

PIV를 이용한 비만관내 유속 분포 측정

최중근, 성재용*†, 이명호*

서울산업대학교 에너지환경대학원, *서울 산업대학교 기계공학과

Measurements of Velocity Profiles Inside a Partially Filled Pipeline Using PIV

Junggeun Choi, Jaeyong Sung*†, Moungho Lee*

The Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

ABSTRACT: Velocity profiles inside a partially filled pipeline have been investigated experimentally. To measure the velocity fields, a particle image velocimetry (PIV), which is a recent quantitative visualization technique, is applied. The velocity profile inside a circular pipe is well known, but if the pipe is partially filled, the problem is entirely different in the sense that the velocity distribution is significantly affected by the slope of pipe and filled water level, and so on. In order to calculate exact flow rate in the open channel or partially filled pipeline, three-dimensional velocity distributions at a given cross-sectional area are measured and compared the flow rates with the previously known empirical formula of Manning equation. The results show that the velocity profiles at center plane is considerably different from each other when the slope and water level change. Thus, The three-dimensional velocity profile can be the most plausible estimate for the exact flow rate.

Key words: Partially filled pipeline(비만관), Manning equation(매닝 방정식), PIV(입자영상유속계), Velocity profile(유속 분포)

기 호 설 명

- n : 조도계수
- R : 시험부의 수력반지름, A/P[m]
- S : 시험부의 기울기
- V : 평균유속, [m/s]
- V_m : 만관에서의 평균유속, [m/s]
- F : Froude 수, $\frac{V}{\sqrt{gh}}$

1. 서 론

유량은 온도, 압력, 레벨, 습도 등과 함께 산업 현장에서 가장 많이 측정되는 측정량 중의 하나이며, 현대의 산업현장의 많은 물질이나 에너지가 유체의 형태를 갖고 공급되고 있으므로 유량을 정밀하게 측정하고 제어하는 것은 매우 중요하다. 환경정책이 총량관리제로 바뀌었고, 또한 4대강을 중심으로 대대적인 하수관거 정비 사업을 통한 하천 수질보전에 막대한 재원을 투입하고 있다. 이러한 하수관거유량측정과, 공장폐수 및 방류량을 적절하게 측정할 수 있는 가장 유효하고, 비만관 형태의 유체유동의 속도분포장과 수위를 함께 측정할 수 있는 유량계 개발과 이를

†Corresponding author

Tel.: 02-970-6398; fax: +82-02-949-6483

E-mail address: jysung@snut.ac.kr

위한 기초 연구에 관한 필요성이 많이 제기되어 왔다.

기존의 Manning 방정식을 이용한 개수로 또는 원형관에 속도 분포를 구하는 방법^(1,2)에 대한 연구는 많이 이루어졌으나 비만관내의 속도분포에 대한 정량적인 해석을 수행하기에는 한계가 있었다. 실험적인 Manning 방정식은 주로 정상상태, 균질유동, 개수로 유동에 적용되어진다. 하지만 유동 조건에 따른 조도계수의 적절한 선택과 원형관 및 유체의 기울기의 측정이 오차의 주요 원인이라고 할 수 있다. 따라서 Enfinger와 Keefe⁽³⁾ Stevens⁽⁴⁾는 조도계수가 일정하고 배관의 기울기와 유체의 기울기가 같다고 가정하고 기존의 Manning 방정식을 대수학적인 방법을 이용해 수정된 Manning 방정식을 유도하였고 이를 통해 원형관내의 평균유속을 계산하였다.

현재 원형 관내의 속도 분포에 대한 연구는 활발히 진행되는 반면에 비만관내의 속도분포의 경우 관내의 수위, 배관 및 자유 수면의 기울기, 표면 거칠기에 따른 점성력에 의해 매우 복잡하고 이로 인해 비만관 흐름의 정확한 유량을 계산하는 것은 더욱 어렵다. 지금까지는 실험적인 Manning 방정식을 통해 유량을 측정하였지만 배관내의 각각의 위치의 점측정 방식을 이용하여 평균유속을 산정할 경우 정확도가 매우 낮아지게 된다. 따라서 유량을 정확히 해석하기 위해서는, 유동장을 공간상의 동시 다점 비접촉 계측기법을 이용한 계측 기법이 요구 되어지고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 PIV(Particle Image Velocimetry)기법⁽⁵⁾을 이용하여 비만관내의 3차원 유속 분포를 정확히 계측 하고 기존에 잘 알려진 Manning 방정식의 데이터와 실험을 통해 얻어낸 데이터를 근거로 비만관내의 기울기와 수위에 따른 영향력이 유속 분포에 미치는 영향을 조사 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

비만관내의 유속 분포를 측정하기 위한 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 시험부의 크기는 폭 8 cm × 높이 8 cm × 길이 20 cm 이다. 실생활에서 사용되어지는 하수관 시스템에 상사법칙을

적용하였으며 실험 조건은 Table 1에 정리되어 있다. 조도계수인 n 값은 정확히 산정하는 방법이 없으므로 조도계수 결정에 큰 난점이 있다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 사용되어지고 있는 조도계수 표를 참고하여 0.01의 값을 적용하였으며 배관의 기울기는 수평거리/수직거리의 공식을 이용하여 기울기를 결정하였고 Froude 수는 1보다 작은 상태에서 실험을 하였다.

PIV 측정을 위한 측정영역의 경우 직육면체의 아크릴 블록을 가공하여 투명하게 보이도록 하였다. 이렇게 제작되어진 시험부는 각 매질의 굴절률이 일치하지 않아서 발생하는 영상의 왜곡을 만들게 된다. 이를 보정하기 위해 직육면체의 아크릴 블록 내에 물을 채워 굴절률에 의해 발생하는 영상의 찌그러짐을 줄일 수 있었다⁽⁶⁾. 또한 시험부에서 발생하는 반사광을 방지하기 위하여 카메라가 촬영하는 면과 레이저 빛이 통과하는 틈을 제외한 나머지 길면에 무광의 검은 색지를 붙였다. 펌프는 유입부(Influent Chamber)에 작동 유체인 물을 공급하고 수동 밸브를 이용하여 유량을 조절하였다. 지름이 5 cm인 원형관에 물

Table 1. Experimental conditions

Roughness coefficient (n)	0.01
Pipe size	50 mm
Water Depth (h/d)	0.25, 0.5, 0.75
Slope(m/m)	0.00136705, 0.00273411 0.00410116, 0.0054

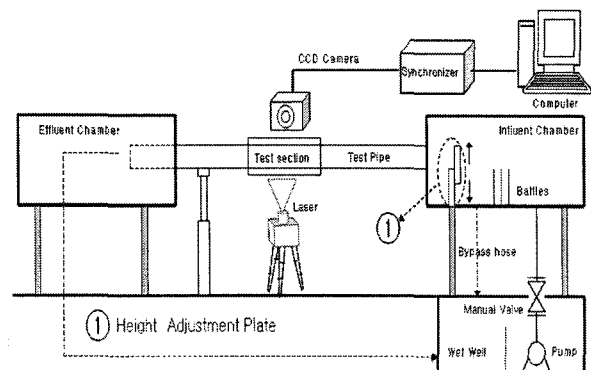


Fig. 1 Experimental apparatus for the measurement of velocity profiles inside a partially filled pipeline.

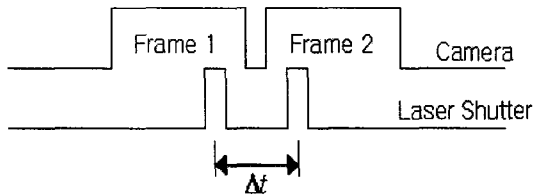


Fig. 2 Frame straddling signal of a PIV system.

이 유입되기 전에 연속적인 3개의 배플을(Baffle) 거치면서 유입부내에 설치하여 들어오는 물의 교란을 최소화 하였다.

관내의 유체의 유동을 관찰하기 위하여 배관의 축에 대하여 수직으로 설치된 CCD 카메라로 촬영하였다. 50 mJ Nd:YAG 레이저에서 나오는 빛은 2개의 거울 (OMA. MODEL 10QM20HM.35)를 통해 레이저 빛의 방향을 바꾸고 구형렌즈(Spherical Lens)와 원통형렌즈(Cylindrical Lens) 통해 측정 영역에 레이저 빛을 조사 하였다. 유동장에 주입된 10 μ m 크기의 Hollow Glass Spheres를 산란시켜 측정단면을 가시화하였고 frame straddling 방식의 카메라와 레이저의 동기신호가 Fig. 2에 나타나 있다. 짧은 시간 간격으로 빛을 끊어주는 레이저 셔터와 동기되어 작동하는 CCD 카메라(MEGAPLUS, ES 1.0)로 2장의 연속적인 입자 영상을 획득하였으며, 총 100장의 시간평균 속도장을 구하였다.

상호상관법으로 구한 입자의 변위와 영상 사이의 시간 간격으로부터 2차원 속도 벡터를 계산하였다. 상관영역은 32 \times 32로 하였으며 50%의 overlap을 사용하였다. 공간 분해능 향상시키기 위하여 64 \times 64 상관영역에서 계산된 속도 벡터를 이용하여 두 번째 영상의 상관영역을 offset시키는 방식^(7,8)을 사용하였고, 픽셀 단위 이하의 밀도를 얻을 수 있도록 상호상관 계수의 peak를 Gaussian 보간법을 사용하였다. FFT 계산법으로 정확한 속도값을 얻기 위해서는 입자변위의 크기가 상관영역 한 변의 길이의 25%를 넘지 않는 것이 좋으므로 우선 속도의 크기가 이 범위를 넘는 벡터를 오류벡터로 간주하였다. 또한, 상호상관함수의 신호 대 잡음비율이 임계치보다 작으면 역시 오류벡터로 취급하였다.

3. 실험결과 및 고찰

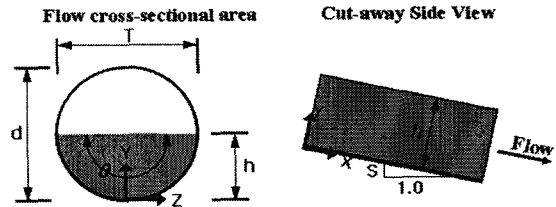


Fig. 3 Cross-section of a partially filled pipeline.

매끈한 비만관내의 속도분포에 관한 실험적 연구의 타당성을 검증하기 위하여 점측정이 아닌 각각의 단면의 유체의 유동을 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. Fig. 3에서는 비만관 상태에서 흐르는 유동 단면모습을 나타내고 있다. 직경이 d인 관에 수위는 h이고 흐르는 유체의 폭은 T로 나타낸다.

기존에 연구 되어진 원형 단면 비만관 수로의 특성을 살펴보게 되면 유속이 최대값을 가지는 수위는 관 지름의 81.3%(h=0.813d)되는 지점이며, 유량이 최대값을 가지는 수위는 관 지름의 93%(h=0.938d)되는 지점이다⁽⁹⁾. 이는 실험적인 Manning 방정식을 통해 다음과 같이 표현할 수 있으며 정상적인 유체 흐름 조건에서는 유속과 수위 그리고 유량이 각각 최대가 되는 조건이 다른 수위에서 얻어진다는 사실로부터 유도 되었다 Manning 방정식은 개수로 흐름의 평균유속공식으로 가장 널리 쓰이며 아일랜드의 토목기사 Robert Manning이 1889년 이 공식을 제안했고 그 후 수정되어 다음과 같은 식의 형태로 기술된다.

여기서 V는 평균 유속, A는 유수단면적, P는 접수길이, R은 수력 반지름, F는 Froude 수, n은 조도계수를 의미한다.

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

$$R = \frac{A}{P} \quad (2)$$

$$A = \frac{d^2}{8} (\theta - \sin(\theta)) \quad (3)$$

$$P = \frac{\theta d}{2} \quad (4)$$

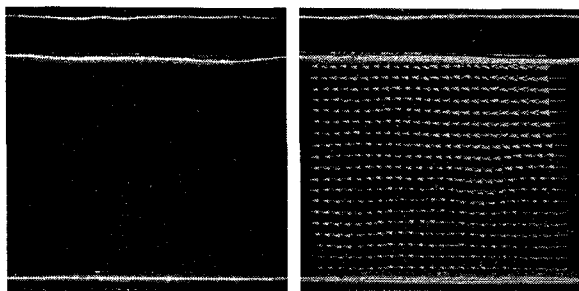
$$T = 2\sqrt{y(d-h)} \quad (5)$$

$$Y = \frac{d}{2} [1 - \cos(\frac{\theta}{2})] \quad (6)$$

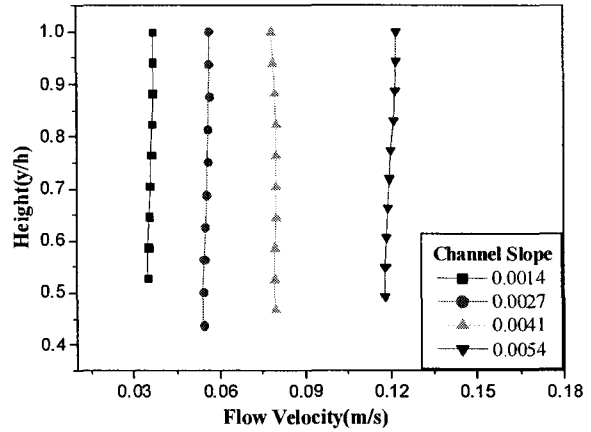
$$F = V \sqrt{\frac{T}{gA \cos(\tan^{-1} S)}} \quad (7)$$

현재 대부분의 하수관거 시스템에서 유량을 측정할 경우 식(1)을 이용하여 평균 속도를 계산하게 된다. 하지만 Manning 방정식은 주로 정상상태, 균일 속도 개수로 유동에 적용되어 지고 있으나 유동 조건에 따른 조도계수(n)와 기울기(S)의 선택에 따라 많은 오차가 발생하게 된다. 본 실험에서는 기울기와 수위에 따른 속도 분포를 구하기 위하여 배관의 기울기를 Table 1과 같이 4가지로 변화시켰으며 수위도 3가지로 조정하여 측정 하였다. 그리고 PIV 실험을 통하여 각각의 기울기와 수위에 따라 총 200장의 영상을 얻었으며 상호상관기법을 적용하여 총 100장의 속도벡터를 계산하고 이를 평균하여 구하였다. Fig. 4(a)의 그림은 PIV 측정 기법을 이용하여 실험을 통해 얻은 영상을 나타내며 Fig. 4(b)의 영상은 상호상관 기법을 적용하여 얻은 속도벡터장을 나타내고 있다.

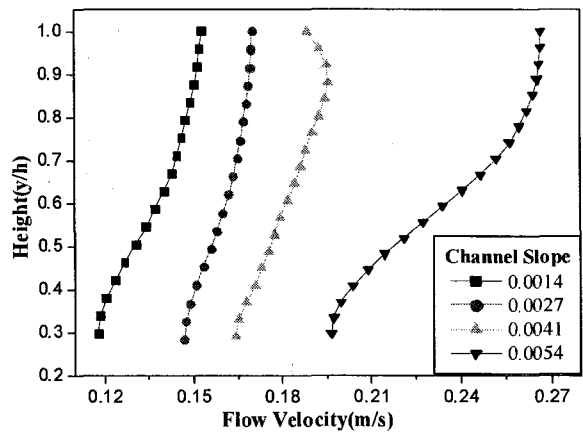
Fig. 5는 수위를 고정시켜 놓고 관의 기울기를 변화시키며 깊이에 따른 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 수위가 12.5 mm (h/d=0.25)인 경우에 기울기를 변화시키며 관내의 속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전형적인 포물선 형태의 속도 분포와는 많은 차이를 보이고 있다. 또한 기울기가 커짐에 따라 속도값이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 수위



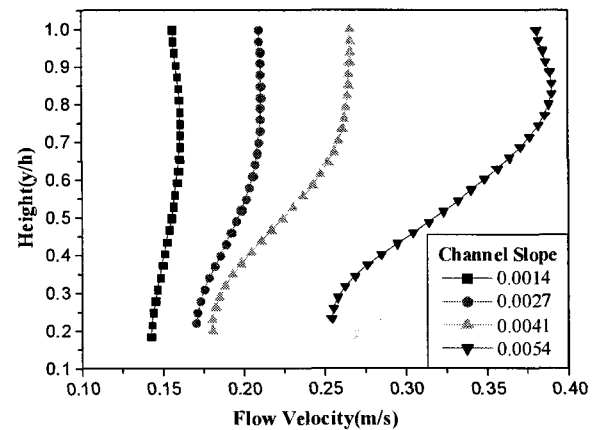
(a) original image (b) Processing image
Fig. 4 Image processing step.



(a) Water depth (h/d = 0.25)



(b) Water depth (h/d = 0.5)



(c) Water depth (h/d = 0.75)

Fig. 5 Velocity profiles obtained for various water depths and channel slopes.

가 25 mm ($h/d=0.5$)인 경우에 속도 분포를 나타낸 것이다. 전형적인 포물선 형태의 속도 분포와 유사하게 나타나고 있으며 벽근처에서 보다 자유표면 쪽으로 올라갈수록 속도 값이 월등히 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 속도가 커짐에 따라 벽면에서의 점성력 또한 크게 작용한다는 것을 의미하며 이에 따라 벽근처에서 보다 자유표면 쪽으로 갈수록 속도가 빨라진다. 그 이유는 자유표면에서는 두개의 유체가 만나지만 물과 공기처럼 밀도비가 클 경우 공기에 의한 마찰저항이 거의 없기 때문이다. Fig. 5(c)는 수위가 37.5 mm ($h/d=0.75$)인 경우에 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(b)에서와 마찬가지로 전형적인 속도 분포 곡선 유사하게 나타내고 있으며 기울기가 커짐에 따라 속도값이 전체적으로 커짐을 볼 수 있으며 Fig. 5(b)에서 보다 상·하류 사이에 속도값의 차가 더욱 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 비만관내의 수위가 $h/d=0.5$ 이고 기울기가 0.0027인 경우 3차원 속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 관의 표면이 맞닿는 바닥면과 옆쪽면에서는 관내부의 점성력에 의해 속도값이 작은 것을 알 수 있으며 관내부의 점성력의 영향을 받지 않는 상류 중앙 부분에서 가장 빠른 속도분포를 나타냄을 볼 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건이며 Manning 방정식을 이용하여 얻은 평균 유속과 PIV 측정 방법으로 측정된 평균 유속을 비교하고 있다. 실험 데이터의 경우 시험부의 Z축으로 5mm씩 이동하며 각각의 단면을 측정하였고, 각 단면의 유속 분포를 도출하였으며 실험을 통해 얻은 데이터를 적분하여 평균 유속을 계산 하였다. 그림에서 보면 Manning 방정식을 이용하여 구한 평균 유속과 8%정도의 속도차를 보이고 있다. Manning 방정식을 이용하여 평균속도를 계산할 경우 각각의 유동 조건에 따라 조도계수와 배관의 기울기 값의 선택이 달라질 수 있다.

본 실험에서 평균 속도값이 크게 측정된 이유는 정확한 유량 측정을 하지 못한 것에 기인하며 부차적인 원인으로서는 실험에 사용한 레이저 장치의 정렬상태, 관의 조도, 사용유체의 종류, 관의 직경, 충분한 유량 등 실험조건외의 차이에서 발생한 것으로 사료된다. 이러한 오차는 불

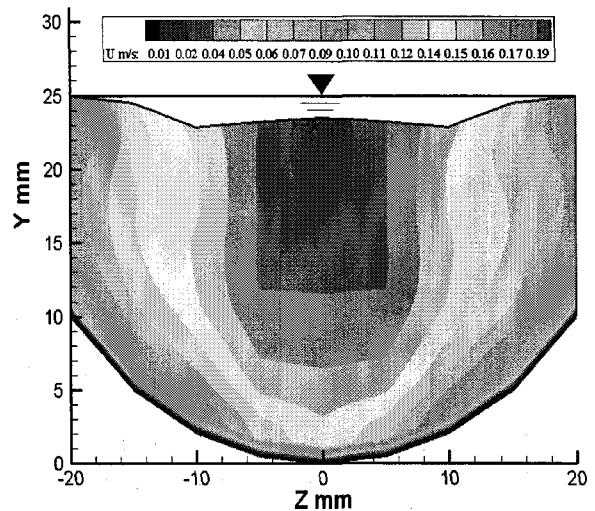


Fig. 6 Contour of 3-D velocity distribution inside a partially filled pipeline. ($h/d = 0.5$)

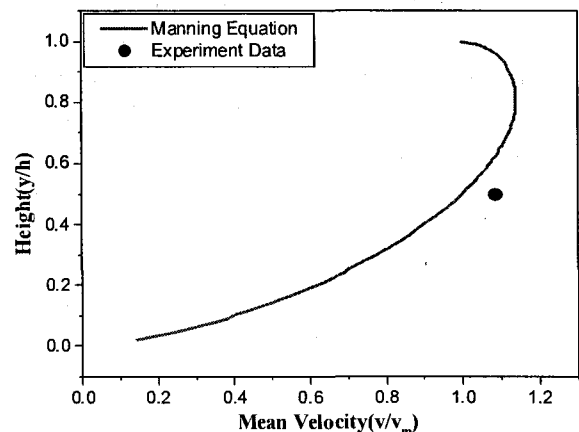


Fig. 7 Comparison experiment data with manning equation inside a Partially filled pipeline. ($h/d = 0.5$)

확실성 해석(uncertainly analysis)을 수행하여 해석한다면 정량적으로도 좋은 결과를 얻을 수 있을 거라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 PIV 측정 기법을 이용하여 비만관내의 속도분포를 기울기, 수위의 변화에 따라 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 비만관내의 유속분포를 정확하게 측정하므로써 정확한 평균속도를 얻을 수 있으며 이를

통해 정확한 유량을 계산할 수 있다.

- (2) 기울기가 커짐에 따라 유속이 빠르게 되고 유속과 수위에 변화에 따라 속도 분포도 다르게 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 실험을 통해 얻은 3차원 속도 분포를 고찰한 결과 수위와 기울기에 따라 속도 분포가 변하지만 유동 조건에 상관없이 항상 동일한 속도 분포를 나타내는 Manning 방정식의 한계점을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Stevens, P. L and Schutzbach, J. S., 1999, New diagnostic tools improve the accuracy of the Manning equation, proceedings of the water environment federation.
- (2) Lanfear, K. J. and Coll, 1978, Modifying Manning's Equation for Flow Rate Estimates, pp. 68-69.
- (3) Enfinger, K. L. and Keefe, P. N., 2004. Scattergraph principles and practice - building a better view of flow monitoring data, KY-TN Water Environment Association Water Professionals Conference.
- (4) Stevens, P. L., 1997, The Eight types of sewer hydraulics, Proceedings of the Water Environment Federation Collection Systems Rehabilitation and O&M Specialty Conference.
- (5) 성재용, 유정열, 2000, PIV계측에 의한 실린더 근접후류에서 2차 와류의 특성 연구, 대한기계학회 추계학술대회 논문집B, pp. 404-409
- (6) Broder, D. and Sommerfeld, M., 2001, Experimental studies of the hydrodynamics in a bubble column by an imaging PIV/PTV-system, 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry. pp. 1-12.
- (7) 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.
- (8) Hart, D. P., 1999, Super-resolution PIV by recursive local-correlation, J. of visualization, Vol. 10.
- (9) 윤용남, 1999, 수리학(기초와 응용), 청문각