

비만관 상태의 원형관로에서 수위에 따른 속도분포의 상사성

윤지인* · 김영배** · 성재용† · 이명호***

A Similarity of the Velocity Profiles According to Water Depth in Partially Filled Circular Pipe Flows

Ji-In Yoon, Youngbae Kim, Jaeyong Sung and Myeong Ho Lee

Abstract. Contrary to the flow rate in fully filled pipe flows, the flow rate in partially filled pipe flows is significantly influenced by the variation of water level, channel slop, and so on. The major difference in these two flows results from the existence of a free surface. To make it clear, in the present study, a similarity of the velocity profile in a partially filled circular pipe has been investigated according to the water level. A particle image velocimetry (PIV) technique was applied to measure the three-dimensional velocity profiles. As a result, there is found a similarity of the velocity profile near the central region. However, near the side wall, the similarity is broken due to the interaction between the wall and the free surface.

Key Words: Partially Filled Pipe Flow (비만관 유동), PIV (입자영상유속계), Free Surface (자유표면), Similarity (상사성), Velocity Distribution (속도분포)

1. 서 론

하수 및 오수관 내의 유동은 유체가 관을 꽉 채운 상태의 만관유동이 아니라 일부만 차 있는 비만관 유동이다. 이러한 유동을 개수로 유동 (open channel flows) 이라고도 하며, 자유표면이 존재한다는 점이 만관유동과의 가장 큰 차이점이다. 개수로 유동은 자유표면의 위치가 시간과 장소에 따라 변하기 쉽고, 또 수심·유량·수로바닥경사 및 자유표면의 경사의 상호 종속적 관계에 따라 유체의 속도분포가 매우 달라진다. 이러한 개수로 유동은 주로 토목공학 분야에서 많이 다뤄왔으며, 관의 기울기 및 수위에 따른 평균유속의 관계식인 Manning 방정식⁽¹⁾을 일반적으로 사용하여 왔다. 실험적인 Manning 방정식은 주로 정상상태, 균질유동, 개수로 유동에 적용되어진다. 하지만 유동 조건에 따른

조도계수의 적절한 선택과 바닥면과 자유표면의 기울기 차이 등에 의해 많은 오차가 발생한다. 이를 개선하기 위해 Enfinger & Kimbrough⁽²⁾는 조도계수가 일정하고 배관의 기울기와 유체의 기울기가 같다고 가정된 후 기존의 Manning 방정식을 대수학적인 방법을 이용해 수정된 Manning 방정식을 유도하였다. 또한 Lanfear & Coll⁽³⁾은 수정된 Manning 방정식을 이용하여 측정된 유량으로부터 기울기와 조도계수를 정하고 부적절한 조도계수와 기울기가 유량에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 외에도 Manning 방정식을 바탕으로 한 유량에 측의 오차를 개선하기 위한 많은 노력들이 있었지만⁽⁴⁾, 평균속도의 개념이 아닌 내부 속도분포에 대한 측정과 그 형태에 대한 고찰은 아직 보고되지 않고 있다.

관 내부의 유량을 정확히 측정하기 위해서는 무엇보다도 속도분포에 대한 정밀한 측정이 요구된다. Manning 방정식이 가지는 한계점을 이해하고 이를 바탕으로 수정된 방정식을 도출하기 위해서는 수위, 기울기 등의 변화에 따른 속도분포의 변화가 평균유속의 변화와 어떤 관계를 가지는지 밝히는 것이 무엇보다도 시급하다. 본 연구는 이에 앞서 비만관 상태의 개수로

[†]서울산업대학교 기계공학과
E-mail : jysung@snut.ac.kr

*서울산업대학교 기계공학과(학부과정)

**서울산업대학교 에너지시스템연구소

***서울산업대학교 기계공학과

유동에서 수위 변화에 따른 속도분포의 상사성이 있는 지를 살펴보고자한다. 이를 위해 PIV(Particle Image Velocimetry)기법⁽⁵⁾을 적용하여 비만관 상태의 원형관 내부의 속도분포를 3차원적으로 측정하였다. 관의 기울기가 고정된 상태에서 다양한 수위에 대해 수평방향 측정 단면의 위치를 변화시키면서 단면에 따른 속도분포의 상사성에 대해 논의한다.

2. 실험장치 및 방법

비만관 상태의 원형관 내의 수위에 따른 유속 분포를 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 원형관은 내경이 50 mm, 길이가 1880 mm인 아크릴관을 사용하였고, 펌프에서 물을 유입부에 공급하고 바이패스용 수동 밸브를 이용하여 유량을 조절하였다. 유입부에 공급되는 물의 양을 터빈 유량계로 측정하였으며, 유입부는 공기챔버 형태로 제작되어 펌프에서 발생하는 기포 및 비정상 압력 변화를 흡수하도록 설계하였다. 유입부에서 공급된 물은 시험부를 지나 유출부를 통해서 펌프로 순환되는데, 배관내의 수위는 유출부에 있는 수위조절판을 이용하여 조절하였다. 또한 관의 기울기를 조절할 수 있도록 유출부 아래에 높이 조절장치를 설치하여 기울기를 변경할 수 있도록 하였다. 입구부에 의한 자유표면의 교란이 안정되도록 시험부 앞에 관직경의 20배의 직선관로를 확보하였다. 시험부는 PIV 측정을 위하여 정사각형 단면의 아크릴 블록을 투명하게 가공하여 만들었다. 시험부 상단에 작은 슬릿을 형성하여 보정판(calibration target)을 삽입할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 2에서는 비만관 상태에서 흐르는 유동 단면모습

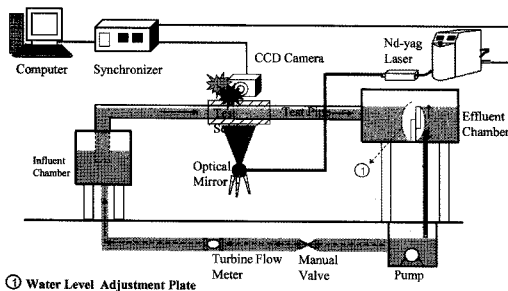


Fig. 1. Experimental apparatus and configuration of the PIV system to measure the velocity profiles in partially filled pipe flows

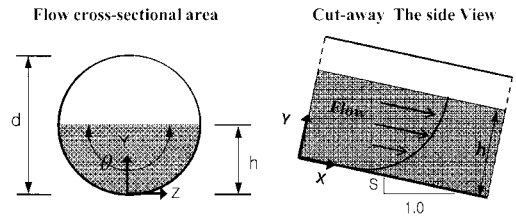


Fig. 2. Cross-section of a partially filled pipeline

을 나타내고 있다. 기울기 S 로 기울어진 관의 직경이 d , 수위가 h 라고 하면 중력의 힘만 작용하여 흐를 때의 유량은 일반적으로 다음 Manning 방정식을 사용한다.

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량, U 는 평균속도, A 는 유수단면적, $R=A/P$ 는 수력 반지름, P 는 접수길이, n 은 조도계수를 의미한다. Manning 방정식을 적용하는 경우 조도계수 n 값은 관의 재질, 거칠기 외에 유동의 상태에 따라서도 달라진다. 특히 관의 바닥면과 자유표면이 평행하지 않으면 조도계수는 많이 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 주어진 관의 기울기에 대하여 유출부의 수위 조절판을 이용하여 수위를 조절한 후 자유표면이 관의 바닥과 평행한 상태가 되는 유량을 결정하고 이를 바탕으로 식 (1)로부터 조도계수 값을 결정하였다. 관의 기울기의 경우 고정 지지대에서부터 높이 조절장치가 부착된 유출부의 눈금자까지의 수평 길이와 수평상태에 대한 유출부의 상대적인 수직 높이차를 이용하여 계산하였다. 본 실험에 사용된 관의 기울기는 $S = 0.006$ 이며, 측정오차는 6.5%이다. 이 때, 조도계수는 식 (1)로부터 $n = 0.006$ 으로 나타났다. 이와 같은 실험 조건을 결정함에 있어 Froude 수가 1보다 클 경우 수력도약으로 인한 수위의 변화가 시험부에 많은 영향을 미치므로 수력도약의 영향을 최소화하기 위해 Froude 수는 1보다 작게 실험조건을 설정하였다.

PIV 측정을 위하여 50 mJ Nd:YAG 레이저에서 나오는 빛을 구형렌즈(spherical lens)와 원통형렌즈(cylindrical lens)를 이용하여 평면광을 형성하여 시험부 바닥면을 통하여 유동장에 조사하였고, 산란된 입자영상은 1 kx1 k 해상도를 가지는 CCD 카메라로 획득하였다. 그리고 추적 입자로서 10 μm 크기의 hollow glass spheres를 주입하였다.

비만관 내 3차원 속도분포를 2차원 PIV를 이용하여

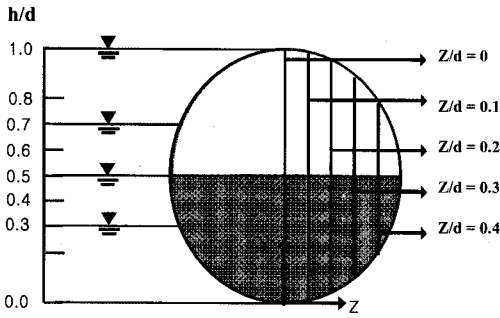


Fig. 3. PIV measurement sections for 3-D velocity distributions

측정하였으며, Fig. 3과 같이 총 5개의 평면에 대하여 측정하였다. 여기서 좌표축은 주유동 방향을 x , 높이 방향을 y , 수평방향을 z 로 하고 원점을 관 중심의 바닥면에 위치하였다. 본 실험에서는 수평방향으로 $z/d = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 의 5개 단면에 대하여 수위를 $h/d = 30, 40, 50, 60, 70, 80$ %로 변화시키면서 속도분포를 측정하였다. 측정단면의 크기는 $65 \times 65 \text{ mm}^2$ 이며, 속도 벡터사이의 간격은 중앙평면 기준으로 1.035 mm 이다.

시험부는 정사각형의 아크릴 블록을 가공하여 제작함으로써 굴절에 의한 영상왜곡을 최소화하였지만 중심면을 제외한 단면에서는 레이저 빛의 굴절에 의해 조사되는 단면이 기울어지는 현상이 나타났다. 이 문제를 해결하기 위하여 Fig. 4와 같이 스넬(Snell)의 법칙에 따른 굴절을 계산하여 레이저 평면광의 입사각을 측정단면의 위치에 따라 변경하였다. 레이저 평면광이 원하는 단면에 정확히 조사되었는지 확인하기 위하여 해당 평면 위치에 보정판을 삽입하여 이를 확인하였다. 이 그림에서 θ_1 은 원형관내로 투과하는 투과각, θ_2 는 원형관내로 입사하는 입사각, θ_3 은 사각아크릴 내로 투과하는 투과각, θ_4 는 사각아크릴 내로 입사하는 입사각, L 은 각 평면과 굴절을 고려한 사각아크릴 입사지점 사이의 거리를 나타낸다. 중앙단면이 아닌 경우 굴절 문제를 해결하기 위해 최종적으로 계산된 θ_i 의 각도로 레이저 평면광을 조사하였다.

각각의 평면에서의 시간평균 속도장을 구하기 위하여 초당 5장 샘플링된 순간속도장을 500장 획득하여 평균하였다. 또한 주유동속도의 분포함수를 구하기 위해 시간평균 유동장에서 주유동 방향으로 평균된 속도 분포를 구하였다. PIV 알고리즘은 계층적 회기에 의한 상호상관기법(recursive cross-correlation)을 사용하였

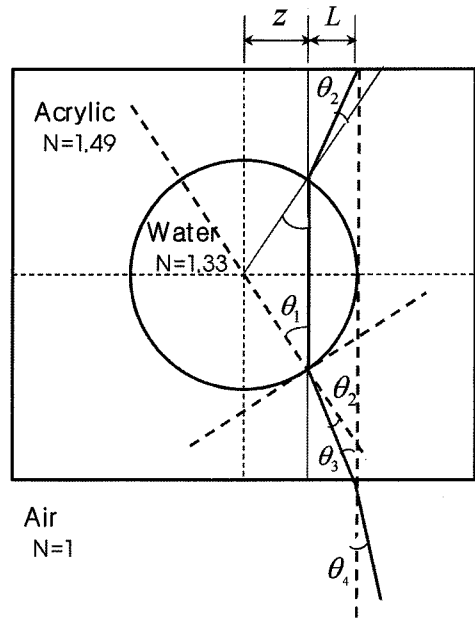


Fig. 4. Adjustments of laser light sheets to illuminate the off-axis vertical plane

다. 상관영역은 32×32 pixels로 하였으며, 50% overlap을 사용하였다. 공간 분해능을 향상시키기 위하여 64×64 pixels 상관영역에서 계산된 속도 벡터를 이용하여 두 번째 영상의 상관영역을 offset 시키는 방식^(6,7)을 사용하였다. 각 단면의 속도장을 추출함에 있어 원관에서의 빛의 굴절로 인한 속도벡터의 위치를 보정하였다. 이를 위하여 1 mm 간격으로 점을 찍은 보정판을 삽입하고 영상과 실제 길이의 관계를 2차 다항식으로 교정(fitting)한 후 속도벡터 계산에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

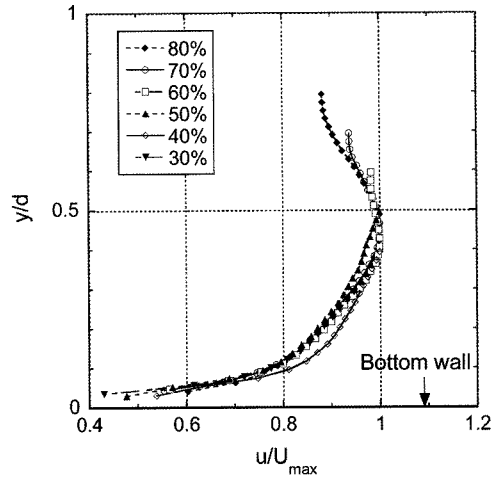
본 실험에서는 비만관 상태의 유동에서 수위에 따른 속도분포의 상사성을 고찰하기 위하여 수위를 변화시키면서 속도분포를 측정하였다. 수위에 따른 평균속도와 그에 따른 무차원수로서 $Re = UR/\nu$ 수와 $Fr = U/\sqrt{gh}$ 수를 Table 1에 나타내었다. 개수로 유동에서 Re 수가 $500 \sim 2500$ 은 천이구간으로 알려져 있다. 본 연구에서는 주어진 실험장치에서 수력도약이 일어나지 않는 조건에서 실험하기 위해 천이 영역의 Re 수를 선택하였다.

Fig. 5는 수평방향으로 5 개의 측정평면에서의 속도

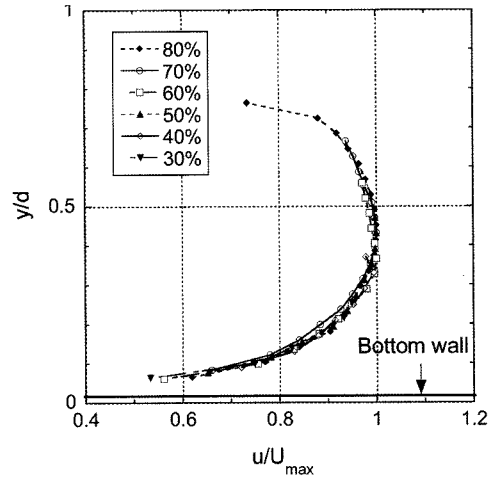
Table 1. Non-dimensional parameters

h/d (%)	U (m/s)	Re	Fr
30	0.056	477	0.968
40	0.065	695	0.101
50	0.072	898	0.103
60	0.077	1069	0.105
70	0.081	1192	0.106
80	0.082	1246	0.107

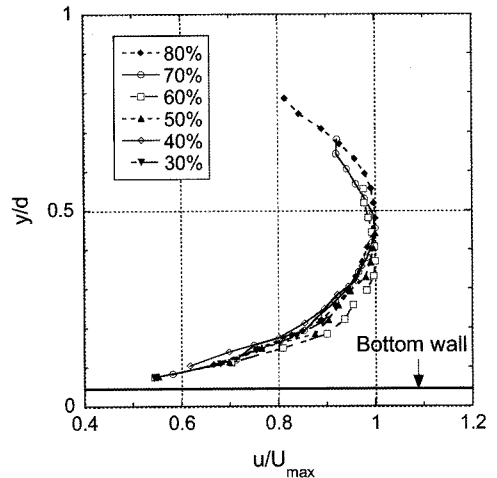
분포를 수위에 따라 비교하였다. 이 그림에서 x 축은 주유동 속도 u 를 최대속도 U_{max} 로 무차원화하였고, y 축은 높이를 관의 직경으로 무차원화하였다. Fig. 5(a)는 중심면($z/d = 0$)에서의 결과를 보여주고 있다. 최대속도 U_{max} 는 수위가 50% 이하일 경우 자유표면에서 나타나며, 수위가 50% 이상이면 최대속도의 위치가 관의 중심근처에서 고정되어 있는 모습을 볼 수 있다. 수위가 변하더라도 속도분포 곡선이 하나의 곡선으로 상사되는지를 살펴보기 위하여 수위가 50% 이하에서는 U_{max} 를 80% 수위 곡선에서 해당 수위의 자유표면 위치의 속도로 하여 무차원을 수행하였다. 그 결과 자유표면 근처를 제외하고는 전체적인 분포곡선의 상사성이 있음을 알 수 있다. 즉, 수위가 변하더라도 분포곡선의 형태는 80% 수위 곡선에서 해당 수위까지의 곡선을 그대로 따라 간다. Fig. 5(b)는 $z/d = 0.1$ 에서의 속도분포 상사성을 고찰한 그래프이며, 이 평면에서도 수위 변화에 따른 속도분포가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. $z/d = 0.2$ 평면의 결과를 나타내는 Fig. 5(c)의 결과도 대체로 상사성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 5(d),(e)와 같이 측정평면이 $z/d = 0.3, 0.4$ 로 이동할수록 수위에 따른 속도분포의 상사성이 점점 줄어드는 모습을 볼 수 있다. 이 그림에서는 중심면에서와 달리 수위가 50% 이하에서도 최대속도가 자유표면에서 나타나지 않고 그 아래에서 나타난다. 즉, 수위가 낮아지면서 최대속도의 위치도 점점 아래로 내려가는 현상을 볼 수 있다. 이는 수위가 50% 이상인 경우에도 마찬가지이며, 최대속도의 위치는 수위변화와 연동되어 같이 변한다. 측정평면이 측면으로 이동할수록 아래 벽(bottom wall)의 위치가 많이 올라가 유동영역이 매우 좁아지므로 벽에 의한 점성의 영향을 많이 받는다. 따라서 결과적으로 측벽 근처에서는 수위 변화에 따른 속도분포의 상사성이 줄어드는 현상이 나타난다. 최대속도 위치의 변화와 벽면 점성의 영향과의 엄밀한 상관관계는 향후 연구과제로 고찰할 필요가 있다.



(a) $z/d = 0$



(b) $z/d = 0.1$



(c) $z/d = 0.2$

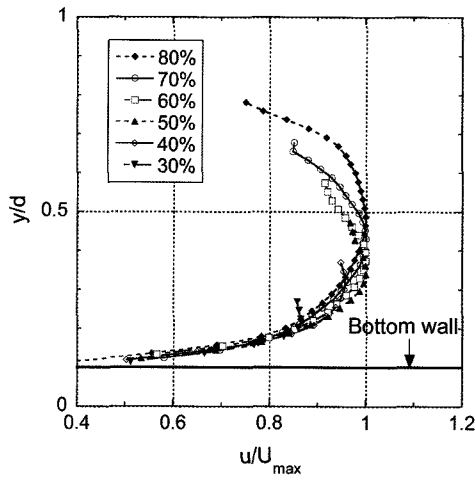
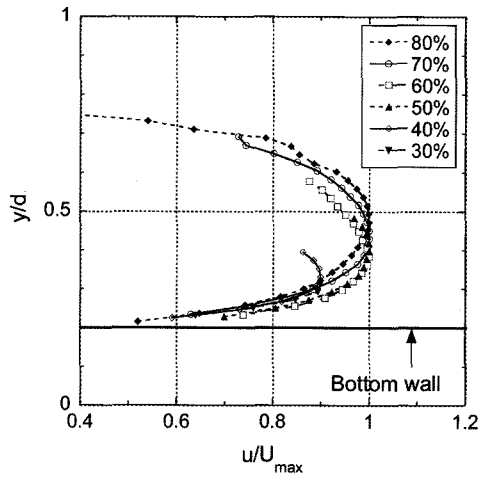
(d) $z/d = 0.3$ (e) $z/d = 0.4$

Fig. 5. Normalized velocity profiles according to the water level observed in the several lateral positions

4. 결 론

본 연구에서는 PIV 측정 기법을 이용하여 비만관 상태의 원형관에서 수위에 따른 속도분포의 상사성을 수평방향 단면 위치에 따라 고찰하였다. 그 결과 중심면

근처에서는 수위가 낮아지더라도 최대수위에서의 속도분포와 상사성을 유지하고 있었으나 측벽으로 갈수록 그 상사성이 점점 떨어짐을 확인하였다. 중심면 근처에서는 수위 50%를 기점으로 이 보다 낮은 수위에서는 최대속도의 위치가 자유표면에 있는 반면 수위가 높으면 최대속도의 위치가 관의 중심에 고정된 형태를 보인다. 측벽 근처에서는 수위가 50% 이하에서도 최대속도의 위치가 항상 자유표면 아래에 존재하며, 수위가 50% 이상에서도 최대속도의 위치가 관의 중심에 고정되어 있지 않고 수위 변화에 따라 같이 변한다.

참고문헌

- 1) Manning, R., 1891, "On the Flow of Water in Open Channels and Pipes," *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, Vol. 20, pp. 161-207.
- 2) Enfinger, K. L. and Kimbrough, H. R., 2004, "Scattergraph Principles and Practice - A Comparison of Various Applications of the Manning Equation," *Proc. ASCE Pipeline Division Specialty Conference*, pp. 1-13.
- 3) 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.
- 4) Enfinger, K. L. and Schutzbach, J. S., 2005, "Scattergraph Principles and Practice - Camp's Varying Roughness Coefficient Applied to Regressive Methods," *Proc. ASCE Pipeline Division Specialty Conference*, pp. 72-83.
- 5) 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.
- 6) Scarano, F. and Riethmuller, M. L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," *Exp. in Fluids*, Vol. 26, pp. 513-523.
- 7) Hart, D. P., 1998, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation," *Proc. VJSJ-SPIE98*, AB149, pp. 1-10.