

PTV의 수리학 분야에의 적용

윤병만¹⁾, 유권규²⁾, 최태훈²⁾

1. 서론

실험실에서 유속을 측정하기 위해 종래에는 pitot tube, 전자유속계, hot film 등을 사용하였으나 이들은 측정기기를 흐름 중에 투입하여야 하므로 필연적으로 흐름을 교란시킨다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 1960년대에 LDV(laser Doppler velocimetry)가 개발되어 흐름을 교란시키지 않고 유속을 측정할 수 있게 되었다 (Cummins et al. , 1964 ; Goldstein and Kreid, 1967). 그러나 LDV를 포함한 이 모든 유속측정장치들은 한 점에서의 유속을 측정하는 방법으로 유속장을 동시에 측정할 필요가 있을 경우에는 이들 기기의 사용에 한계가 있다.

반면 1990년대에 들어서 유체역학분야에서 활발히 응용되기 시작한 PIV (particle image velocimetry)는 전체유속장을 동시에 측정할 수 있다는 장점을 지니고 있다(Raffel et al. , 1998). PIV는 카메라에 찍힌 영상을 분석하는 방법에 따라 PTV (particle tracking velocimetry), 표준 PIV, 그리고 LSV (laser spekle velocimetry)로 분류하기도 한다. 추적입자(tracer particle)의 밀도가 작아 개개입자의 영상이 서로 겹치지 않을 경우에는 개개입자를 추적하여 분석하는 PTV가 사용되고, 중간 정도의 입자밀도일 경우에는 표준 PIV, 그리고 고밀도인 경우에는 LSV가 사용된다.

본 연구에서는 최근 들어 외국에서 수리학분야에 적용하기 시작한 PTV를 간략히 소개하고, 개수로 유속분포와 침강속도 측정에 PTV를 적용하여 봄으로써 PTV의 수리학분야에의 적용성을 살펴 보았다.

2. PTV의 개요

PIV는 크게 영상취득과정과 영상분석과정으로 나눌 수 있다. 먼저 PIV 영상취득과정의 개론적인 원리를 살펴보면 그림 1과 같다. 유체 중에 비중이 1.0 에 가까운 추적 입자(tracer particle, 대개는 지름이 수십 μm 정도인 유리 구슬을 이용한다)를 투입한 후 레이저 광선을 흐름 중에 비추면 입자가 레이저 광선을 반사한다. 이 반사된 빛을 비디오나 일반 카메라를 이용하여 촬영하여 두 영상 사이의 움직인 거리를 두 영상이 찍힌 사이의 시간으로 나누면 유속을 구할 수 있다. 이때 레이저 광선은 하나의 선이므로 이것을 실린더 렌즈를 이용하여 평면광으로 바꾸어 주어야 한다. 또한 영상이 찍히는 시간을 조절하는 방법으로 기계적 또는 전기적인 셔터를 이용하여 레이저 광의 노출시간을 조절하게 된다. 본 연구에서 영상을 얻기 위해 광원으로 argon-ion 레이저 (강도 2W ; 주파장 514nm, 488nm), 카메라는 640×480 픽셀의 초당 30프레임을 찍는 CCD 카메라, recorder는 Sony EVO-9650을 사용했으며 레이저 광선의 노출시간 및 노출간격은 AOM (acoustic-optical modulator)을 이용해 조절하였고, 비디오 카메라와 AOM의 동조를 위한 동조장치(synchronizer)를 사용하였다.

¹⁾ 명지대학교 SOC공학부 부교수

²⁾ The Univ. of Iowa 토목환경공학과 박사과정

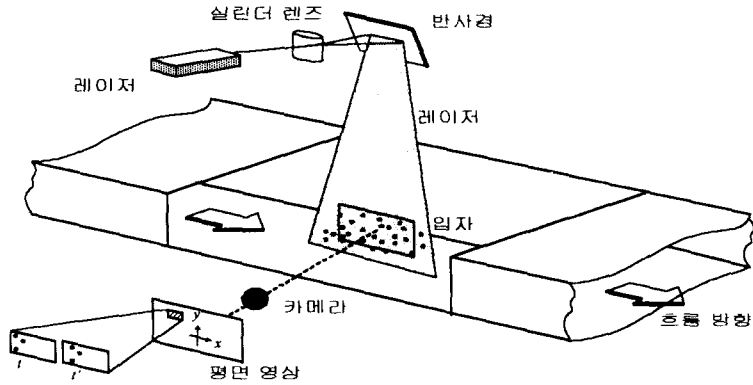


그림 1. PIV의 실험 장치 개요(Raffel et al, 1998)

비디오 테이프의 각 프레임은 주사선의 번호에 따라 홀수 필드(odd field)와 짝수 필드(even field)로 나누어진다. 레이저 광선은 AOM의 작용에 의해 그림 2와 같이 n 번째 프레임의 짝수 필드와 $n+1$ 번째 프레임의 홀수 필드에서 각 한 번씩 비추게 된다. 따라서 얻어진 두 개의 영상을 이용하면 각 추적 입자의 유속을 구할 수 있다. 본 연구에서 사용된 카메라는 초당 30프레임을 찍게 되므로 유속장은 1/15초마다 하나씩 구할 수 있게 된다.

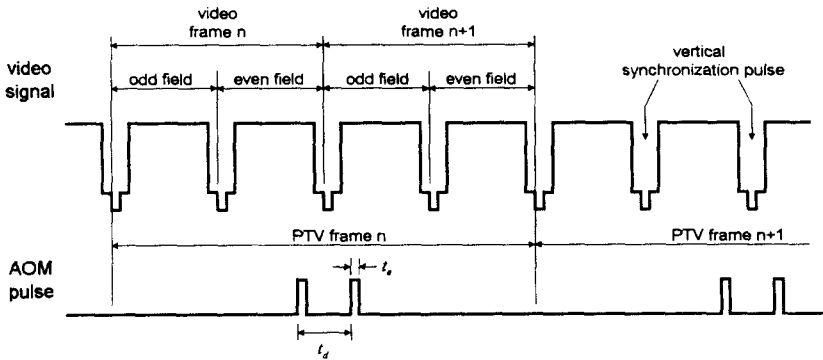


그림 2. PTV의 비디오와 레이저의 동조 과정(Muste 등, 1998)

본 연구에서 영상분석은 단일노출 다중영상 (single-exposed multiple image) PTV방법을 이용하였으며 그 과정은 그림3과 같다.

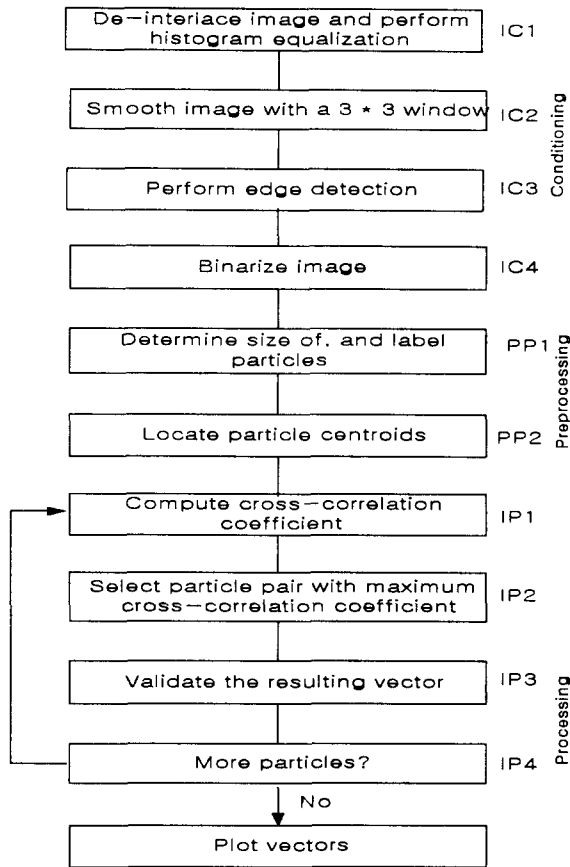


그림 3 영상분석과정 모식도

3. 개수로의 유속 분포 측정

실험은 길이 27m, 폭 0.91m, 깊이 0.6m인 IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research)의 대형 실험 수로에서 실행하였다. 수로 유입부와 유출부의 영향을 배제하기 위하여 실제 측정은 하류쪽으로 1/3 길이 정도인 단면에서 실행하였다. 실험 조건은 유량 $Q = 0.053 \text{ m}^3/\text{s}$, 수심 $d = 0.105 \text{ m}$, 평균 유속 $U = 0.556 \text{ m/s}$, 수로 경사 $S_0 = 0.00075$, 마찰 속도 $u_\tau = 0.025 \text{ m/s}$ 이다. 여기서 마찰 속도는 동수 반경과 수로 경사를 이용한 수로 전체의 평균적인 값 ($u_\tau = \sqrt{gRS_0}$)이다

위의 장치를 이용하여 매 실험 세트에 대하여 2분간의 영상을 기록하고 분석하였다. 2분간의 영상은 아날로그 영상이므로 이를 PC에서 처리할 수 있는 디지털 영상으로 변환하여야 한다. 그림 4와 그림 5는 이렇게 얻어진 영상 자료의 예이다. 본 그림에서는 구별하기 힘들다, 실제 그림 4는 짝수 필드에, 그림 5는 홀수 필드만 영상 자료를 지니고 있다. 그림 6은 그림 4와 그림 5의 자료를 이용하여 분석한 순간 유속 분포의 예이다. 측정시 생기는 오차 때문에 그림 5는 물리적인 의미가 약한 유속을 일부 포함하고 있다. 따라서 실제 분석시는 적절한 필터를 이용하여 물리적 의미가 없는 측정 자료를 삭제하여야 한다. 이들 중 물리적 의미가 약하거나 없는 자료를 제거하고 다시 그린 결과는 그림 7과 같다. 필터링 조건은 그림 4와 그림 5에서 구한 추적 입자 이미지의 크기가 너무 차이가 나거나, 유속이 계산된 평균 유속보다 과다하게 큰 경우 또는, 상관계수값이 너무 작은 경우 등이다.

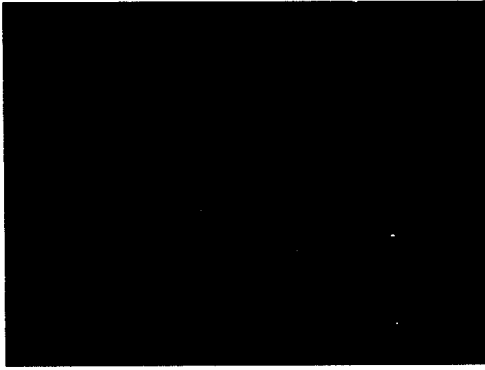


그림 4 영상 1 (작수 필드)

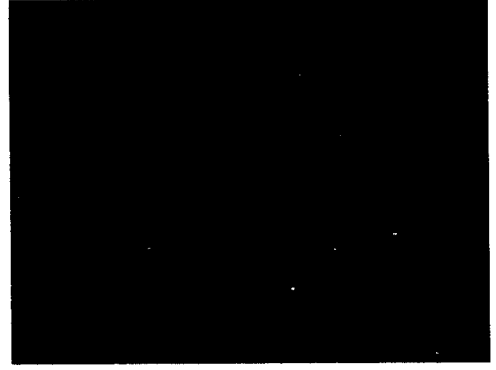


그림 5 영상 2 (홀수 필드)

이러한 순간 유속 분포 자료를 30초간 시간 평균한 결과는 그림 8과 같다. 실제 적용시 30초간의 자료는 약간 부족한 면이 있으나, PTV의 적용성 검토를 위해서는 충분한 시간인 것으로 판단된다. 그림 8에 나타난 각 단면별 평균 유속은 0.580 ~ 0.590 m/s 정도로, 유량과 단면 자료에서 구한 평균 유속 0.556 m/s보다 다소 큰값을 보이고 있다. 이는 그림 8에 나타난 유속이 전체 단면에 대한 것이 아니라 연직방향으로는 하상 근처와 표면 근처를 제외한 것이며, 수로의 중앙에서 측정된 것임을 고려한다면 본 유속 측정값은 매우 적절한 것이라 판단된다.

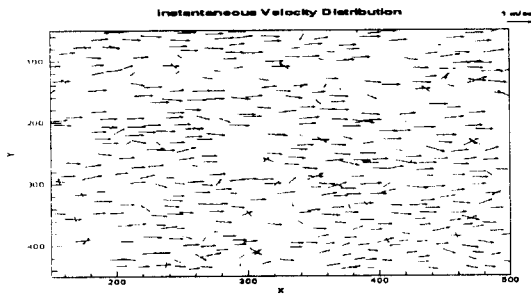


그림 6 순간 유속 분포(필터링 전)

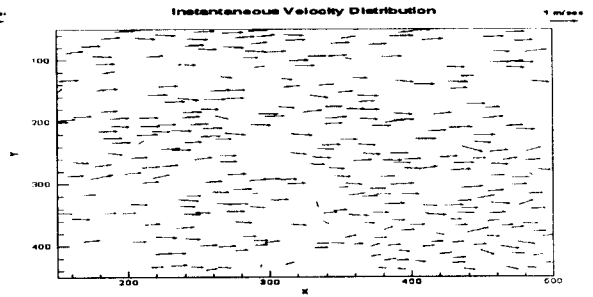


그림 7 순간 유속 분포(필터링 후)

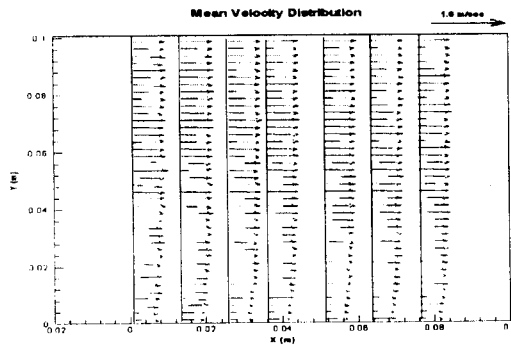


그림 8 평균 유속 분포

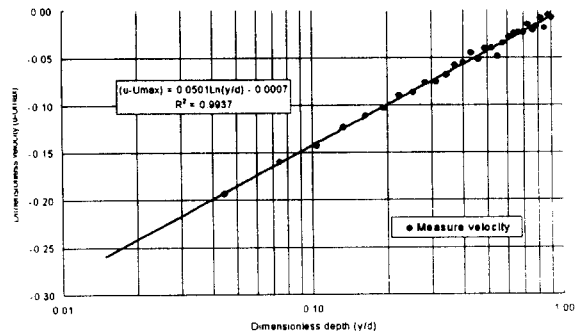


그림 9 단면중앙의 무차원 유속분포

측정된 평균 유속 분포를 이용하여 그림 8의 네 번째 단면의 마찰 속도를 산정하였다. 마찰 속도는 velocity defect law를 이용하였다. 그림 9은 단면 중앙에서 측정된 유속과 수심과의 관계이다. 이

관계에서 구한 마찰 속도는 $u_r = 0.0226$ m/s로 수로 경사를 이용해서 구한 수로평균값 $u_r = 0.0250$ m/s 보다 약간 작은 값이다. 이러한 차가 생긴 것은 수로 경사를 이용해서 구한 값은 수로 전체의 평균적인 값이나 PTV 측정에서 구한 것은 수로중앙의 국부적인 값이기 때문으로 판단된다.

4. 침강속도 측정

실험은 유속측정실험에 사용된 수로와 같은 수로에서 흐름이 없는 상태에서 수행되었으며 실험에 이용된 유사는 표 1에 나타난 바와 같이 기하 평균 입경이 0.162 mm, 0.229 mm, 0.418 mm 인 세 종류의 유사를 이용하였다. 그림 10와 11은 인접한 두 프레임(t_0 시간간격)의 영상을 나타낸 것이며(이 영상들은 실제 영상의 일부분만을 보인 것이다), 이를 이용해 구한 순간 속도장은 그림 12와 같다. 그림 12에서 일부 물리적인 의미가 약한 벡터 성분들은 점선으로 표시되었으며, 적절한 필터링을 통하여 이들을 제거하면 유사 입자의 침강 속도를 산정할 수 있다.

표 1. PTV와 기존방법으로 구한 침강속도의 비교

실험	유사 입경 (mm)	기하 평균 입경(mm)	기존 문헌에 의한 침강 속도(m/sec)	본 연구의 측정 결과	
				평균(m/sec)	표준편차
Run1	0.149 ~ 0.177	0.162	0.017	0.0172	0.00287
Run2	0.21 ~ 0.25	0.229	0.028	0.0296	0.00425
Run3	0.35 ~ 0.5	0.418	0.058	0.0399	0.00682

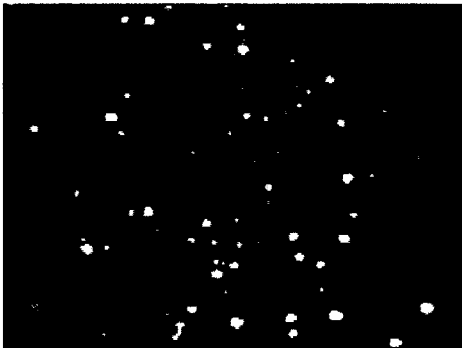


그림 10. 시각 t 의 영상

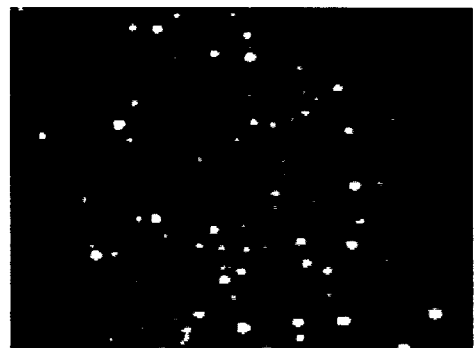


그림 11. 시각 t_d 후의 영상

위의 방법에 의해 세 종류의 유사 입자에 대해 침강 속도를 측정하였다. 측정 유사 입자의 수는 5,000~10,000 개 정도이며, 이들을 통계 분석하였다. 측정된 침강 속도를 기존의 문헌(Vanoni, 1975)에 제시된 유사의 침강 속도와 비교하여 표1에 정리하여 놓았다. 위의 표 1에서 알 수 있듯이 Run 1과 Run 2는 기존 문헌의 결과와 매우 일치하는 결과를 보여 준다. 다만 Run 3는 상당한

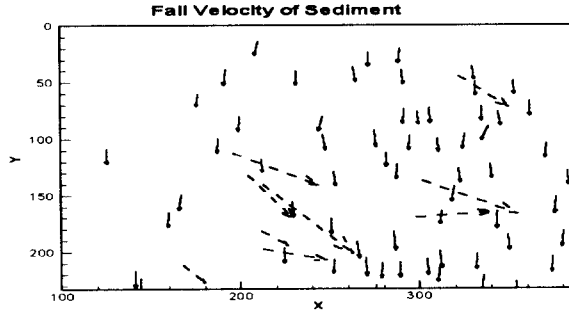


그림 12. 예의 영상에서 구한 침강 속도

차이를 보이고 있다. 이것은 이 경우의 유사 입경 분포가 너무 광범위하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 보다 정밀한 측정을 위해서는 입경 범위를 보다 좁게 제한할 필요가 있는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 PIV의 한 종류인 PTV에 대해 알아보고 이를 이용해 개수로의 유속분포와 침강속도를 측정하여 PTV의 수리학 분야에의 적용성을 살펴보았다. 유속분포 측정에 적용한 결과 PTV를 이용하여 개수로의 흐름특성을 정확히 측정할 수 있음을 알 수 있었으며 개개 입자를 추적할 수 있는 PTV의 특성을 이용하면 개수로 저면에서 발생하는 busting 현상 및 coherent structure와 이에 따른 유사이동 등의 연구에 응용할 수 있다고 판단된다. 또한 PTV를 이용하여 침강속도를 측정한 결과 그 값이 기존의 식으로 구한 값들과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 PTV를 이용하면 현재 많은 논란이 되고 있는 난류흐름 중의 침강속도에 대한 정확한 규명이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- Cummins, H. Z., Knable, N. and Yeh, Y.(1964) "Observation of diffusion broadening of Rayleigh scattered light, " *Phys. Rev. Lett.*, vol. 12, pp 150 - 153
- Goldstein, R. J. and Kreid, D.K,(1967) "Measurement of a laminar flow development in a square duct using a laser Doppler flowmeter, " *J. Appl. Mech.* vol. 34, pp 813 - 817
- Raffel, M, Willert, C. E. and Kompenhans, J.(1998) *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer-Verlag,
- Muste, M., Fujita, I. and Kruger, A. (1998). "Experimental comparison of two laser-based velocimeters for flows with alluvial sand," *Experiments in Fluids*, Vol. 24, pp. 273-284.
- Vanoni, V. A., ed., *Sedimentation Engineering*, ASCE Manual, 1975.