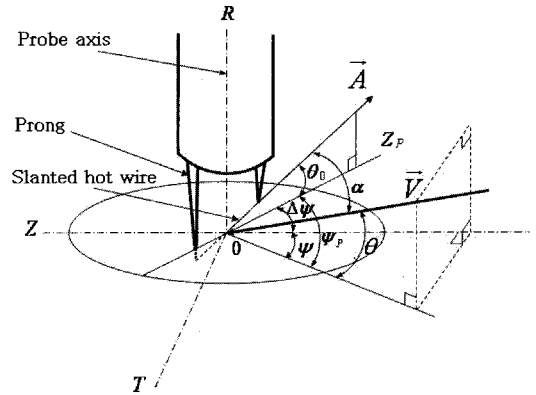


Fig. 1 Figure of hot-wire

2.2 검정실험식

검정실험은 속도검정과 각도검정으로 이루어지며 이는 열선풍속계의 출력전압(E_L)과 유체의 속도(V), 요우각(α), 피치각(θ)의 관계를 정한다.

속도검정은 열선에 수직한 유체속도 V 와 열선풍속계의 출력전압(E_L)을 식(2)에 의해 구하였다. ($\theta=0^\circ$, $\alpha=\pm 90^\circ$)

$$V = K_1 + K_2 E_L + K_3 E_L^2 \tag{2}$$

여기서 K_1, K_2, K_3 는 속도검정계수이다.

유효속도($\alpha \neq 90^\circ$)는 다음의 식(3)과 같다.

$$V_e = K_1 + K_2 E_L + K_3 E_L^2 \tag{3}$$

각도검정은 속도검정을 바탕으로 열선의 출력전압과 유체속도 및 유체유동방향의 계수를 결정해 주는 것으로, 본 연구에서는 Schmidt, D.P. & Okiish, T.H.⁽⁴⁾에 의해 제시된 검정식을 수정, 보완한 Shin, H.W.⁽⁵⁾의 식(4)를 사용하였다.

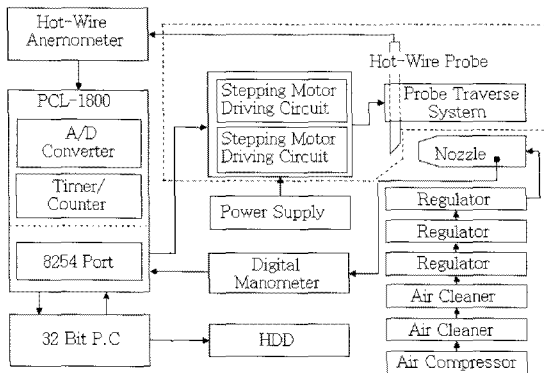
$$\begin{aligned} V_e/V = & b_0 + b_1 \alpha + b_2 \theta + b_3 V \\ & + b_4 \alpha^2 + b_5 \theta^2 + b_6 \alpha^3 \\ & + b_7 \theta \alpha + b_8 \alpha V + b_9 \theta V \end{aligned} \tag{4}$$

또한 앞서 언급한 3차원 속도성분은 프로브 기준이므로 노즐의 축방향, 원주방향 및 반경방향 속도성분으로 식 (5)를 통하여 변환하였다.

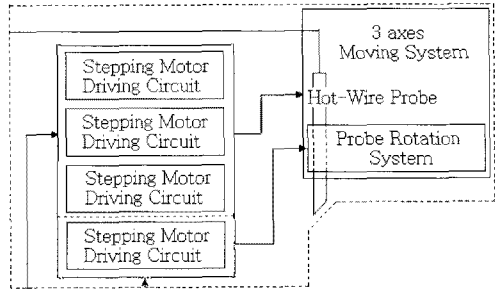
$$\begin{aligned} \vec{V}_R &= V \cdot \sin(-\theta) \\ \vec{V}_T &= V \cdot \cos(-\theta) \cdot \sin(-\psi) \\ \vec{V}_Z &= V \cdot \cos(-\theta) \cdot \cos(-\psi) \end{aligned} \quad (5)$$

3. 실험장치

실험장치는 유동발생장치, 유속측정장치, 자동이송장치 및 데이터 처리시스템로 구성되어 있으나 순수한 실험장치로만 보면 Fig. 2와 같이 검정실험장치(Fig. 2(a))와 본 실험장치(Fig. 2(b))로 되어 있다. 여기서 차이는 Fig. 2(b)의 본 실험장치의 점선안에 Fig. 2(a)의 검정실험장치에 사용된 점선안의 제어장치가 이송장치로 대체된다. 직접 설계 제작된 자동이송장치는 검정 실험장치에 2축 제어장치, 본 실험장치는 4축 이송장치로 구별할 수 있다. 자동이송장치의 제어는 1펄스에 0.36°씩 회전하는 5상 스텝핑 모터 6개가 사용되었으며 I/O 보드는 Advantech의 PCL-1800의 8254 포트를 사용하였다. 검정실험장치의 2축 제어장치는 피치각은 1펄스에 0.36°씩 제어하고 스윙각은 잇수비 10:72인 타이밍 벨트를 이용하여 1펄스에 0.05°씩 제어하였다. 또 본 실험장치의 4축 이송장치는 축방향과 반경방향 및 원주방향의 측정위치까지 프로브를 이동시키기 위한 3축 이송장치와 측정점에서 최소 스윙각을 찾기 위한 프로브 회전장치로 구성되어 있다. 반경방향 및 축방향 이송은 1펄스 0.004mm, 원주방향은 0.005mm 이송된다. 회전축엔 잇수비가 25:36인 타이밍 벨트를 이용하여 1 펄스에 0.25°씩 회전하도록 하였다. 유동은 공기압축기로, 유속측정은 KANOMAX사의 System 7106 열선풍속계와 TSI사의 5 μm 45°단일경사열선



(a) Schematic diagram of calibration system



(b) Schematic diagram of instrumentation system

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

25R을 사용하였으며 A/D변환은 330 kHz의 Advantech사의 PCL-1800을 사용하였고 노즐은 지름 6.25mm인 TSI사의 1125을 사용하였다.

4. 실험방법

4.1 검정실험

검정실험을 통하여 얻어진 속도검정과 각도검정을 이용하여 노즐출구 유동장의 3차원 속도를 측정한다.

속도 검정방법은 열선의 출력전압이 최대가 되는 조건($\theta=0^\circ, \alpha=\pm 90^\circ$)에서 속도를 0m/s 부터 50m/s 까지 5m/s 간격으로 증가시키면서 10개의 열선의 출력전압을 측정한다. 열선은 양면의 냉각효과가 서로 다르므로 식(2)의 K_1, K_2, K_3 는 열선의 양면($\alpha=\pm 90^\circ$)

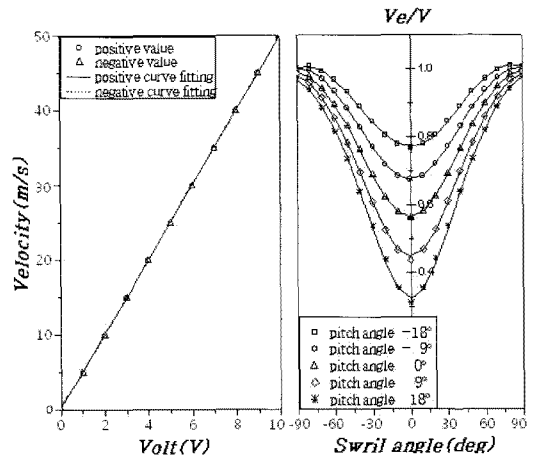


Fig. 3 Velocity and Angle calibration curves

에 대해 각각 최소자승법으로 구한다.

각도검정은 열선의 방향과 유동방향의 사이각인 요우각이 직각인 식(2)에 대하여 요우각이 임의각인 식(3)을 무차원한 식(4)의 관계를 구하는 것이다. 그 방법은 일정한 유속에서 피치각을 -18° 에서 18° 까지 9° 씩 변화시키고 각 피치각에서 스윙각을 -90° 에서 90° 까지 5° 씩 증가하면서 V_e/V 를 측정한다. 각 피치각에서 측정된 V_e/V 출력값을 이용하여 요우각 -90° 에서 0° 까지 또 0° 에서 90° 까지 각각의 데이터를 최소자승법을 사용하여 식(4)의 $b_0 \sim b_9$ 를 결정한다. 여기서 요우각 -90° 에서 0° 까지 또 0° 에서 90° 은 열선의 양면을 의미한다. Fig. 3는 속도검정 및 각도검정 결과를 보여주는 예이다.

4.2 측정위치

노즐출구에서 측방향(Z축)으로 노즐직경(d)의 1배(1d)에서 순차적으로 2d, 4d, 7d, 11d, 15d까지 6구간으로 나누어 각 단면에서 9~19개의 측정점을 선택하여 측정하였다. Table 1 측정점들이다.

Table 1 Measurement position in Z and R, T axis

Z(mm)	R, T(mm)
1d(6.25)	-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4
2d(12.5)	-4.5,-4,-3.5,-3,-2,-1,0,1,2,3,3.5,4,4.5
4d(25)	-5,-4.5,-4,-3.5,-3,-2,-1,0,1,2,3,3.5,4,4.5,5
7d(43.75)	-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7
11d(68.75)	-8,-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7,8
15d(93.75)	-9,-8,-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7,8,9

5. 평균속도벡터 계산방법

측정방법은 임의의 3차원 유동은 속도 V, 열선과 유동이 이루는 각 θ 및 ψ 로 표시되는데 이들을 구하기 위해서는 한 지점에서 최소 세 방향에서의 출력전압 측정이 필요하다.

측정은 먼저 측정하고자 하는 위치까지 프로브를 이송시켜서 열선을 Fig. 4의 Z축과 일치(Fig. 1: $\Delta\psi=0$)시킨 다음 이 기준 축으로부터 열선의 출력이 가장 적게 나오는 열선방향(ψ')을 서치(search) 프로그램으로 찾아 기준 스윙각으로 정하고 이 각 만큼 열선

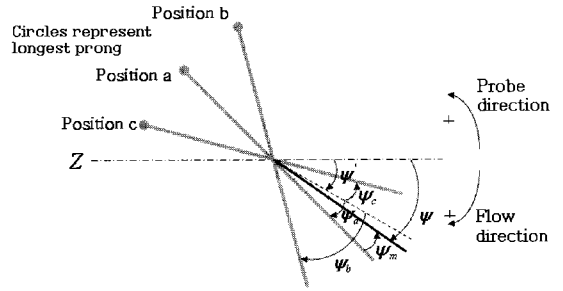


Fig. 4 Hot-Wire measurement positions

의 프로브 축을 회전시킨다. 이 스윙각(ψ')(Fig. 4)는 유동방향과 정확히 일치하지 않으므로 정확한 유동방향은 스윙각(ψ')가 실제 유동방향과 일치한다는 가정 아래 이 지점을 기준으로 한 $\psi' - 20^\circ$ (a), $\psi' - 60^\circ$ (b), $\psi' + 20^\circ$ (c)의 세 방향(a, b, c 위치)의 출력전압으로부터 다음식을 적용하여 6개의 식을 구한다.

$$V_{ea,eb,ec}/V = b_0 + b_1\alpha_{a,b,c} + b_2\theta + b_3V + b_4\alpha_{a,b,c}^2 + b_5\theta^2 + b_6\alpha_{a,b,c}^3 + b_7\theta\alpha_{a,b,c} + b_8\alpha_{a,b,c}V + b_9\theta V \quad (6)$$

$$\cos\alpha_{a,b,c} = \cos\theta_0 \cdot \cos\theta \cdot \cos\psi_{a,b,c} + \sin\theta_0 \cdot \cos\theta \quad (7)$$

위의 식에서 a, b 및 c는 추정유동방향을 기준으로 열선의 측정방향의 위치를 나타낸 것이므로 측정하고자 하는 방향인 ψ' 을 a위치의 스윙각 ψ_a 라고 두면 b와 c는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_a = \psi' \quad (8)$$

$$\psi_b = \psi' - 40^\circ \quad (9)$$

$$\psi_c = \psi' + 40^\circ \quad (10)$$

식(6), 식(7)의 관계에서 6개의 미지수 ($\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c, \theta, \psi_m, V$)와 6개의 방정식을 얻은 다음 Newton Raphson 방법을 사용하여 미지수를 결정한다. 여기서 a의 위치를 기준으로 실제 유동방향을 나타내는 ψ_m 과 서치 프로그램으로부터 찾은 추정 유동방향 ψ' 및 추정 유동방향에서 a위치까지의 사이각인 ψ_a 를 아래식(11)에 대입하면 ψ 를 결정한다.

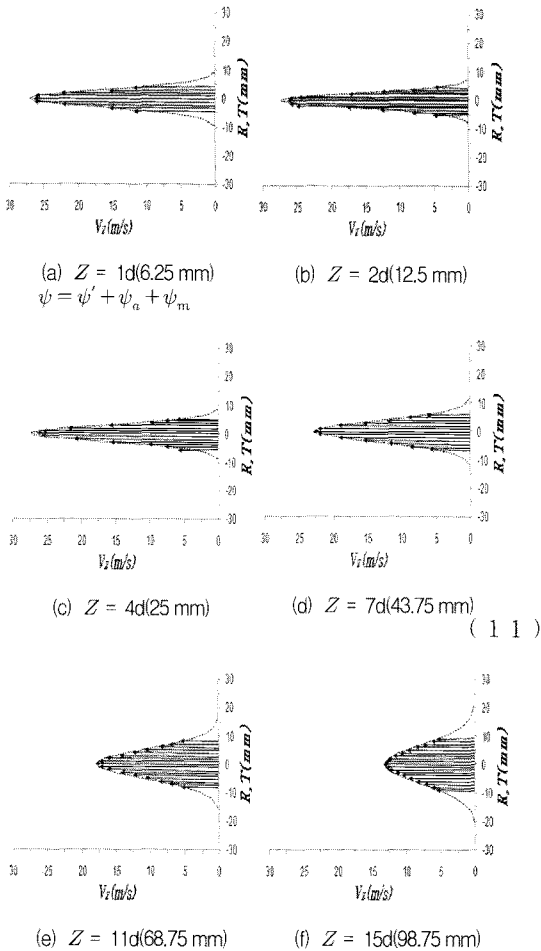


Fig. 5 3-D Velocity vectors

6. 결과 및 고찰

본 연구에서는 원형노즐 유동특성을 파악하기 위해 출구직경이 6.25 mm이며 출구속도가 26 m/s인 조건에서 Z축의 각 단면(Z=1d, 2d, 4d, 7d, 11d, 15d)에서 R, T 축을 따라 유속을 측정하였다

6.1 노즐의 출구속도

원형 노즐유동의 대칭성과 보편성을 감안하여 속도 값은 양축(R, T)의 평균값으로 하였다.

Fig. 5의 (a)~(f)는 축(Z)방향의 각 단면에서 3차원 속도벡터(V_z)분포이다. 그림에서 화살표는 실험 데이터이며 점선은 이 실험데이터로부터 최소자승법으로

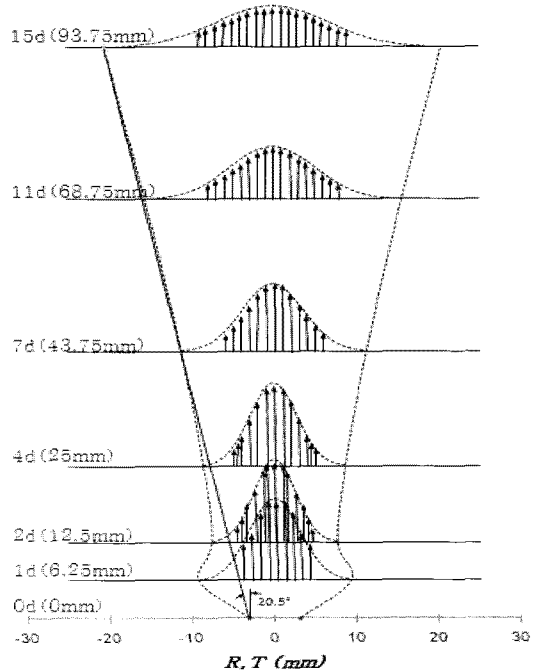


Fig. 6 Axial Velocities at each Z planes

가우시안(Gaussian)분포 형태의 종(bell)형 곡선을 구한 것이다. 각 속도분포는 축방향으로 진행됨에 따라 1d의 Tophat형에서 중심속도가 점차 줄어들면서 정규분포로 변형되고 있다. 각 속도분포에서 속도 영점의 위치(Boundary)는 가우시안 정규분포에서 σ (표준편차의 1배)의 위치로 하였다.

Fig. 6는 Fig. 5의 각 단면의 속도분포를 한 단면에 나타낸 것이다. 그림에서 각 단면의 속도분포의 속도가 0이 되는 위치를 연결하면 유동의 분사각이 되며 본 연구의 조건에서는 약 20°를 나타내고 있다. Fig. 6는 Z=1d에서 유동의 분사각이 급격히 증가하였다가 줄어드는 형상을 보이고 있다. 파이프의 원형분류나 슬릿의 평면분류에서는 포텐셜 코어가 초기의 짧은 범위 내에서 존재하지만 본 연구에서 사용된 내부곡면의 원형축소노즐 유동에서는 벽면을 따라 흐름이 가속되므로 출구 직후 Tophat형 분포를 갖게 되어 Z축 방향으로 미약하지만 약 7d까지 영향이 지속된다. 이런 현상은 노즐출구직전 내부에서 크게 가속된 유동이 외부의 정지유동과 큰 속도 차이로 인해 극심한 전단력을 발생시켜 출구와 1d 사이에 강한 내향류를 만들어 분사류 경계를 부풀렸다가 다시 외향류가 되어 점차로 분산되면서 정규 분포화하는 것으로 보여진다.

6.2 속도분포의 상사성

반경방향의 무차원 속도분포는 식(13)으로 정의되는 무차원 변수의 반경위치의 속도를 식(12)과 같이 그 단면의 중심속도로 무차원화한 값으로 자유분사류의 상사성은 각 단면의 무차원 속도분포의 중첩 정도로 판단한다.

$$\frac{V_z}{V_{zc}} = f(\eta) \tag{12}$$

$$\eta = \frac{r - k(Z)}{Z} \tag{13}$$

$$k(Z) = \frac{1}{2}R(Z) \tag{14}$$

여기서 무차원 상사변수 η 는 반경위치 r 및 $k(Z)$ 에 의해 표현되어 식(13)과 같고 $k(Z)$ 는 각 단면에서 식(14)와 같이 반경방향으로 축방향 속도가 0 ($V_z = 0m/s$)이 되는 위치(Boundary)의 반이 되는 위치

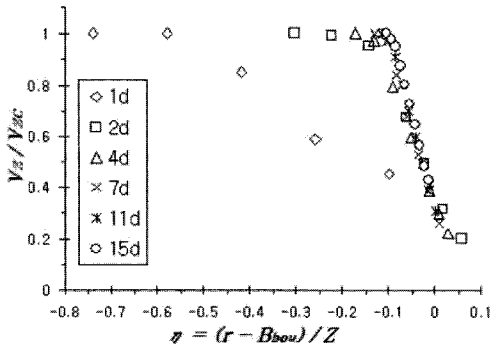


Fig. 7 Similarity of axial velocity profiles with the

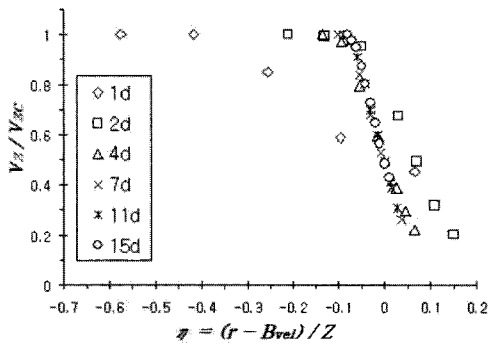


Fig. 8 Similarity of axial velocity profiles with the half-width of velocity

의 속도를 나타내는 경계반폭⁽⁶⁾ 혹은 축방향 중심속도의 반이 되는 반경방향의 위치에서 속도로 정의되는 속도반폭⁽⁶⁾으로 나타내었다. 따라서 $R(Z)$ 는 경계반폭 및 속도반폭의 함수이다.

Fig. 7, Fig. 8은 경계반폭 및 속도반폭에 의한 무차원 속도분포의 중첩성을 보여주고 있다. 그림에서 전 영역의 속도분포가 무차원 상사변수 η 에 대하여 대체로 일치하고 있으나 극초기영역(1d)의 속도분포형태인 Tophat형 분포는 중첩성을 크게 벗어남을 보여주고 있다. 또한 속도반폭의 Fig. 8는 초기영역(1d~2d)에서 중첩성이 경계반폭의 Fig. 8보다 더욱 혼란스러움을 보여 주고 있다. 따라서 1d를 제외한다면 경계반폭의 상사성이 더 합리적으로 보여진다.

6.3 가상원점

가상원점은 유동의 가상적인 시작점이며 분사류의 경계반폭, 속도반폭의 방법이나 혹은 운동학적 관점에 기초를 둔 중심선 속도감쇄⁽⁷⁾에 의해 구한다. 그러나 이러한 가상원점을 구하는데 기초가 되는 속도분포가 앞서 속도분포의 상사성에서 보듯이 초기영역(1d~2d)은 다른 영역과 일치하지 않는 형태를 보이고 있음으로 정확성에 문제점을 수반한다. 따라서 가상원점을 초기영역을 제외한 영역에서 여러가지 방법으로 그 경향과 범위를 정성적 및 정량적으로 유추해 보고자 한다.

식(15), 식(16)은 경계반폭, 속도반폭 및 중심속도 감쇄도의 데이터들을 이용 가상원점을 유추해 볼수 있는 식들이다.

$$B_{vel}, B_{ou} = f(Z/d) \tag{15}$$

$$\frac{V_o}{V_{zc}} = f(Z/d) \tag{16}$$

Fig. 9은 경계반폭, 속도반폭 및 속도감쇄의 데이터들을 Z/d 에 따라 1차식으로 나타낸 결과이며 여기서 1차식은 앞서 지적한 이유 때문에 초기영역(1d~2d)의 데이터를 제외한 데이터를 사용하였으며 Fig. 6의 속도분포의 영점속도 위치도 함께 제시하였다. 이들 식에 의한 가상원점들을 정리하면 Table 2와 같다. 이 표를 보면 가상원점은 영점속도를 기준으로 할 경우 -1.3d이며 경계반폭 및 속도반폭인 경우 약 -3.6d이고 중심속도 감쇄비인 경우 -5.9d이다. 여기서 영점속도에 의한 가상원점은 1d 근방의 강력한 전단류에 의한

Table 2 Virtual origin by experimental data

Parameter	1차식
B_{bou}	$-3.6d$
B_{vel}	$-3.6d$
V_o / V_{zc}	$-5.9d$
Boundary	$-1.3d$

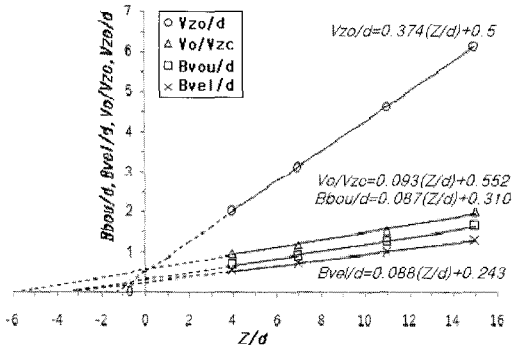


Fig. 9 Virtual origin by experimental data

내향류에 의해 증가된 유량으로부터 형성되어지는 정규분포에 의한 것이다. 따라서 만약 내향류의 영향을 배제한다면 기울기가 작아져 가상원점은 노즐 안 더 깊은 곳에 존재할 것이다. 또한 경계반쪽 및 속도반쪽 역시 내향류의 증가된 유량에 의한 영향이영점속도에 비해 적지만 존재하리라 예측할 수 있다. 한편 중심속도 감쇄비는 내향류에 의해 유량이 증가할수록 기울기가 작아져서 가상원점은 길어지기 때문에 내향류의 영향이 줄어들수록 즉 내향류를 배제한다면 가상원점은 짧아질 것이다. 따라서 가상원점은 $-3.6d \sim -6d$ 안에 존재한다고 유추해 볼 수 있다.

7. 결론

열선풍속계로 내부곡면을 갖는 원형노즐 출구유동을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자체개발한 열선풍속계의 3차원 유동측정 시스템의 우수성이 확인되었다.

- 2) 초기영역에서 강력한 전단유동으로 인한 내향류의 증가가 확인되었다.
- 3) 무차원 속도분포의 상사성은 초기 이후영역에서 확립되며 경계반쪽이 더 합리적이다.
- 4) 가상원점은 $-3.6d \sim -6d$ 안에 존재한다.

후기

본 연구는 2002년도 울산대학교 학술조성비(대학연구비 일반과제)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hatta, K. and Nozaki, T., 1975, "Two-Dimensional and Axisymmetric Jet Flows with Finite Initial Cross Sections," Bulletin of the JSME, Vol. 18, No. 18, pp. 349~357.
- (2) Bradbury, L. J. S., 1976, "The Structure of a Self-Preserving Turbulent Plane Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 23, part1, pp. 31~64.
- (3) Park, Sung Geun, 2003, "A Study of the Flow Characteristics of the Circular Nozzle exit ergion," M. S. Thesis, University of Ulsan,
- (4) Schmit, D. P. and Okiishi, T. H., 1977, "Multistage Axial Flow turbomachine Wake Production, Trans -port, and Interaction," AIAA J., Vol. 15, No. 8, Aug., pp. 1138~1145.
- (5) Shin, H. W., 1990, "Hot-wire Measurement Technique in Turbomachinery," The 2nd KSME-JSME FLUID Engineering Conference Proceeding, Vol. 1, pp. 357~360.
- (6) Kim, D. S. and Han, Y. O., 1992, "The Study over the Flow Characteristic of an Axisymmetric Free Jet in the Intial Region," KSAS J., Vol. 20, No. 1, pp. 95~104.
- (7) Wygnanski, I. and Fiedler, H., 1969, "Some Measurements in the Self Preserving Jet," J. of Fluid Mech., Vol. 38, part3, pp. 577~612.