

비만관 개수로 유동 특성 연구

최중근* · 성재용† · 이명호**, 이석종*

A study on flow characteristics in a partially filled open channel

Jung Geun Choi · Jaeyong Sung · Myeong Ho Lee · Sukjong Lee

Abstract

Flow rate measurement is one of the difficult problems in the industrial applications. Especially, flow rate in a partially filled pipeline is affected by many parameters such as water level, channel slop, etc. In the present study, prior to the development of a flowmeter, the flow characteristics has been investigated by particle image velocimetry (PIV) measurements. Three-dimensional velocity distributions were obtained from sectional measurements of velocity profiles according to the water level. As a result, it is found that there is no similarity in the velocity profile when the lateral position is changed. In addition, the maximum velocity does not always occur on the free surface. It depends on the water level. In the aspect of flow rate measurement, the previous calculus based upon point measurement techniques is proved to be inaccurate because of the lack of whole flow information.

Key Words : Partially Filled Pipeline (비만관), PIV (입자영상유속계), Free Surface (자유표면), Flowmeter (유량계), Three-Dimensional Velocity Distribution (3차원 속도분포)

1. 서 론

유량은 온도, 압력, 레벨, 습도 등과 함께 산업 현장에서 가장 많이 측정되는 측정량 중의 하나이다. 특히, 현대의 산업현장에서는 많은 물질이나 에너지가 유체의 형태를 갖고 공급되고 있으므로 유량을 정밀하게 측정하고 제어하는 것은 매우 중요하다. 하지만 여전히 우리나라 전체의 유량 측정 최대 오차가 48%에 달하며 이에 따른 손실액 또한 매우 크다.

하수 및 우수 관거내의 유동은 만수상태로 흐

르지 않으며 상부는 공기와 접하며 하부는 물로 채워진 개수로 유동 형태를 지니고 있다. 개수로 유동은 자유수면의 위치가 시간과 장소에 따라 변하기 쉽고, 또 수심·유량·수로바닥 경사 및 자유수면의 경사의 상호 종속적 관계에 따라 유동이 매우 복잡하다.

현재 유량 비만관내의 유량 측정은 유체의 종류, 물성, 그리고 측정조건에 따라 차압유량계, 용적유량계, 전자유량계, 와류유량계, 터빈유량계, 초음파유량계 등에 의해 측정되고 있다. 하지만 대부분의 유량계의 경우 유동을 방해해 압력손실을 야기 시키고 초음파유량계는 설치가 간편하고 비접촉식인 장점을 가지고 있는 반면에 점측정 방식을 이용하여 유량을 측정하므로 정확도가 낮은 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 하수관거 유량측정과, 공장폐수 및 방류량을 적절하게 측정할 수 있는 가장 효율적이고 비만관 형태의 유체유동의 속도분포장과 수위를 함께 측정할 수

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

* 서울산업대학교 에너지환경대학원

** 서울산업대학교 기계공학과

있는 유량계 개발과 이를 위한 기초 연구에 관한 필요성이 많이 제기되어 왔다.

지금까지는 1889년 아일랜드의 토목기사인 Robert Manning에 의해 제안된 Manning 방정식⁽¹⁾을 통해 유량을 측정하였으나 배관내의 각각의 위치의 점측정 방식을 이용하여 유량을 측정할 경우 정확도가 매우 낮아지게 된다. 기존의 Manning 방정식을 이용한 개수로 또는 원형관에 속도 분포를 구하는 방법⁽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 측정에서 많은 오차가 발생하게 된다. 따라서 Enfinger & Keefe⁽³⁾ Stevens⁽⁴⁾는 조도계수가 일정하고 배관의 기울기와 유체의 기울기가 같다고 가정한 후 기존의 Manning 방정식을 대수학적인 방법을 이용해 수정된 Manning 방정식을 유도하였고 이를 통해 원형관내의 평균유속을 계산하였다. 또한 Kenneth. et al.⁽⁵⁾은 수정된 Manning 방정식을 이용하여 측정된 유량으로부터 기울기와 조도계수를 정하고 부적절한 조도계수와 기울기가 유량에 미치는 영향에 대해 계산하였다.

따라서 유량을 정확히 해석하기 위해서는 유동장을 공간상의 동시 다점 비접촉 계측기법을 이용한 계측 기법이 요구되어지고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 비만관내의 3차원 유속분포와 유량을 측정하고자 한다. 측정된 유량값은 Manning 방정식으로 구한 유량값 및 점 측정 방법으로 구한 유량값과 비교 분석 하고자한다. 또한 수평방향 위치에 따른 속도분포의 변화에 대해 논의한다.

2. 실험장치 및 방법

비만관내의 유속 분포를 측정하기 위한 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 배관의 총 길이는 1243 mm 이며, 유입부(Influent Chamber)는 유체의 유동이 완전발달유동이 될 수 있도록 20D(1000mm)로 하였으며 시험부의 크기는 폭 8 cm × 높이 8 cm × 길이 20 cm 이다. PIV 측정을

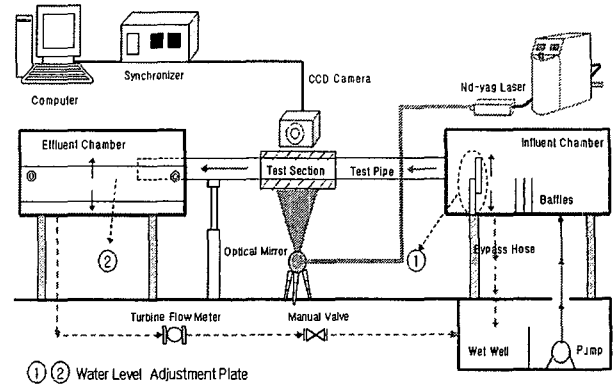


Fig. 1 Experimental apparatus and configuration of the PIV system to measure the velocity profiles inside a partially filled pipeline

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⁾. 펌프는 유입부에 작동 유체인 물을 공급하고 수동 밸브를 이용하여 유량을 조절하였다. 지름이 5 cm인 원형관에 물이 유입되기 전에 연속적인 3개의 배플을(Baffle)거치면서 유입부내에 설치하여 들어오는 물의 교란을 최소화 하였으며, 배관내의 수위는 유입부와 유출부에 있는 수위조절판을 이용하여 조절하였다.

Manning 공식을 적용하는 경우 조도계수 n 값을 정확히 선정하는 방법이 없으므로 n 의 결정에 큰 난점이 있다. 따라서 본 논문에서는 다음 식을 이용하여 조도계수를 선정하였다.

$$n = \frac{R^{2/3}}{V} \sqrt{\frac{\Delta H}{\Delta x}} \quad (1)$$

배관의 기울기는 유입부와 유출부에 8 mm 직경의 액주계를 설치하고 액주계의 차를 기울기로 결정하였다. 또한 Froude 수가 1보다 클 경우 수력도약으로 인한 수위의 변화가 시험부에 많은 영향을 미치므로 수력도약의 영향을 최소화하기 위해 Froude 수는 1보다 작게 실험조건을 설정하였다. 또한 유출부를 통해 흘러나오는 물은 터빈 유량계를 거쳐 유입부로 리턴 되며 터빈유량계를

이용하여 유량을 측정하였다.

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)를 통해 측정 영역에 레이저 빛을 조사 하였다. 유동장에 주입된 10 μm 크기의 Hollow Glass Spheres를 산란시켜 측정단면을 가시화하였다. CCD 카메라(MEGAPLUS, ES 1.0)는 1 k x 1 k 해상도를 가지며, 총 100장의 순간 속도장을 평균하여 시간평균 속도장을 구하였다. 상호상관법으로 구한 입자의 변위와 영상 사이의 시간 간격으로부터 2차원 속도 벡터를 계산하였다. 상관영역은 32 × 32 pixels로 하였으며, 50% overlap을 사용하였다. 공간 분해능 향상시키기 위하여 64 × 64 상관영역에서 계산된 속도 벡터를 이용하여 두 번째 영상의 상관영역을 offset 시키는 방식^(7,8)을 사용하였다.

3. 비만관 유량 측정 기법

Fig. 2는 초음파 유량계의 유량 측정 방식에 따른 측정 위치를 나타내고 있다. 비접촉유량계인 초음파 유량계의 경우 ① 0.9 × U_{max} , ②

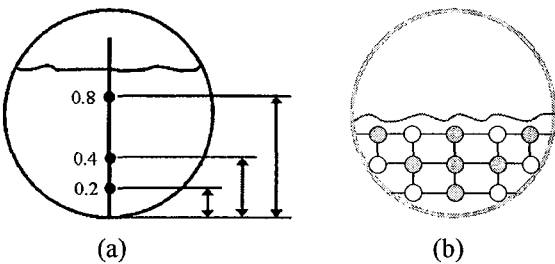


Fig. 2 Methodology for flow rate estimate from point measurement technique

0.2, 0.4, 0.8 × Depth , ③ 0.4, ④ 2-D 방식과 같은 4가지 방식으로 유량을 측정한다. ① 방식은 전체 단면적에 대해 여러 점의 유속을 측정하고 그중 가장 빠른 유속에 0.9를 곱해서 나온 값을 전체 평균 유속값으로 정하고, ② 방식은 0.2, 0.4, 0.8인 지점에서 유속을 측정하고 0.2/0.8 지점

의 유속을 평균해서 나온 값과 0.4지점 유속값을 다시 평균하여 전체 평균 유속값으로 정한다. ③ 방식은 0.4 지점의 유속을 전체 평균 유속값으로 하며, ④ 방식은 Fig. 4의 (b)와 같이 여러 지점 유속을 측정하고 평균하여 전체 평균 유속값으로 정하게 된다. Fig. 4에서는 비만관 상태에서 흐르는 유동 단면모습을 나타내고 있다. 직경이 d인 관에 수위는 h이고 흐르는 유체의 폭은 T로 나타낸다. 다음 식은 유량을 구하기 위한 Manning 방정식이다.

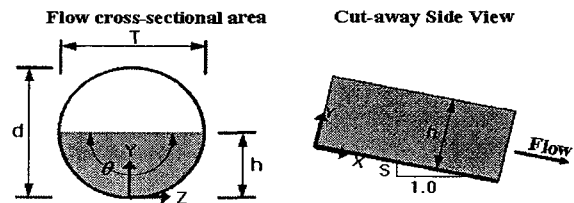


Fig. 4 Cross-section of a partially filled pipeline

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

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

여기서 Q는 유량, A는 유수단면적, P는 접수길이, R은 수력 반지름, n은 조도계수를 의미한다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 비만관 내 3차원 속도분포를 2차원 PIV를 이용하여 여러 단면에서 측정한 후 합성하였다. Fig. 3에 수위 h/d에 따른 수평방향

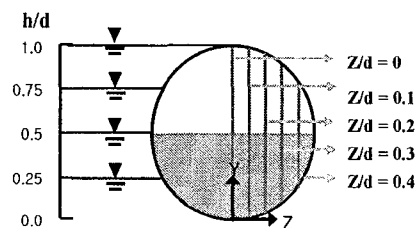


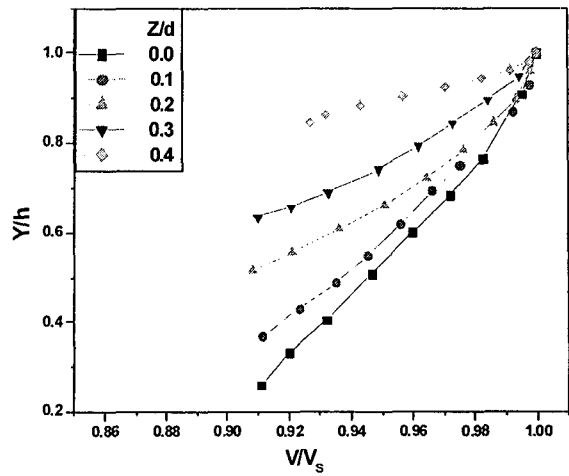
Fig. 3 PIV measurement sections for 3-D velocity distributions

측정단면을 나타내고 있다. 측정단면은 중심으로 부터 Z축을 따라 5 mm 씩 이동하며 측정하였다.

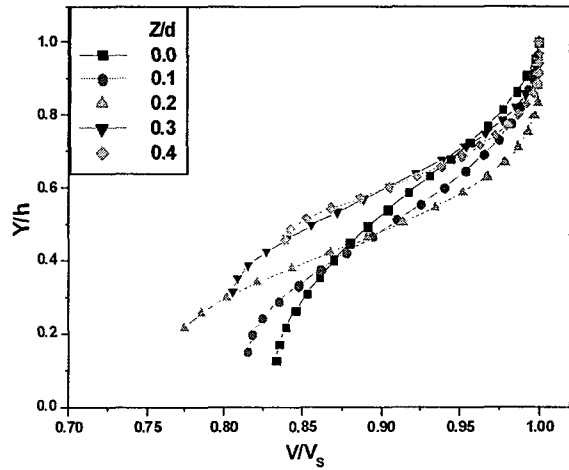
Fig. 5는 수위가 $h/d = 0.25, 0.5, 0.75$ 일 때 단면의 변화에 따른 속도 분포를 나타낸다. 수평 축은 각 위치의 유속을 자유표면의 속도로 무차원화 하였으며, 수직축은 자유표면의 높이로 무차원화 하였다. 수평방향 위치에 따라 측정단면을 변화해 가며 각각의 단면의 속도 분포의 상관 관계를 비교해 보았다. 그 결과 그림에서 알 수 있듯이 단면별 속도분포의 상사성이 없다는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 중심단면에서 벽 쪽으로 갈수록 점성력의 영향이 더욱 더 커지기 때문이다.

Fig. 6은 수위가 $h/d = 0.75$ 일 경우 시간평균 속도장으로부터 얻은 3차원 속도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 최대속도의 수평방향 위치는 중심축($Z = 0$)에서 나타난다. 그러나 최대속도의 수직방향 위치는 자유표면이 아니라 자유표면 바로 아래에서 일어난다. 일반적인 개수로 유동에서는 자유표면에서의 속도가 최대이나 원형관인 경우 수위에 따라 벽마찰력이 영향을 미치는 범위가 달라지기 때문이다. Fig. 5의 결과에서 볼 수 있듯이 수위가 $h/d = 0.25, 0.5$ 인 경우는 자유표면에서의 속도가 최대이고 수위가 상승함에 따라 최대속도의 위치가 상승한다. 그러나 $h/d > 0.5$ 이면 수위가 상승하더라도 최대속도의 위치가 동일하게 상승하지 않으며, 점차 원형관의 중심으로 최대속도의 위치가 하강한다.

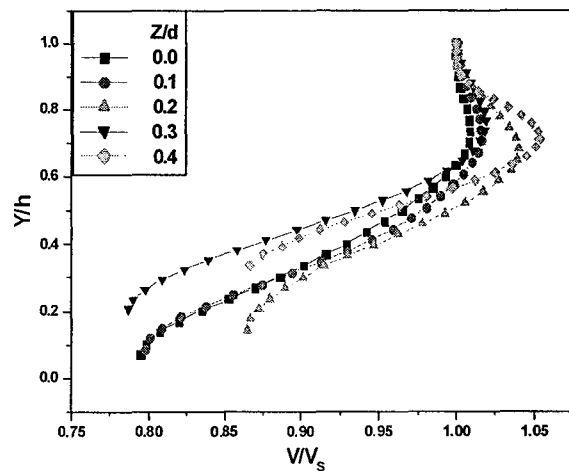
3차원 속도분포를 적분하여 유량을 산출할 수 있으며, Table 1에서는 기존의 점측정 방식으로 구한 유량값과 PIV 측정 기법으로 구한 유량값을 비교하였다. 표에서 알 수 있듯이 기존의 점측정에 의한 유량산출방식 중에서 2-D 방식이 오차값이 가장 작게 나온 것을 알 수 있다. 왜냐하면 평균속도의 값을 여러 단면의 여러 점의 측정값을 평균하여 구함으로써 전체유동장의 정보를 그 중에서도 가장 많이 고려했기 때문이다. 또한 중심평면의 한 점의 속도를 평균속도를 가정한 0.4 방식의 경우 오차값이 가장 크게 나타났다. 결과적으로 비만관내의 유량 측정은 점 측정 방식이 아닌 3차원 속도 분포를 기반으로 하여야 정확한 유량산출이 가능하다는 것을 확인하였다.



(a) $h/d = 0.25$



(b) $h/d = 0.5$



(c) $h/d = 0.75$

Fig. 5 Normalized velocity profiles accord to the lateral positions

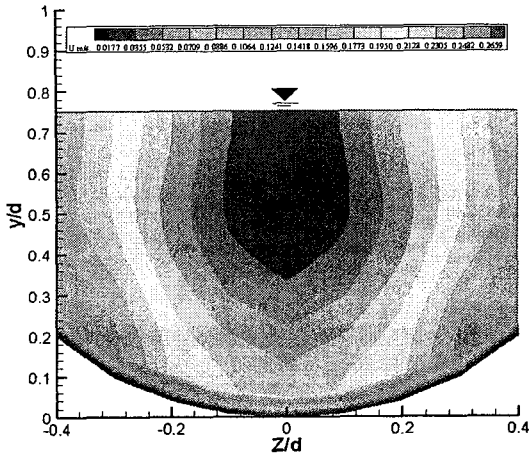


Fig. 6 Three-dimensional velocity profiles according to the variation of the water level

Table 1 Comparison with the point measurement

method \ depth	0.9 × Umax	0.2, 0.4, 0.8 × Depth	0.4	2d
h/d = 0.25	14.85%	12.79%	18.36%	7.25%
h/d = 0.5	15.59%	13.07%	20.67%	7.62%
h/d = 0.75	12.29%	13.96%	20.6%	8.80%
h/d = 1	18.96%	10.4%	17.25%	10.1%

5. 결 론

본 연구에서 PIV 측정 기법을 이용하여 비만관 내의 3차원 속도분포를 측정하였고, 수위 및 수평방향 단면 위치별로 유속분포 특성을 고찰하였다. 그 결과 벽마찰력의 영향 정도의 차이로 인해 수평 방향 위치 변화에 따른 속도분포의 상사성이 존재하지 않음을 밝혔다. 특히 수위가 50% 이상이 되면 최대속도의 위치가 자유표면이 아니라 중심쪽으로 이동됨을 확인하였다.

이러한 3차원 속도분포 측정으로부터 유량값을 산출할 수 있었으며, PIV 측정된 유량과 Manning 방정식에 근거한 기존의 점측정에 의한 유량산출 방식을 비교한 결과 기존 방식이 유속분포에 대한 정보의 부족으로 많은 오차를 내포하고 있음을 밝혔다. 따라서 비만관 내 유량 측정은 3차원 속도분포에 대한 엄밀한 측정을 기반으로 계산되어야함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Manning, R., 1891, "On the Flow of Water in Open Channels and Pipes," Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland.
- (2) Stevens, P. L and Schutzbach, J. S., 1998, "New Diagnostic Tools Improve the Accuracy of the Manning Equation," Proceedings of the 71st Annual Water Environment Federation Technological Exposition and Conference.
- (3) Enfinger, K. L. and Schutzbach, J. S., 2005. "Scattergraph Principles and Practice Camp's Varying Roughness Coefficient Applied to Regressive Methods," Proceedings of the Pipeline Division Specialty Conference. pp. 72-83.
- (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) Lanfear, K. J. and Coll, J. J., 1978, "Modifying Manning's Equation for Flow Rate Estimates," Water and sewage Works. pp. 68-69.
- (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., 1998, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation," Proc. VSJ - SPIE98, AB149, pp. 1-10.