

PTV를 이용한 침강 속도 측정 Falling-Velocity Measurement Using PTV

윤병만¹ · 유권규² · 노영신³
Byungman Yoon¹, Kwonkyu Yu², and Youngsin Roh³

1. 서 론

침강속도는 유사의 침식과 퇴적, 그리고 이동되는 양을 추정하는데 필요한 주요 요소중의 하나이다. 유사이동모형에서 종래에는 정지상태유체에서 측정된 침강속도를 사용하였으나, 최근 들어 난류가 존재한 경우 침강속도가 변할 것이므로 정지상태에서 구한 침강속도 사용에 대한 논란이 일어나기 시작하였다. 따라서 이의 명확한 규명을 위해 난류 흐름 중의 침강속도 측정이 필요하게 되었다. 흐름이 있는 경우에 침강속도를 측정하기 위해서는 적절한 측정장비의 선택이 매우 중요한데, 흐름을 교란시키지 않으며 입자추적이 가능한 PTV가 가장 적절한 방법 중의 하나라 할 수 있다.

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

2. PTV의 개요

먼저 PIV에 대한 개론적인 원리를 살펴 보면 Fig.1과 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 중에 비추면 입자가 레이저 광선을 반사한다.

하여 촬영하여 두 영상 사이의 움직인 거리를 두 영상이 찍힌 사이의 시간으로 나누면 유속을 구할 수 있다. 이 때 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 조절한다.

PIV는 투입된 입자의 밀도에 따라 차례로 PTV, PIV, LSV로 나누기도 한다. 본 연구에서 사용한 방법은 밀도가 적은 경우이므로 PTV에 해당된다.

본 연구에 이용한 비디오는 초당 30 프레임을 가진 NTSC 방식의 비디오이며, 각 프레임은 주사선의 번호에 따라 각각 홀수 필드(odd field)와 짝수 필드(even field)로 나누어진다. 레이저 광선은 AOM의 작용에 의해 Fig.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 유사 입자의 침강속도를 구할 수 있다.

본 기기를 이용한 측정의 정밀도는 다음과 같이 구한다. 영상 중의 한 픽셀이 실제 물리적으로 나타내는 거리는 x 라 하고, Fig.2의 두 레이저 광의 노출 간격을 t_d 라고 하면 PTV로 측정할 수 있는 최소 속도는 식(1)과 같다.

$$u_{\min} = \frac{\Delta x}{t_d} \quad (1)$$

¹ 명지대학교 SOC공학부 부교수(Dept. of SOC Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea)

² The Univ. of Iowa 토목환경공학과 박사과정(Dept. of Civil & environmental Engineering, The Univ. of Iowa, Iowa city USA)

³ 명지대학교 토목공학과 박사과정(Dept. of Civil & environmental Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea)

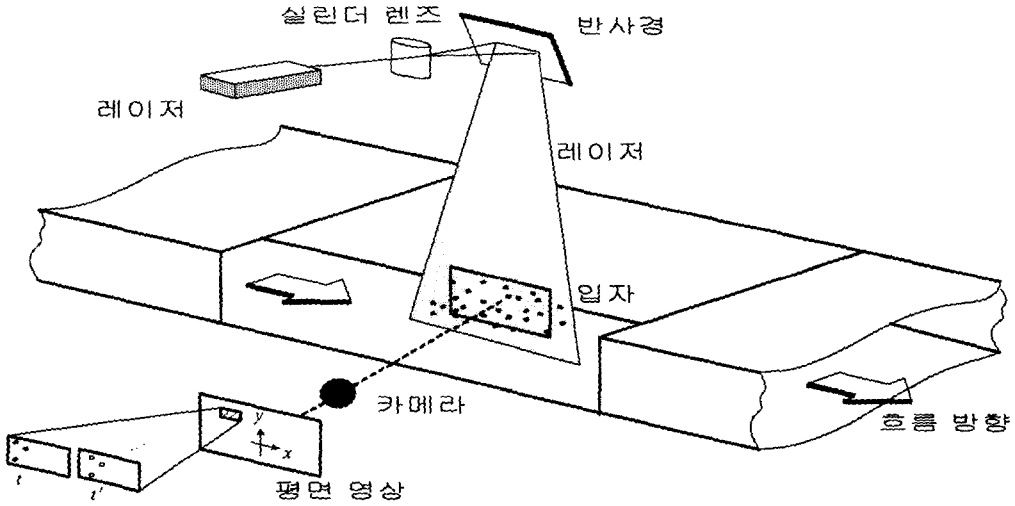


Fig.1 PIV의 실험 장치 개요(Raffel 등, 1998)

예를 들어 본 연구에서는 한 픽셀의 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.

3. 실험

본 실험은 Univ. of Iowa의 IIHR 수리실험실의 대형 수로에서 수행하였다. 실험에 이용된 수로

는 길이 30 m, 폭 91 cm이며, 흐름이 없는 상태에서 침강 속도를 측정하였다.

이용된 레이저는 Argon-ion 레이저이며 이용하는 주요 파장은 514 nm와 488 nm이다. 레이저의 강도는 최대 2 W이다. 추적 입자의 거동을 녹화하기 위한 카메라는 Minton 사의 CCD 카메라 (Fig.3)이며 녹화기는 SONY 사의 EVO-9650 (Fig.4의 우측 장비)이다.

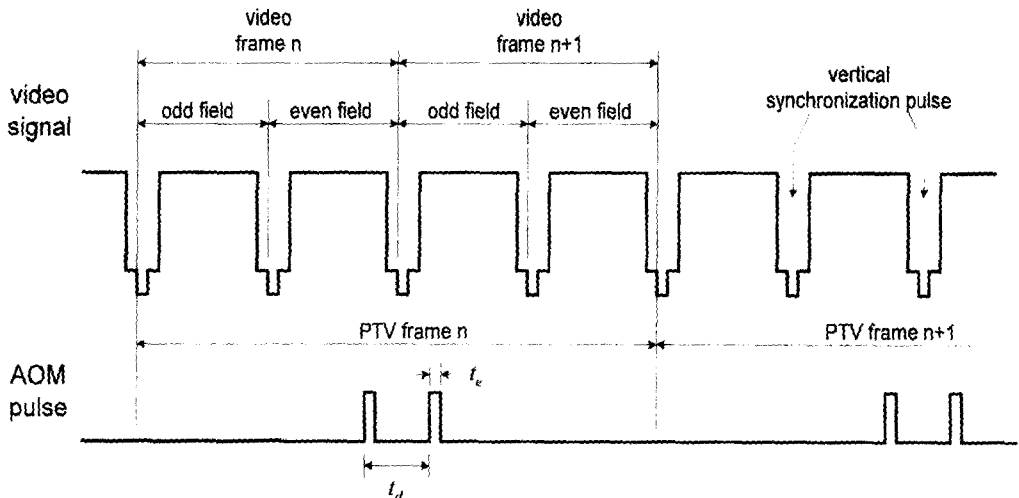


Fig. 2 PTV의 비디오와 레이저의 동조 과정(Muste 등, 1998)

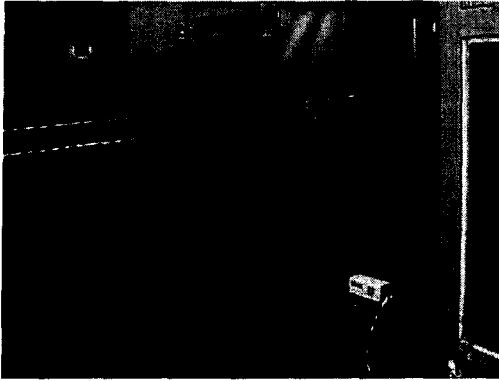


Fig. 3 CCD 카메라와 반사경

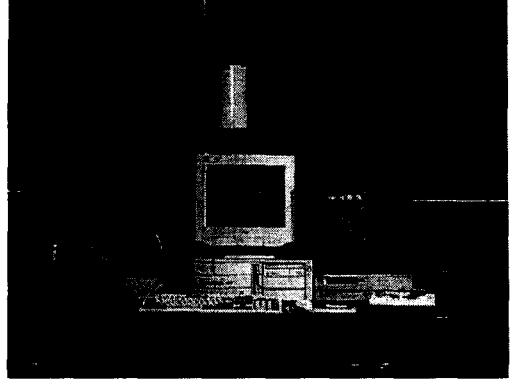


Fig. 4 동조 장치와 PC, 비디오

각 영상 사이의 촬영 간격과 레이저 광선의 노출을 동조화(synchronization)하기 위해 AOM (Acoustic Optical Modulator)를 이용하였다. 비디오 프레임과 레이저 노출 시간을 동조시키는 장치로 synchronizer(Fig.4의 좌측 장치)와 AOM이 이용되었다. AOM은 초음파를 이용하여 레이저 광선을 주기적으로 굴절시키는 장치이다. 이렇게 굴절시키는 것이 카메라의 셔터를 열어주는 동작과 같은 역할을 한다. AOM의 움직임은 PC로 조작된다.

실험에 이용된 유사는 Table 1에 나타난 바와 같이 기하 평균 입경이 0.162 mm, 0.229 mm, 0.418 mm인 세 종류의 유사를 이용하였다

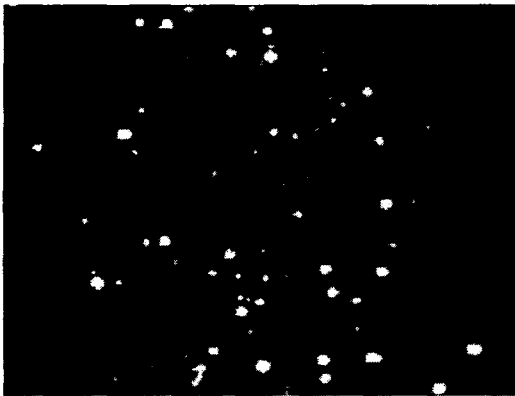


Fig. 5 시각 t 의 영상

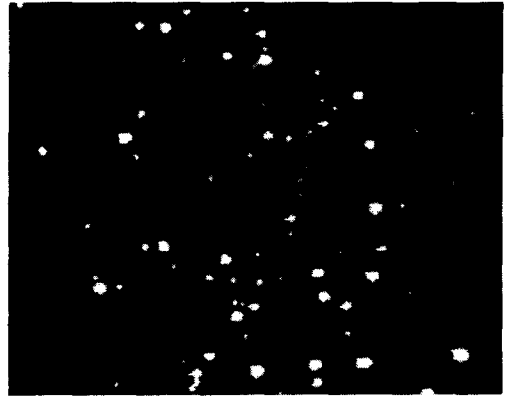


Fig. 6 시각 t_d 후의 영상

4. 결과 및 분석

4.1 영상의 분석 및 침강속도의 산출

위의 장치들을 이용하여 시간 t 일때의 유사의 분포와 t_d 시간 후의 유사의 위치를 촬영하면 각각 Fig.5와 6과 같다(이 영상들은 실제 영상의 일부만을 보인 것이다). Fig.5와 6을 이용하여 구한 속도장은 Fig.7과 같다. Fig.7에서 일부 물리적인 의미가 약한 벡터 성분들은 점선으로 표시되었으며, 적절한 필터링을 통하여 이들을 제거하면 유사입자의 침강속도를 산정할 수 있다.

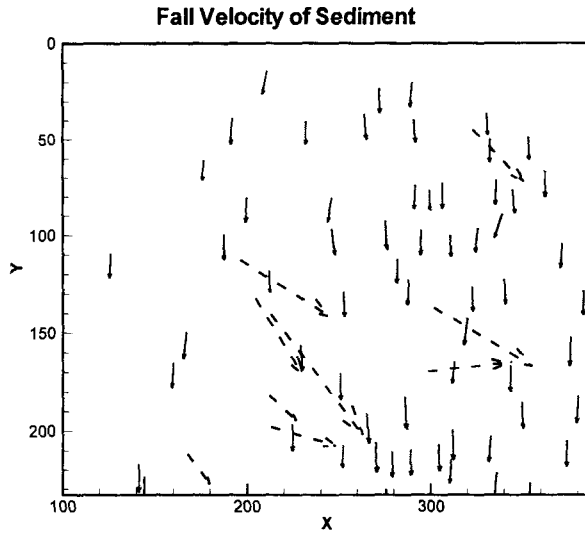


Fig. 7 예의 영상에서 구한 침강 속도

4.2 침강속도의 측정

위의 방법에 의해 세 종류의 유사 입자에 대해 침강속도를 측정하였다. 측정 유사 입자의 수는 5,000~10,000 개 정도이며, 이들을 통계 분석하였다. 측정된 침강 속도를 기존의 문헌에 제시된 유사의 침강 속도와 비교하였다. 유사의 침강 속도는 ASCE의 Sedimentation Engineering (Vanoni, 1975) 등 유사 관련 문헌에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 기존 문헌에 제시된 유사의 침강 속도와 본 연구에서 측정된 유사의 침강 속도는 Table 1과 같다.

Table 1에서 알 수 있듯이 Run 1과 Run 2는 기존 문헌의 결과와 매우 일치하는 결과를 보여 준다.

다만 Run 3는 상당한 차이를 보이고 있다. 이것은 이 경우의 유사의 입경 분포가 너무 광범위하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 보다 정밀한 측정을 위해서는 입경 범위를 보다 좁게 제한할 필요가 있는 것으로 보인다. 위의 세 경우의 측정된 침강 속도의 분포를 정규 분포와 비교하면 각각 Fig.8, Fig.9, Fig.10과 같다.

Table 1 기존 문헌에 나타난 침강속도와의 비교

실험	유사입경	기하평균입경 (mm)	기존 문헌에 의한 침강속도(m/s)	본 연구의 측정결과	
				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

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 PTV를 침강속도 측정에 이용하기 위해 그 첫 단계로 정지 유체내에서 유사의 침강 속도를 산정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) PTV를 이용하여 유사의 침강 속도를 측정할 수 있음을 확인하였다.
- (2) PTV를 이용하여 측정한 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 이루어 지리라 판단된다.

참고 문헌

- 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., ed., 1975, *Sedimentation Engineering*, ASCE Manual.

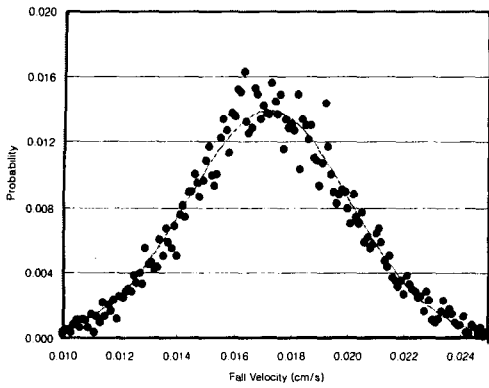


Fig.8 측정된 침강 속도와 정규 분포(Run 1)

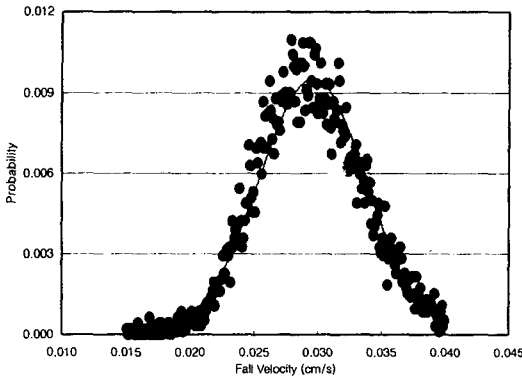


Fig.9 측정된 침강 속도와 정규 분포(Run 2)

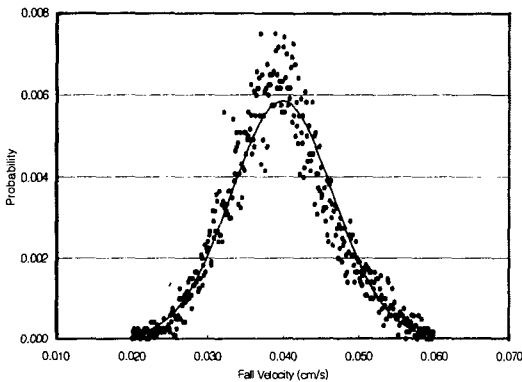


Fig.10 측정된 침강속도와 정규 분포(Run 3)

다만, 측정 결과가 정규분포와 얼마나 적합한가 등에 대한 구체적인 분석은 수행하지 않았다.