3차원 PIV에 의한 원형 개수로 유동의 속도분포 함수 측정

윤 지 인, 성 재 용*†
서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, *서울과학기술대학교 기계공학과

Measurements of Velocity Distribution Function in Circular Open Channel Flows by Stereoscopic PIV

Ji-In Yoon, Jaeyong Sung*†
Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea*

(Received March 24, 2011; revision received April 25, 2011)

ABSTRACT: For the first time, the present study has measured the velocity distribution function in circular open channel flow in a three-dimensional shape using a stereoscopic PIV system. For a given channel slope, water depth was varied from 30% to 80% of the channel diameter. Then, the characteristics of the velocity distribution function was compared according to the change of the water depth. Unlike a rectangular channel, the present experiment exhibited quite different shapes in the velocity distribution function whether the water depth is higher than 50% or not. Especially, the position of maximum velocity in the central and side wall regions changes in a different manner for the water depth above 50%. By differentiating the velocity distribution function, local wall friction coefficient was evaluated as a function of wall position. If the water depth goes down, the difference between the maximum and minimum values in the local wall friction coefficient increases, and the averaged value also increases.

Key words: Circular open channel(원형 개수로), Stereoscopic PIV(스테레오 PIV), Velocity distribution function(속도분포 함수), Friction coefficient(마찰 계수), Manning equation(Manning 방정식)

기 호 설 명

A : 유동 단면적 [m^2]
B : 자유표면에서 중심축과 벽의 거리 [m]
C_f : 벽마찰 계수
D : 수위 [m]
D_h, R_h : 수력 직경 및 반경 [m]
f : Darch의 마찰 계수
Fr : Froude 수, $\overline{u}/\sqrt{Dg}$
g : 중력 가속도 [m/s^2]
h : 자유표면과 최대속도위치의 거리 [m]
h_L : 수두 손실 [m]
L : 채널 길이 [m]
M : 난류 엔트로피 지표
P : 접수 길이 [m]

† Corresponding author
Tel.: +82-2-970-6398; fax: +82-2-949-1458
E-mail address: jysung@seoultech.ac.kr

R : 관의 반경 [m]
R_e : 레이놀즈 수, $4\bar{u}R_h/\nu$
S : 관의 기울기
u, v, w : 속도 성분 [m/s]
u_{max} : 최대 속도 [m/s]
$\bar{u}$: 평균 속도 [m/s]
x, y, z : 실제 좌표계 [m]
Y, Z : 무차원된 좌표계

그리스 문자

β : ξ-곡선 형태에 대한 매개 변수
δ_y, δ_z : 단면 형상에 대한 매개 변수 [m]
θ : 바닥면에서 자유표면까지의 각도
μ, ν : 점성 계수 [kg/ms], 동점성 계수[m^2/s]
ξ : 무차원된 곡선 좌표계
ρ : 유체 밀도 [kg/m^3]
τ_w : 벽마찰 응력 [N/m^2]
ϕ : 바닥을 기준으로 한 회전각

1. 서 론

하수 및 우수 관거 내의 유동은 만수상태로 흐르지 않으며 상부는 공기와 접하며 하부는 물로 채워진 개수로 유동(open channel flow) 형태를 지니고 있다. 개수로 유동은 일반적으로 압력차에 의해 구동되는 관로 유동과 달리 중력과 벽면 마찰력에 의해 지배를 받는다. 또한, 수심 · 유량 · 수로 바닥의 경사, 자유표면의 경사 등의 복합적 요인에 따라 달라질 수 있다. 따라서 하수처리 시설과 같이 개수로 유동이 중요한 설비를 설계, 제어함에 있어 개수로 유동의 특성을 이해하는 것이 중요하다.

일반적으로 개수로 유동에서 수력반경 및 수로 바닥의 경사가 주어지면 유동 단면의 평균 유속을 구하기 위해 Manning 방정식[1]을 사용한다. 실험식인 Manning 방정식은 관로 바닥의 기울기와 자유표면의 기울기가 동일하다는 조건에서 2차원 사각 단면, 정상상태, 균일유동으로 가정하고 만들어졌다. 그러나 이 방정식은 실제 상황에서 많은 오차를 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.[2~4] Manning 방정식의 오차를 보정하기 위해 여러 가지 노력들이 있었는데, 주로 Manning 방정식을 대수적으로 수정하고 실험 데이터에 곡선접합(curve-fitting)하는 방식을 사용하였다.[3, 4] 그러나 이 연구들은 단순히 수위 및 유량만 측정하여 경험식을 만들었기 때문에 특정 관로 조건에서만 적용될 수 있으며, 모든 관로에 적용되는 일반화된 식으로 사용하기 어렵다. 따라서 관로 내 속도분포에 대한 체계적인 접근이 필요하다.

개수로 유동에서 속도분포에 관한 연구로는 Nezu and Rodi[5]가 LDV(laser Doppler velocimetry)를 이용하여 사각 단면의 채널에 적용한 바 있다. Chiu[6]와 그의 공동 연구자들[7, 8]은 유동 단면 내 속도분포 함수(velocity distribution function)를 제안하였고, 사각 단면의 채널에서 채널 길이 방향으로 속도분포 변화에 대해 고찰하였다. 이상의 연구들은 모두 점측정(point measurement) 방식을 사용하여 공간 해상도가 매우 낮을 뿐만 아니라 2차원 속도분포만 측정하여 유동 단면 전체에 걸친 3차원 속도분포는 논의되지 않았다. 특히, 본 연구에서 관심을 가지고 있는 원형 단면의 개수로 유동에 대한 속도분포 연구는 전혀 이루어지지 않았다.

한편, 동시 다점 계측을 통하여 유동을 정량적으로 가시화할 수 있는 PIV(particle image velocimetry) 기술[9]은 최근 20년 동안 꾸준히 발전하여 왔다. 기본적인 PIV 기술은 2차원 공간에서 2차원 속도성분을 측정하는 것이지만 최근에는 3차원 속도성분을 측정할 수 있는 스테레오 PIV(stereoscopic PIV) 기법이 널리 사용되고 있다. Doorne and Westerweel[10]은 스테레오 PIV 기법을 압력차에 의해 구동되는 만관 상태의 관로 유동에 적용한 바 있다. 본 연구의 이전 연구[11]에서 처음으로 2차원 PIV 기술을 원형 개수로 유동에 적용하였으나, 단순히 측정된 속도분포를 제시하는 수준에서 그쳤다.

따라서 본 연구의 주요 목적은 원형 단면의 개수로 유동에서 3차원 속도분포 함수를 고찰하는 것이다. 이를 위해 3차원 스테레오 PIV 기법을 도입하고, 유동 단면 내에서 단순한 속도분포가 아니라 함수 형태로 정량화하여 해석한다. 관로의 수위를 변화시키면서 속도분포 함수를 구성하는 매개 변수들의 변화에 대해 논의한다. 속도분포 함수로부터 벽마찰 계수를 구하고, 수위에 따른 마찰 계수의 변화에 대해서도 논의한다.

2. 실험 장치 및 방법

원형 단면의 개수로 유동에 대한 실험장치도는

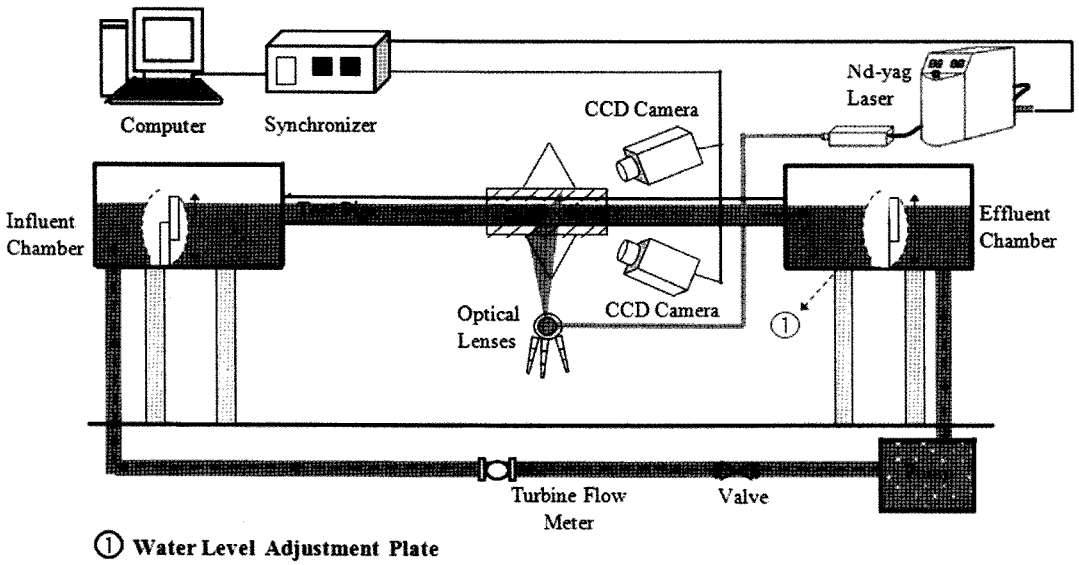


Fig. 1 Experimental apparatus to measure the circular open channel flow by the stereoscopic PIV system.

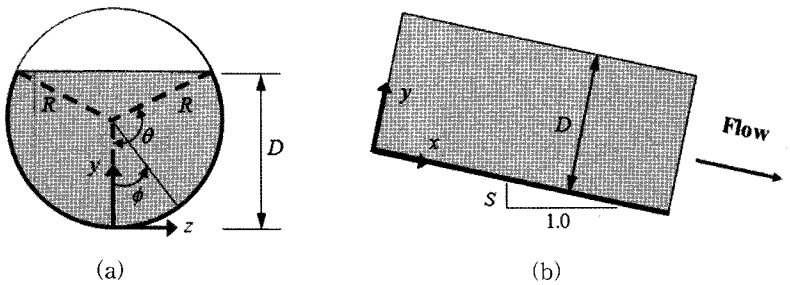
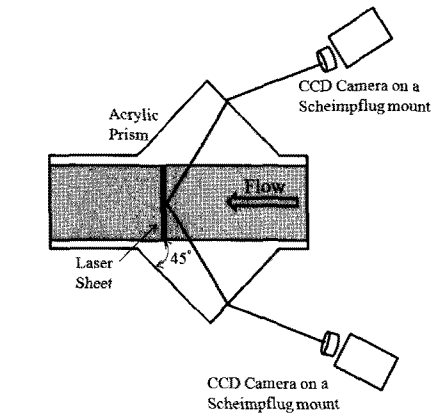


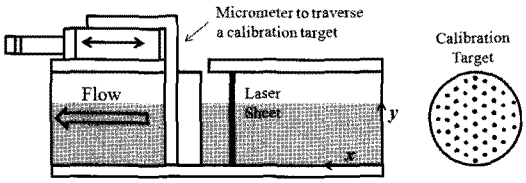
Fig. 2 Schematic of the circular open channel flow in the (a) cross-sectional and (b) side views.

Fig. 1과 같다. 실험장치의 구성요소를 크게 나누면 유입부(influent chamber)와 유출부(effluent chamber), 시험부(test-section), 그리고 물의 순환시키기 위한 펌프와 유량조절 밸브가 있다. 원형관은 직경이 $2R$ = 50 mm인 아크릴 관을 사용하였으며, 시험부 앞에 관직경의 20배 이상의 직선관로를 확보하였다. 유출부 하단에 위치한 펌프로 25°C의 물을 유입부에 공급하고, 공급 유량은 바이패스용 밸브를 이용하여 조절하였다. 유입부안에는 허니컴을 설치하여 펌프에서 발생하는 비정상 압력 변화가 원형관 내 유동특성에 영향을 주는 것을 최소화하였다. 원형관 내의 수위(water depth)는 유입부와 유출부에 각각 존재하는 유동 깊이 조절판으로 조절하였다. 이때, 수력 에너지 구배선(hydraulic grade line), 즉 자유표면의 기울기와 관의 기울기가 평행이 되도록 세밀히 조절하였다. 관의 기울기는 유출부 아래에 설치된 높이 조절장치와 유입부 아래에 설치된 힌지(hinge)를 이용하여 정밀하게 제어하였다.

Fig. 2는 원형 단면의 개수로 유동을 정면 및 측면에서 본 개략도이다. 좌표의 원점은 관의 바닥면으로 지정하였으며, 단면(y, z)에서 3차원 속도성분(u, v, w)을 스테레오 PIV 기법으로 측정하였다. 관의 기울기는 S = 0.00258로 고정하고, 수위를 $D/(2R)$ = 30%, 50% 80%로 변화시키면서 그에 따른 유동 특성을 고찰하였다. 수위가 주어지면 수력반경(hydraulic radius) R_h는 유동 면적 A와 접수 길이(perimeter) P에 의해 다음과 같이 계산된다.



(a)



(b)

Fig. 3 Configuration of the stereoscopic PIV system; (a) Scheimpflug arrangement, (b) three-dimensional image calibration.

$$\cos\theta = \frac{R-D}{R} \tag{1}$$

$$A = R^2(\theta - \sin\theta\cos\theta) \tag{2}$$

$$P = 2R\theta \tag{3}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{R(\theta - \sin\theta\cos\theta)}{2\theta} \tag{4}$$

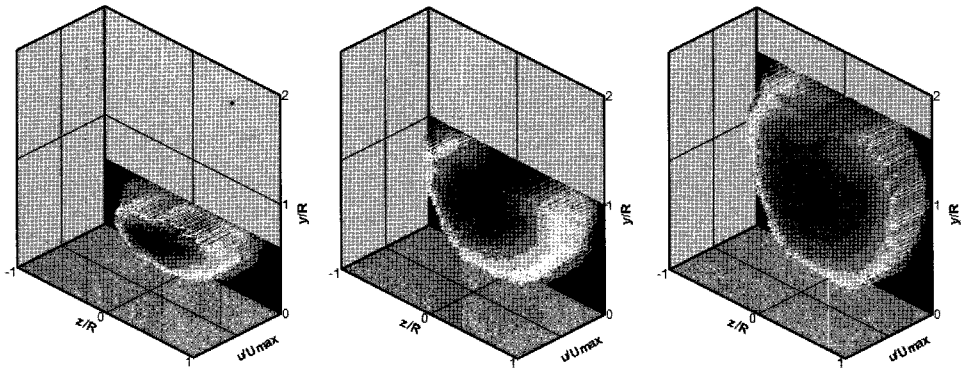
스테레오 PIV 측정을 위해서 시험부는 별도의 직육면체 아크릴 블록을 투명하게 가공하여 제작하였으며, Fig. 3(a)와 같이 삼각형 형태의 프리즘이 아크릴 블록의 측벽에 형성되도록 하였다. 이렇게 함으로써 빛의 굴절에 의한 영상 왜곡을 최소화할 수 있었다. 본 실험에서는 PIV용 광원으로 15 mJ Nd : YAG 레이저(New wave, SoloPIV)를 사용하였으며, 구형 렌즈(spherical lens)와 원통형 렌즈(cylindrical lens) 통해 측정 영역에 평면광을 조사하였다. 추적입자는 10 μm 직경의 hollow glass spheres를 유동장에 주입하였다. 산란된 입자 영상은 레이저와 동기화되어 작동하는 2대의 CCD 카메라(Kodak, ES 1.0)로 각각 2장의 연속적인 입자 영상을 획득하였다. 2대의 CCD 카메라는 Scheimpflug 방식[12]을 채택하여 렌즈면과 CCD 센서면이 꺾일 수 있도록 하였다. 이 방식은 스테레오 PIV에서 카메라가 레이저 평면광을 비스듬히 보더라도 측정면에 있는 모든 입자들이 번짐 현상 없이 영상의 초점에 들어오게 할 수 있는 장점이 있다. 2대의 CCD 카메라에 저장된 총 4장의 입자 영상으로부터 한 개의 순간 속도장이 얻어진다. 시간평균 속도장을 구하기 위하여 본 연구에서는 3 Hz로 샘플링된 순간 속도장을 각 수위에 대하여 500장씩 획득하여 평균하였다.

스테레오 PIV에서는 입자 영상을 획득하기 이전에 영상의 3차원 보정(calibration)이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 Fig. 3(b)와 같이 보정판(calibration target)을 시험부 상단에 형성된 슬릿을 통해 삽입하고, 마이크로미터를 이용하여 보정판을 0.5 mm씩 5단계로 이송시키면서 보정판의 영상을 획득하였다. 보정판의 각 위치에서 얻은 영상으로부터 3차원 공간 $\vec{x}$와 2차원 영상 $\vec{X}$ 간의 매핑 함수(mapping function) $\vec{X} = F(\vec{x})$를 구하였다.[13] 매핑 함수는 좌표(y, z)에 대해서는 3차, x 좌표에 대해서는 2차 다항식으로 가정하였으며, 다항식의 계수들은 보정판 위의 모든 점들의 정보를 이용하여 최소자승법으로 구하였다. 입자 영상으로부터 입자의 변위를 추출하는 알고리즘은 FFT 기반의 상호상관(cross-correlation) 기법[14]을 사용하였다. 상관영역(interrogation window)은 32×32 pixels로 하였으며, 50% overlap을 사용하였다. 공간 분해능을 향상시키기 위하여 상관영역의 offset에 의한 계층적 회기(recursive correlation) 기법[15]을 적용하였다. 2대의 카메라로부터 추출된 2차원 입자 변위는 매핑함수에 의해 3차원 속도 성분으로 변경된다. 이상의 스테레오 PIV 기법으로 측정된 시간 평균 유동장의 측정 불확도(uncertainty)는 95% 신뢰구간에 대해 2.76%이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 속도분포 함수

Fig. 4는 스테레오 PIV로 측정된 원형 개수로 유동의 시간평균된 3차원 속도장을 보여주고 있다. 수위에 따른 속도분포의 특성을 살펴보고자 수위 50% 및 이 보다 낮은 수위인 30%와 높은 수위인



(a) (b) (c)

Fig. 4 Three-dimensional velocity distributions measured by the stereoscopic PIV for the water depths (a) 30%, (b) 50% and (c) 80%.

80%를 비교하였다. 관의 기울기가 고정된 상태에서 수위가 증가하면 평균 유속도 증가한다. 속도분포의 형상을 비교하고자 Fig. 4에서는 평균속도로 무차원된 속도분포를 제시하였다. 모든 수위에서 벽 근처를 제외하고 중심부가 평탄한 전형적인 난류 속도분포 형태를 보인다. 최대 속도의 위치는 모두 자유표면보다 아래에 위치하고 있는 것으로 나타났다. 수위가 50%보다 낮으면 최대 속도가 자유표면 근처에서 발견되지만, 수위가 50%보다 높으면 최대 속도의 위치는 수위와 함께 상승하는 것이 아니라 관의 중심 부분에 머무르고 있다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 충분히 많은 데이터를 이용하여 평균 유동장을 획득하였으나 중심부의 속도분포가 평탄하기 때문에 정확한 최대 속도의 위치를 찾기는 어렵다. 또한 벽 근처 속도 구배가 매우 크므로 전체 유동장에 대한 측정 데이터를 바탕으로 벽마찰응력 등 벽면 근처 유동 특성을 완전히 밝히기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 스테레오 PIV 측정 데이터를 바탕으로 원형 개수로 유동의 속도분포 함수를 구하였다. 속도분포 함수는 Chiu[6]가 임의 형상의 단면을 가진 개수로 유동에 대해 제안한 다음 식을 사용하였다.

$$Y=(y+\delta_y)/(D+\delta_y-h) \tag{5}$$

$$Z=|z|/(B+\delta_z) \tag{6}$$

$$\xi=Y(1-Z)^{\beta}\exp[\beta Z-Y+1] \tag{7}$$

$$\frac{u(\xi)}{u_{\max}}=\frac{1}{M}\ln\left[1+(e^{M}-1)\frac{\xi-\xi_0}{\xi_{\max}-\xi_0}\right] \tag{8}$$

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}}=\frac{e^{M}}{e^{M}-1}-\frac{1}{M} \tag{9}$$

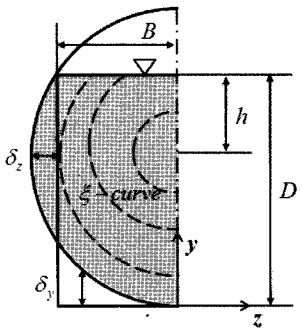


Fig. 5 A curvilinear coordinate system applied to the cross-section in the circular open channel flow.

Table 1 Least-squares fitted parameters of the velocity distribution function to the stereoscopic PIV data

Depth(%)	30	50	80
Re	5,693	13,541	18,974
Fr	0.396	0.499	0.454
$\bar{u}$(m/s)	0.152	0.247	0.284
$u_{\max}$(m/s)	0.232	0.349	0.401
h(mm)	2.40	6.29	20.11
M	1.99	2.79	2.85
β	1.30	1.18	0.95

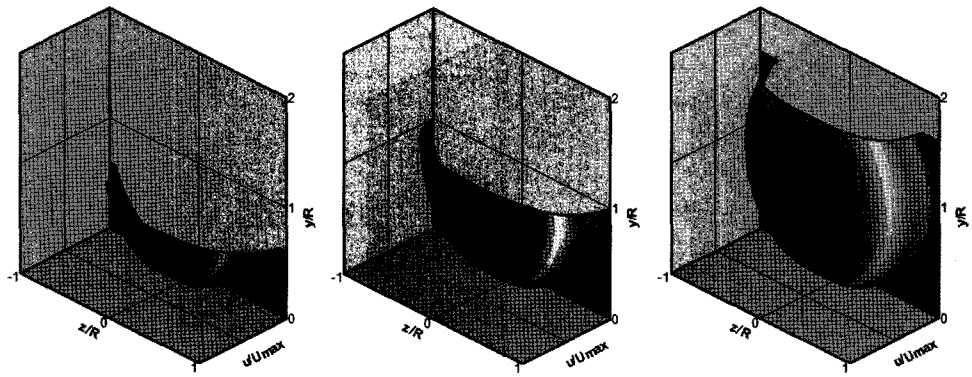


Fig. 6 Velocity distribution functions fitted to the measured data for the water depths (a) 30%, (b) 50% and (c) 80%.

Fig. 5에 원형 단면의 개수로 유동에 대하여 각 변수들에 대한 의미를 표시하였으며, 곡선 좌표계 (curvilinear coordinate) ξ는 무차원된 좌표계 (Y, Z)의 함수로 표시된다. ξ_0와 ξ_{max}는 각각 유속이 0 또는 최대인 지점에서의 ξ값이다. 속도분포 u는 ξ의 함수로 표시되며, 식(9)는 단면에서의 최대속도 u_{max}와 평균속도 $\overline{u}$의 관계를 나타낸다. 수위 D에 대하여 B는 자유표면을 따라서 y축과 측벽의 거리이다. β, δ_y, δ_z는 매개 변수이다. β는 ξ-곡선이 y 방향 대비 z 방향으로 퍼져있는 정도를 나타내며, δ_y와 δ_z의 값은 0에 가까울수록 사각 단면 형상에 가까워진다. h는 자유표면에서 최대 속도 위치까지의 거리이다. $h>0$인 경우 최대 속도의 위치는 자유표면 아래에 위치하게 되고, $h \leq 0$인 경우 최고 속도의 위치는 자유표면에 위치하게 된다. M은 엔트로피를 나타내는 지표로서 난류가 증가하면 이 값이 증가한다.[7]

Fig. 6에서는 Fig. 4의 스테레오 PIV 측정 데이터를 식(5)~식(9)에 곡선접합(curve-fitting)하여 구한 속도분포 함수를 수위에 따라 나타내었다. 각 수위에 대하여 획득된 500장의 순간속도장을 평균하여 시간평균 속도장을 구하고, 시간평균 속도장에 가장 잘 맞는 속도분포 함수를 비선형 최소자승법으로 구하였다. 최소자승법 적용 시 매개 변수 M, u_{max}, $\overline{u}$, h, β를 미지수로 두고, 실험데이터 $u(y,z)$와의 오차가 최소가 되는 매개 변수 값들을 구하였다. 비선형 최소자승법은 미지수 결정에 있어 반복계산이 필요하므로 본 연구에서는 이를 위해 Gauss-Newton 알고리즘을 적용하였다. 매개변수 값들이 구해지면 속도분포 함수는 고유한 형태로 결정되며, 모든 수위에 있어 실험 데이터와의 오차가 0.1% 이내였다. Fig. 6의 속도분포 함수도 중심부가 평탄한 난류 속도분포를 보여주고 있으며, 실험 데이터에 비해 벽 근처 속도 구배를 보다 정확하게 묘사하고 있다. Table 1에 최종적으로 얻어진 속도분포 함수의 매개 변수 값들을 정리하여 나타내었다. 레이놀즈(Reynolds) 수와 프루우드(Froude) 수는 $\mathrm{Re} = 4\overline{u}R_h/\nu$, $\mathrm{Fr} = \overline{u}/\sqrt{Dg}$로 정의하였다. 여기서, ν는 동점성 계수이고, g는 중력가속도이다. 계산된 무차원수로부터 본 연구에서 측정한 유동은 난류 유동 영역이며, 수력도약이 발생하지 않는 아임계 유동(subcritical flow)임을 확인할 수 있다. 고정된 관의 기울기에 대하여 수위가 증가하면 평균 속도와 최대 속도가 모두 증가하는 것을 볼 수 있으며, 난류 정도를 나타내는 지표 M 값도 증가하였다. 이 값들의 변화량은 수위가 50% 이하일 경우 크게 나타나며, 수위가 50% 이상이면 그 차이가 상대적으로 작다. 자유표면에서 최대 속도 위치까지의 거리를 나타내는 h 값도 수위가 증가할수록 커지는데, 수위 30%, 50%인 경우 자유표면 바로 아래에서 최대 속도가 나타나지만 수위가 80%로 상승하면 최대 속도가 관의 중심 근처에서 나타난다. 즉, 수위 50% 이하에서는 수위가 상승하면 최대 속도의 위치가 같이 따라서 상승하지만, 수위 50% 이상에서는 수위가 상승하더라도 최대 속도의 위치는 거의 제자리에 머물고 있다. 이는 원형

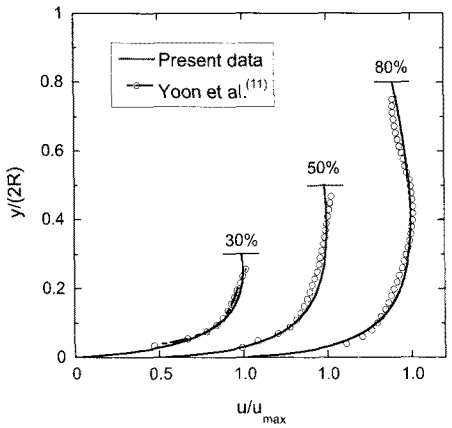


Fig. 7 Velocity profiles along the y-axis at the center plane, which are compared with the previous 2D PIV data.

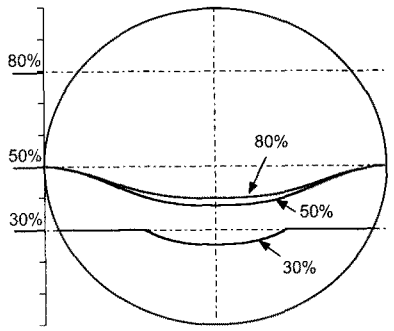


Fig. 8 Positions of the maximum velocities on the velocity profiles at various z-coordinates and its variation according to the water depth.

관에서 수위가 50% 이상으로 올라가면 측벽이 관 내부로 굴곡되어 있어 벽 마찰력의 영향이 관 중심으로 더 깊이 침투하기 때문이다.

Fig. 7에서는 앞에서 구한 3차원 속도분포 함수로부터 중심선($z=0$)에서 y 방향의 속도분포를 추출하고, 2차원 PIV로 측정한 기존 연구 결과와 비교하였다. 좌표계는 관의 직경으로 무차원하였고, 속도는 최대 속도 값으로 무차원하였다. 중심선에서의 2차원 속도분포 형태가 기존 연구 결과와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있으며, 기존 연구에서 보기 어려웠던 벽 근처 속도변화를 보다 분명하게 볼 수 있다.

원형 단면 개수로 유동에서 3차원 속도분포 상의 최대 속도는 Fig. 7과 같은 중심선에서의 2차원 속도분포 상의 최대 속도와 일치한다. 그러나 z를 변화시키면서 관찰된 수평방향 위치별 속도분포 곡선은 중심선에서의 속도분포 곡선과 다른 형태를 가지고 있다. 따라서 수평방향 위치별 최대 속도 위치도 중심선에서의 최대 속도 위치와 다를 수 있다. 이러한 수평방향 위치별 최대 속도와 자유표면의 관계를 이해하기 위하여 Fig. 6의 3차원 속도분포 데이터로부터 다양한 z 위치에서 2차원 속도분포 곡선을 추출하였다. 이 곡선으로부터 수평방향 위치별 최대 속도의 위치를 찾고, 그에 대한 공간적인 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 수위가 30%일 경우 중심 부근에서는 최대 속도가 자유표면보다 약간 아래에 존재하나 측벽으로 가면서 자유표면에서 최대 속도가 나타난다. 수위가 50%로 상승하면 측벽 부근에서도 최대 속도의 위치가 수위 상승과 함께 높아지나 측벽 끝을 제외하고는 최대 속도가 자유표면 아래로 내려간다. 수위가 50%에서 80%로 상승하면 측벽 끝에서는 최대 속도의 위치가 관 중앙 높이에 고정되어 있고 내부에서는 조금씩 상승하는 형태를 보인다. 따라서 수위가 50%를 넘어서면 최대 속도 위치는 항상 자유표면 아래에서 형성된다. 이러한 현상은 사각 단면의 개수로 유동과는 달리 원형관에서 나타나는 특징이며, 원형관에서는 유동단면적과 접수길이의 변화가 수위 변화에 대해 선형적이지 않기 때문이다.

3.1 벽마찰 계수

속도분포 함수를 벽면에 수직인 방향에 대해 미분하면 벽마찰 계수를 얻을 수 있다. Fig. 2에서와 같이 바닥면을 기준으로 한 회전각 ϕ에서의 국소 벽마찰 응력(local wall shear stress)은 다음과 같다.

$$\tau_w(\phi)=\mu\left.\frac{\partial u}{\partial n}\right|_w=\mu\frac{\partial u}{\partial \xi}\left(\frac{\partial \xi}{\partial Y}\frac{\partial Y}{\partial y}cos\phi-\frac{\partial \xi}{\partial Z}\frac{\partial Z}{\partial z}sin\phi\right)\Bigg|_w$$

$$=\mu\frac{\mu_{\max}}{M}\frac{(e^M-1)e^{\beta Z-Y+1}}{\xi_{\max}-\xi_0}\left(\frac{1-Y}{D+\delta_y-h}cos\,\phi+\frac{Y\beta Z}{B+\delta_z}sin\,\phi\right) \quad (10)$$

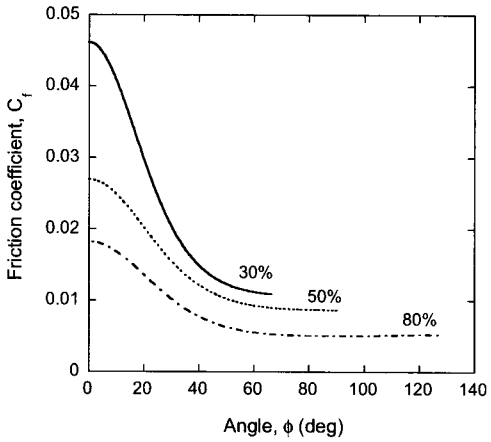


Fig. 9 Wall friction coefficient along the azimuthal angle ϕ for various water depths.

최대 벽마찰 응력은 바닥면(z = 0 또는 ϕ = 0)에 나타나며, 다음 식과 같이 정리된다.

$$\tau_w|_{z=0} = \mu \frac{u_{\max}}{M} \frac{e^{M-1}}{\xi_{\max} - \xi_0} \frac{e^{\beta+1}}{D-h} \tag{11}$$

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho \bar{u}^2} \tag{12}$$

벽마찰 응력으로부터 벽마찰 계수(wall friction coefficient) C_f를 구할 수 있으며, Fig. 9에서는 벽면의 위치에 따른 벽마찰 계수의 변화를 수위에 따라 비교하였다. 벽마찰 계수는 수위와 관계없이 바닥면에서 최대값을 가지고, 벽면을 따라 올라갈수록 작아지면서 ϕ = 60° 이상으로 올라가면 거의 일정한 값을 가진다. 수위가 높아지면 전체적으로 벽마찰 계수의 값은 작아짐을 볼 수 있다. 수위 30%에서는 최대, 최소값의 차이가 크나 수위가 높아지면서 그 차이는 점점 줄어든다. 그 이유는 수위가 작을 경우 난류 유동이 바닥면 근처에서 주로 형성되나 수위가 높아지면 측벽에서도 상대적으로 큰 강도의 난류가 형성되기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 식(10)을 접수길이를 따라서 적분하면 평균 벽마찰 계수를 얻을 수 있다. 전통적인 해석방법으로 평균 벽마찰 계수는 개수로 유동에 대한 제어체적 해석을 통해서도 구할 수 있다. 자유표면의 기울기가 채널 바닥면의 기울기와 평행할 경우 평균 벽마찰 응력은 다음 식으로 간단히 표현된다.

$$\bar{\tau}_w = \rho g R_h S \tag{13}$$

자유표면의 기울기는 단위 채널 길이당 수두 손실의 양과 같다. 즉, $S = h_L/L$이다. 수두 손실에 대한 식(14)의 Darch-Weisbach 공식을 사용하면 평균 벽마찰 계수는 Darch의 마찰 계수 f에 의해 결정된다.

$$h_L = f \frac{L}{D_h} \frac{\bar{u}^2}{2g} \tag{14}$$

$$\bar{\tau}_w = \frac{f}{4} \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \tag{15}$$

$$\overline{C_f} = \frac{f}{4} \tag{16}$$

여기서 $D_h = 4R_h$는 수력직경이며, Darch의 마찰계수는 동일한 Re 수에서 만관 상태의 관로 유동에 대한 Moody 선도로부터 추정한다.

평균 벽마찰 계수를 스테레오 PIV 데이터를 기반으로 측정된 속도분포 함수인 식(10)을 적분하여 구한 값과 제어체적 해석 방법으로 Moody 선도에서 예측된 값을 Table 2에서 수위에 따라 비교하였다. 전체적으로 속도분포 함수로부터 직접 구한 값이 만관 유동에 대한 Moody 선도로부터 예측한 값보다 크게 나타났다. 수위가 30%인 경우 그 차이가 가장 크며, 수위가 증가할수록 그 차이가 작아짐을 볼 수 있다. 수위 80%까지 증가하면 Moody 선도로부터 예측한 값과 비슷한 크기까지 작아진다. 그 이유는 수위가 낮을 경우 접수길이에 비해 유동 면적이 훨씬 더 많이 감소함으로써 벽마찰력의 영향을 더 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 특히, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 수위가 낮을수록 측벽에 비해 바닥면에서의 마찰이 상대적으로 더 커짐으로

Table 2 Averaged wall friction coefficient according to the water depth

Depth(%)	30	50	80
Re	5,693	13,541	18,974
Measured by Stereoscopic PIV	0.0232	0.0142	0.0079
Estimated by Moody chart	0.0091	0.0073	0.0067
Error(%)	60.8	48.6	15.2

인해 전체적인 평균 마찰 계수가 증가한다. 따라서 하수관거와 같이 원형 단면의 개수로 유동을 가진 관로 시스템을 설계함에 있어서 수위에 따라 마찰 손실의 예측치가 많이 달리질 수 있음을 고려해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 스테레오 PIV 기법을 이용하여 원형 개수로 유동의 3차원 속도분포를 측정하였고, PIV 데이터를 기반으로 속도분포 함수를 구하였다. 본 연구에서 구한 속도분포 함수는 난류 속도분포 형태이며, 벽 근처 속도 구배에 대한 정확한 정보를 얻을 수 있었다. 또한, 관로의 기울기가 고정된 상태에서 수위를 변화시키면서 속도분포 함수의 특성이 어떻게 변하는지 고찰하였다. 그 결과, 수위가 50%보다 낮으면 수평방향 위치별 최대 속도가 중심부에서는 자유표면 약간 아래에서 발견되고, 측벽으로 가면서 자유표면에서 존재한다. 수위가 50%보다 높으면 측벽 끝에서는 최대 속도의 위치가 관 중앙 높이에 고정되어 있고, 중심부에서는 수위 상승과 함께 조금씩 상승하나 중앙 높이를 넘지 않는다.

속도분포 함수를 미분하여 벽마찰 계수를 구하였다. 국소 벽마찰 계수는 수위와 관계없이 바닥면에서 최대값을 가지고, 벽면을 따라 올라갈수록 작아지다가 특정 높이 이상에서는 최소값으로 거의 일정한 값을 가진다. 이러한 국소 벽마찰 계수의 최대, 최소값 차이는 수위가 높아지면서 점점 줄어든다. 평균 벽마찰 계수는 수위가 높아지면 평균 유속이 증가하기 때문에 그 값은 작아진다. 그러나 원형 개수로 유동에서는 수위가 낮을수록 평균 벽마찰 계수가 만관 상태 관로의 Moody 선도로부터 예측한 값보다 훨씬 더 크게 나타난다.

참고문헌

1. Manning, R., 1891, On the flow of water in open channels and pipes, Tran. Institution of Civil Engineers of Ireland, Vol. 20, pp. 161-207.
2. Lanfear, K. J. and Coll, J. J., 1978, Modifying Manning's equation for flow rate estimates, Water and Sewage Works, Vol. 125, No. 3, pp. 68-69.
3. Enfinger, K. L. and Kimbrough, H. R., 2004, Scattergraph principles and practice-a comparison of various applications of the Manning equation, Pipelines 2004 International Conference, pp. 1-13.
4. Enfinger, K. L. and Schutzbach, J. S., 2005, Scattergraph principles and practice-camp's varying roughness coefficient applied to regressive methods, Pipelines 2005 International Conference, pp. 72-83.
5. Nezu, I. and Rodi, W., 1986, Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, J. Hydraulic Engrg., Vol. 112, No. 5, pp. 335-355.
6. Chiu, C. L., 1989, Velocity distribution in open channel flow, J. Hydraulic Engrg., Vol. 115, No. 5, pp. 576-594.
7. Chiu, C. L. and Murray, D. W., 1992, Variation of velocity distribution along nonuniform open-channel flow, J. Hydraulic Engrg., Vol. 118, No. 7, pp. 989-1001.
8. Chiu, C. L. and Said, C. A. A., 1995, Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow, J. Hydraulic Engrg., Vol. 121, No. 1, pp. 26-35.
9. Keane, R. D. and Adrian, R. J., 1992, Theory of cross-correlation analysis of PIV images, Appl. Sci. Res., Vol. 49, pp. 191-215.
10. Doorne, C. W. H. and Westerweel, J., 2007, Measurement of laminar, transitional and turbulent pipe flow using stereoscopic-PIV, Exp. Fluids, Vol. 42, No. 2, pp. 259-279.
11. Yoon, J.-I., Kim, Y., Sung, J. and Lee, M. H., 2008, A similarity of the velocity profiles according to water depth in partially filled circular pipe flows, KSV J., Vol. 6, No. 2, pp. 28-32.
12. Prasad, A. K. and Jensen, K., 1995, Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows, Appl. Opt., Vol. 34, No. 30, pp. 7092-7099.
13. Soloff, S. M., Adrian, R. J. and Liu, Z.-C., 1997, Distortion compensation for generalized

stereoscopic particle image velocimetry, Meas. Sci. Technol., Vol. 8, No. 12, pp. 1441-1454.
14. Sung, J. and Yoo, J. Y., 2001, Three-dimensional phase averaging of time-resolved PIV measurement data, Meas. Sci. Technol., Vol. 12, No. 6, pp. 655-662.
15. Scarano, F. and Riethmuller, M. L., 1999, Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset, Exp. Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 513-523.