

영상해석기법을 이용한 침강속도 측정 Fall-Velocity Measurement Using Image Analysis Technique

윤 병 만* / 유 권 규** / 노 영 신***

Yoon, Byung Man / Yu, Kwon Kyu / Roh, Young Sin

Abstract

Particle tracking velocimetry (PTV) is introduced and applied to the fall-velocity measurement. The fall velocities of sediment particles were measured using PTV in the still water and compared with the values presented in the existing literature. Comparison shows that PTV measures the fall velocities accurately. This result enables the measurement of fall velocity in the turbulent flows, which was not possible with conventional methods.

keywords : particle tracking velocimetry, fall-velocity measurement, turbulent flow, sediment particles

요 지

PTV는 비디오카메라로 기록된 영상의 분석을 통하여 흐름속도를 측정한다. 이러한 PTV 방법을 이용하여 유사 입자의 침강속도를 측정하였다. 실험을 통해 측정된 정지 유체내 유사 입자의 침강속도를 기존문헌에 제시된 값과 비교 분석한 결과, 침강속도 측정에 PTV를 이용할 수 있음이 입증되었다. 따라서 PTV를 이용하면 난류흐름 중의 침강속도 측정이 가능해져 난류흐름 중의 침강속도 특성규명에 기여할 수 있을 것이다.

핵심용어 : PTV, 침강속도 측정, 난류흐름, 유사입자

* 명지대학교 SOC공학부 부교수
Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University
(E-mail : bmyoon@wh.myongji.ac.kr)

** The Univ. of Iowa 토목환경공학과 박사과정
Dept. of Civil & Environmental Eng., University of Iowa
(E-mail : kwonkyu-yu@uiowa.edu)

*** 명지대학교 SOC공학부 박사과정
Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University
(E-mail : rohys@wh.myongji.ac.kr)

1. 서론

침강속도는 유사의 침식과 퇴적, 그리고 이동되는 양을 추정하는데 필요한 주요 인자 중의 하나이다. 일반적으로 정지유체내의 입자의 침강속도는 실린더 내에 입자를 투입하여 일정시간동안 입자가 침강한 거리를 관측하여 측정하고, 이러한 정지유체내의 침강속도는 입자의 종류와 크기, 형태 그리고 입자농도 등의 영향을 받는다(Vanoni, 1975). 정지유체와는 달리 난류흐름 중의 입자의 침강속도는 입자와 유체간의 상대속도에 따른 영향을 받게 되지만(Field, 1968; Houghton, 1968), 이러한 난류흐름 중의 입자의 침강속도를 정확히 측정하기 위한 적절한 방법은 아직 제시되어 있지 않다.

흐름이 있는 경우에 침강속도를 측정하기 위해서는, 관측기구에 의한 흐름의 교란을 발생하지 않고, 입자의 침강에 영향을 미치지 않고도 입자추적이 가능한 PTV(Particle Tracking Velocimetry)가 가장 적절한 방법 중의 하나라 할 수 있다. PTV와 같은 디지털 영상처리기법은 컴퓨터와 관련 영상매체기술의 비약적인 발전으로 그동안 이론적 원리에 대한 연구가 진행되어오다가 최근 들어 이를 실제 문제에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 영상매체기술의 응용은 기존 방식의 단점들을 보완하여 좀더 신뢰성 있는 자료를 제공할 뿐만 아니라 실험적 접근이 어려웠던 일부 공학적 문제를 해결하는데 크게 기여할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 디지털 영상처리기법을 이용한 PTV를 난류중의 침강속도를 측정하는데 사용하기 위해 우선 정지유체에서 PTV를 이용해 침강속도를 측정하여 이를 검증하여 보고자 한다.

2. PTV의 개요

2.1 PTV의 기본 원리

최근 흐름중에 추적입자를 투여한 후 적당한 조명을 가한 뒤에, 유동장을 촬영하여 유체흐름에 대한 특성을 파악하는 가시화(visualization)기법이 많이 이용되고 있다. 이러한 영상자료에는 유체의 유동현상을 규명하는데 유용한 정량적인 정보를 포함하고 있다. 따라서, 이러한 영상자료를 적절히 처리하여 신뢰성있는 정보를 추출할 수 있다면 유체흐름에 대한 다양한 공학적인 문제를 해결하는데 많은 기여를 할 수 있을 것이다.

현재 이러한 영상기법을 이용하여 유체의 기본 물리량을 측정하기 위한 PIV(Particle Image Velocimetry)에 대한 연구와 응용이 활발히 진행되고 있다.

PIV는 속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 임의의 검사영역(interrogation area)내의 입자군인가의 여부에 따라 PTV와 PIV로 구분할 수 있다. PTV는 영상을 이용한다는 면에서 넓은 의미의 PIV에 포함되기도 하지만 좁은 의미로는 개개의 입자를 추적한다는 의미에서 입자군의 움직임을 추적하는 PIV와 구별하기도 한다(Raffel 등, 1998).

본 연구에 이용된 PTV는 개별입자를 독립적으로 인식하고 이에 대한 미소계적을 추적함으로써 속도벡터를 구하게 된다. PTV를 이용하여 유동장의 국소속도를 구하기 위한 기본원리는 다음 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소시간간격 Δt 동안 이동한 직선거리 및 방향을 알면 유동장의 국소속도를 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \quad v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

2.2 영상의 획득

다음으로 PTV를 이용하여 유동장에 대한 영상을 획득하기 위한 개론적인 원리를 살펴 보면 그림 2와 같다. 유체 중에 비중이 1.0에 가까운 추적 입자(tracer particle, 대개는 지름이 수십 μm 정도인 유리 구슬을 이용한다)를 투입한 후 레이저 광선을 흐름 중

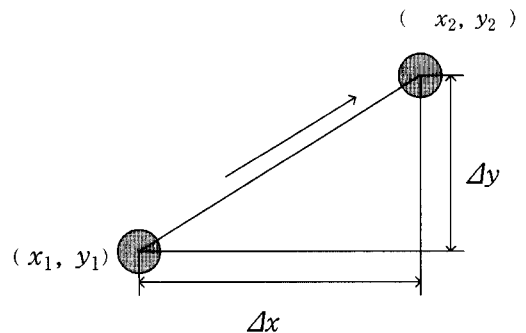


그림 1. PTV의 기본 원리도

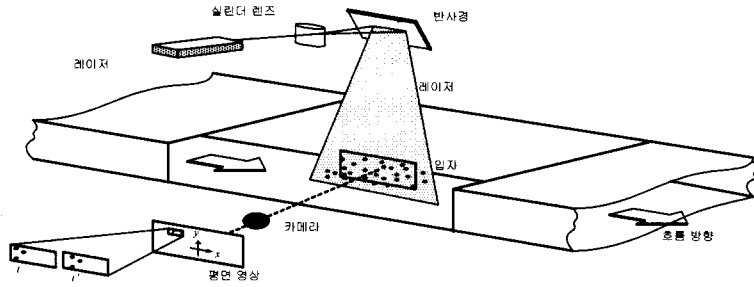


그림 2. PTV의 실험 장치 개요(Raffel 등, 1998)

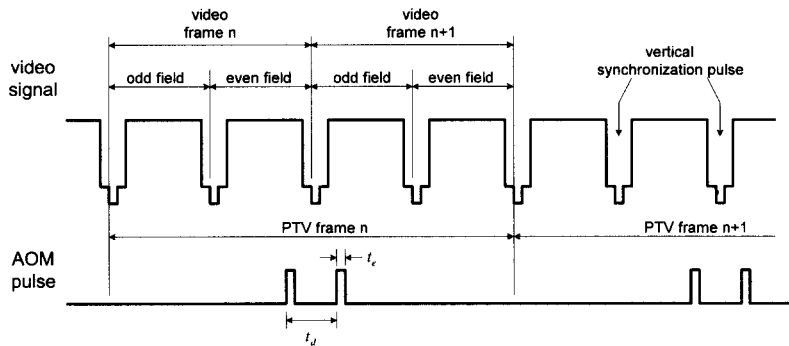


그림 3. PTV의 비디오와 레이저의 동조 과정(Muste 등, 1998)

에 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 평면광(laser sheet)으로 바꾸어 주어야 한다. 또한 영상이 찍히는 시간을 조절하는 방법으로 기계적 또는 전기적인 셔터를 이용하여 레이저 광의 노출시간을 조절한다.

비디오 영상의 각 프레임은 주사선의 번호에 따라 각각 홀수 필드(odd field)와 짝수 필드(even field)로 나누어 진다. 레이저 광선은 그림 3과 같이 n 번째 프레임의 짝수 필드와 n+1 번째 프레임의 홀수 필드에서 각 한 번씩 비추게 된다. 따라서 얻어진 두 개의 영상을 이용하면 각 유사 입자의 침강속도를 구할 수 있다.

본 기기를 이용한 측정의 정밀도는 다음과 같이 구

한다. 영상 중의 한 화소(pixel)가 실제 물리적으로 나타내는 거리를 x 라 하고, 그림 3의 두 레이저광의 노출 간격을 t_d 라고 하면 PTV로 측정할 수 있는 최소 속도는 식 (2)와 같다.

$$u_{\min} = \frac{4x}{t_d} \quad (2)$$

예를 들어 본 연구에서는 한 화소의 크기는 0.008 cm 이고, $t_d = 0.01$ 초이므로 최소 측정 가능한 속도는 0.8 cm/sec이다. 따라서 본 연구의 대상인 모래 크기의 유사의 경우 PTV를 이용하여 침강 속도를 적절히 측정할 수 있다.

2.3 영상처리

촬영된 영상은 frame-grab를 통해 640×480 화소 또는 512×512 화소의 크기로 디지털화된다. 디지털화

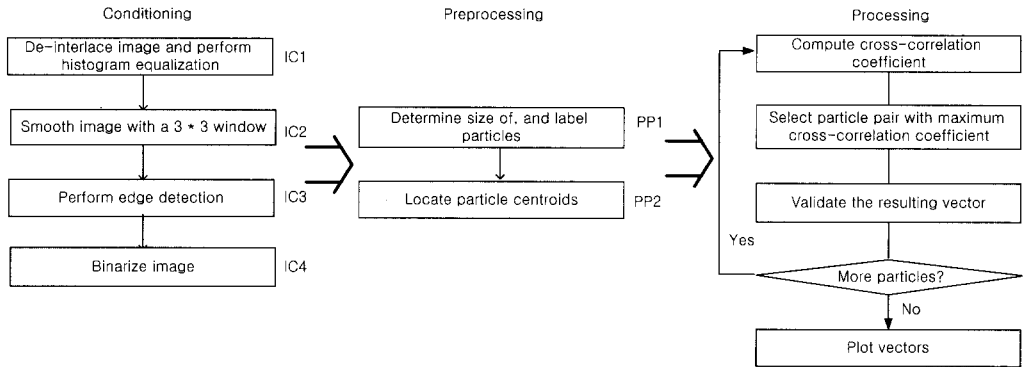


그림 4. 영상처리과정

된 영상은 그림 4에 도시한 바와 같이 영상의 질을 개선하거나 영상을 특정한 목적에 알맞도록 변환시키는 영상처리 과정을 거쳐야 한다.

3. 실험

본 실험에 이용된 레이저는 Argon-ion 레이저로 이용하는 주요 파장은 514 nm와 488 nm이고 강도는 최대 2 W이다. 추적 입자의 거동을 녹화하기 위한 카메라는 Minton 사의 CCD 카메라(그림 5)이며 녹화

기는 SONY 사의 EVO-9650 (그림 6의 우측 장비)이다.

비디오 프레임과 레이저 노출 시간을 동조시키는 장치로 synchronizer(그림 6의 좌측 장치)와 AOM(Acoustic Optical Modulator)이 이용되었다. AOM은 초음파를 이용하여 레이저 광선을 주기적으로 굴절시키는 장치이다.

실험에 이용된 유사는 표 1에 나타난 바와 같이 기하 평균 입경이 0.162 mm, 0.229 mm, 0.418 mm인



그림 5. CCD 카메라와 반사경

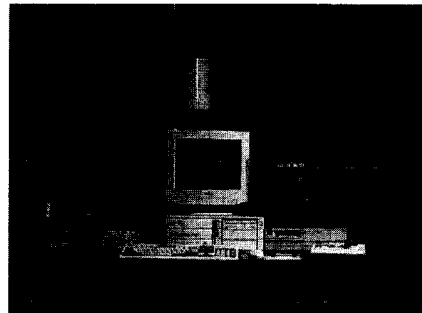


그림 6. 동조 장치와 PC, 비디오

표 1. 기존 문헌에 나타난 침강속도와와의 비교

실험	유사 입경 (mm)	기하 평균 입경(mm)	기존 문헌에 의한 침강 속도(m/s)	본 연구의 측정 결과	
				평균(m/s)	표준편차
Run 1	0.149 ~ 0.177	0.162	0.017	0.0172	0.00287
Run 2	0.21 ~ 0.25	0.229	0.028	0.0296	0.00425
Run 3	0.35 ~ 0.5	0.418	0.058	0.0399	0.00682

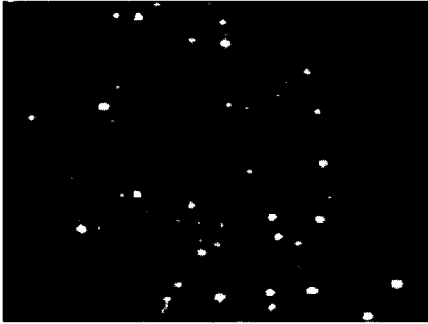


그림 7. 시각 t 의 영상



그림 8. 시각 t_d 후의 영상

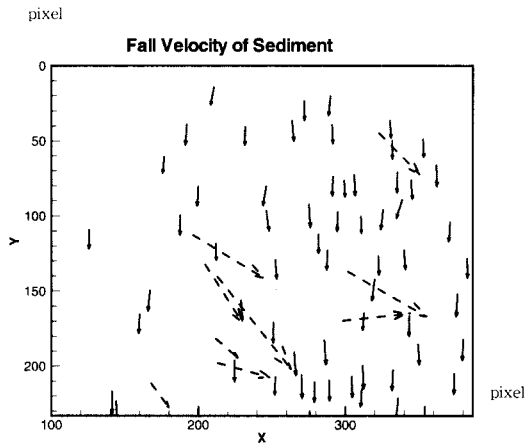


그림 9. 예의 영상에서 구한 속도 vector(1pixel = 0.00008m)

세 종류의 유사(비중 : 2.71)를 이용하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 영상의 분석 및 침강속도의 산출

그림 7과 8은 각각 시각 t 와 그 이후 t_d 시간 후에 촬영된 영상을 나타내고 있다. 여기서 밝게 빛나는 점들이 침강되고 있는 유사를 나타낸다. 그림 7과 8을 이용하여 구한 속도장은 그림 9와 같다. 그림 9에서 일부 물리적인 의미가 약한 벡터 성분들은 점선으로 표시되었으며, 적절한 필터링을 통하여 이들을 제거하면 유사입자의 침강속도를 산정할 수 있다.

4.2 침강속도의 측정

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 식 (1)과 같은 유사의 침강 속도식을 이용하여 구한 값과 함께 표 1에 정리하여 놓았다.

$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_D} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \quad (1)$$

여기서 C_D 는 항력계수, d 는 입자의 평균입경, γ_s 는 입자의 단위중량을 나타낸다.

표 1에서 알 수 있듯이 Run 1과 Run 2는 기존 문헌의 결과와 매우 일치하는 결과를 보여 준다. 다만 Run 3는 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 유사의 입경 분포가 너무 광범위하여 작은 입자의 갯수가 상대적으로 많아 실제 대표입경의 침강속도보다 작은 값을

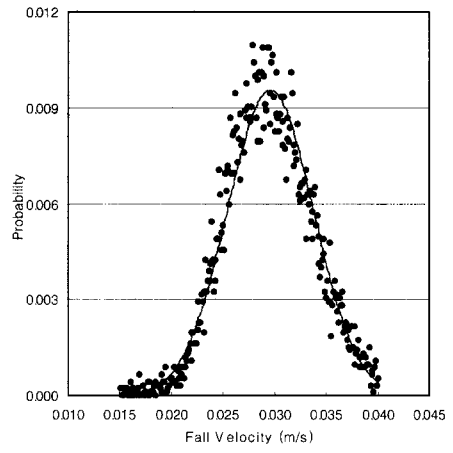
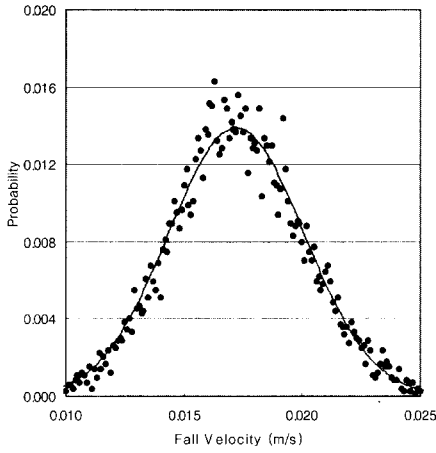


그림 10. 측정된 침강속도와 정규분포(Run 1) 그림 11. 측정된 침강 속도와 정규분포(Run 2)

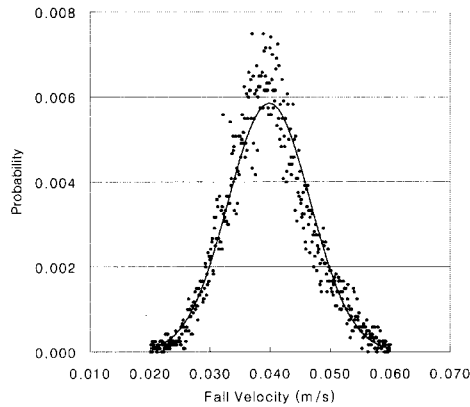


그림 12. 측정된 침강 속도와 정규 분포(Run 3)

보인 것으로 판단된다. 따라서 보다 정밀한 측정을 위해서는 실험에 사용할 입자의 입경 범위를 보다 좁게 제한할 필요가 있는 것으로 보인다.

측정된 침강 속도의 분포를 정규 분포와 비교하면 각각 그림 10, 그림 11, 그림 12와 같다. 표준편차는 표 1에 제시된 바와 같이 각각 0.00287, 0.00425, 0.00628이다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 최근 각광을 받고 있는 영상매체기술의 하나인 PTV를 이용하여 난류 중의 침강속도를 측정하기 위한 첫 단계로 정지 유체내에서의 침강속도 측정을 통해 그 적용성을 검증해 보았다. 본 연구의

결론은 다음과 같다.

- (1) PTV를 이용하여 유사의 침강 속도를 측정할 수 있음을 확인하였다.
- (2) PTV를 이용하여 측정된 유사의 입경 분포는 기존 문헌에서 제시된 자료와 비교할 때 비교적 만족스러운 결과를 보였다. 단, 유사의 입경 범위를 좀더 세분하면 보다 정밀한 측정을 할 수 있을 것이라 판단된다.
- (3) 본 연구를 통해 PTV를 이용한 난류 흐름중에서 침강속도의 측정이 가능함을 확인하였으며 이러한 연구가 이루어지면 난류로 인한 침강속도변화에 대해 명확한 이해가 이루어지리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1999년 명지대학교 교비지원에 의해 수행되었음

참고 문헌

- Field, W.G.(1968). "Effects of density ratio on sedimentary similitude." Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94 No. HY3, pp. 705~719.
- Houghton, G.(1968). "Particle retardation in vertically oscillating fluids." The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 46, No. 2, pp. 79~81.
- 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.
- Raffel, M, Millert, C., and Kompenhans, J.(1998). Particle image velocimetry, A practical guide, Springer-Verlag.
- Vanoni, V. A.(1975). Sedimentation engineering. ASCE Manual.

(논문번호:01-006/접수:2001.01.26/심사완료:2001.07.09)