

## 난류 중 부유사의 속도 지체 측정

### Measurement of Velocity-Lag of Suspended-Sediment Particles in Turbulent Open-Channel Flows

류 권 규\* / 마리안 머스테\*\* / 로버트 에테마\*\*\* / 윤 병 만\*\*\*\*

Yu, Kwonkyu / Muste, Marian / Ettema, Robert / Yoon, Byungman

#### Abstract

To describe the behavior of suspended-sediment particles in turbulent open-channel flows, the advection-diffusion equation or its simplified form has been used. Though this equation was derived upon several assumptions, only a few studies tried to evaluate the limit of the assumptions. The reason is that it is very difficult to measure turbulence in open-channel flows and to discriminate the velocities of water and sediment particles. The present study aims to measure the velocity profiles of water and sediment particles in open-channel flows by using PTV (Particle Tracking Velocimetry), a kind of PIV (Particle Image Velocimetry). The measured results showed that sediment particles moved slower than water tracers did in the outer region. In the present study, the amount of velocity-lag reached about 5 % of the mean flow velocity and the position of the maximum velocity-lag was  $y/h \approx 0.05$  ( $y^+ = 30 \sim 50$ ). The main cause of the velocity-lag of sediment particles seems that the sediment particles have larger density than water has. On the other hand, in the viscous sublayer, sediment particle has a larger velocity than water tracers. The reason of the inversion of velocity-lag may be due to the no-slip condition of water at the solid boundaries.

**keywords** : PTV (Particle Tracking Velocimetry), sediment-laden flow, velocity-lag, velocity profile, turbulent flow

#### 요 지

부유사의 거동을 나타내는 데는 이송-확산 방정식이나 이 방정식을 간략화한 식들이 이용된다. 이 방정식은 여러 가지 가정하에서 유도되었으나, 이러한 가정에 대해서는 심도있는 검토가 되지 못한 상태에 있다. 그 이유는 난류의 측정 자체가 매우 힘들며, 유사가 혼합된 흐름의 경우 물과 유사의 속도를 구별해서 측정하기 매우 힘들기 때문이다. 본 연구는 입자 영상 유속계(PIV, Particle Image Velocimetry)의 일종인 입자 추적 유속계(PTV, Particle Tracking Velocimetry)를 이용하여 개수로 난류에서 물과 유사의 속도를 측정하는 실험적 연구이다. 측정 결과, 하상에서 어느 정도 떨어진 영역에서는 유사의 속도가 물보다 느린 경향을 보였다. 이 속도 지체의 양은 본 연구의 경우 평균 유속의 약 5% 정도였으며, 속도 지체가 최대에 이르는 지점은  $y/h \approx 0.05$  ( $y^+ = 30 \sim 50$ ) 정도인 것으로 나타났다. 유사 입자가 물보다 느리게 이동하는 것은 전적으로 유사의 비중이 물보다 크기 때문으로 보인다. 반면, 하상에 근접한 점성 저층에서는 오히려 유사 입자의 속도가 물보다 빠르게 나타났으며, 이것은 물은 고체 경계면에서 점착 조건에 종속되는 데 반하여, 유사 입자는 점성의 영향을 받지 않기 때문으로 보인다.

**핵심용어** : 입자추적유속계, 유사 흐름, 속도 지체, 유속 분포, 난류

\* 정희원, 명지대학교 토목공학과 연구원, 공학박사 (e-mail: pururumi@hotmail.com)

\*\* Research Engineer, Iowa Inst. of Hyd. Res., Ph.D (e-mail: marian-muste@uiowa.edu)

\*\*\* Professor, Iowa Inst. of Hyd. Res., Ph.D (e-mail: robert-ettema@uiowa.edu)

\*\*\*\* 정희원, 명지대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

## 1. 서론

층적 하천의 유사의 침식과 유송, 퇴적을 모의하기 위해서는 물리 모형이나 수치 모형이 이용된다. 유사의 수치 모형은 물의 거동을 나타내는 질량 보존식과 운동량 보존식, 유사의 거동을 나타내는 유사의 질량 보존식으로 보통 이루어진다. 이 때 부유사의 거동을 나타내는 데는 Eq. (1)과 같은 이송-확산 방정식(advection-diffusion equation)이나 이 방정식을 간략화한 식들이 이용된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m C_s) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_m C_s u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_m C_s v) \\ & - \frac{\partial}{\partial y}(\rho_m C_s v_s) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m C_s w) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_{sx} \frac{\partial \rho_m C_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_{sy} \frac{\partial \rho_m C_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_{sz} \frac{\partial \rho_m C_s}{\partial z} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

여기서,  $\rho_m$  은 물-유사 혼합물의 밀도,  $C_s$  은 유사의 부피 농도,  $x, y, z$  는 각각 흐름 방향, 연직 방향, 흐름에 직각 방향의 좌표계,  $u, v, w$  는 각각  $x, y, z$  방향의 유속,  $v_s$  는 정수 중에서 유사의 침강속도,  $\epsilon_{sx}, \epsilon_{sy}, \epsilon_{sz}$  는 각각  $x, y, z$  방향의 유사 확산 계수이다.

이 방정식은 근본적으로 다음과 같은 가정하에서 유도되었다.

- (1) 물과 유사의 혼합물은 연속체(continuum)로 가정할 수 있다.
- (2) 유사의 농도는 작다.
- (3) 물과 유사의 흐름에 대한 난류의 영향은 확산 계수(diffusivity coefficient)에 일괄적으로 포함되어 있으며, 난류 확산 계수(turbulent diffusion coefficient)와 유사의 확산 계수(mass diffusivity of sediment)는 같다.
- (4) 유사의 속도는 수평 방향의 경우는 물의 속도와 동일하며, 연직 방향의 경우는 물과 유사의 속도가 유사의 침강 속도 만큼 차이가 난다.
- (5) 난류 중에서의 유사의 연직 방향 속도는 정수 중에서의 유사의 침강 속도와 같다.

위의 다섯 가지 가정은 전반적으로는 잘 만족할 것으로 보이지만, 특별한 경우(과농도류, 유사의 입자가 매우 큰 경우, 흐름 방향이 급격히 변하는 경우 등)에는 적합지 못한 가정이 될 수도 있다. 그러나 이러한 가정이 어느 정도 정확하지에 대해서는 심도있는 검토가 되지 못한 상태에 있다. 그 이유는 난류의 측정은 매우 힘들며, 더구나 유사가 혼합된 흐름의 경우 물과 유사의 속도를 구별해서 측정하기 매우 힘들기 때문이다. 특히

위의 (3), (4), (5)의 세 가지 가정은 유사의 속도를 물의 속도와 구별해서 측정하지 않는 한 그 적합성을 검증하기 매우 곤란한 것들이다. 본 연구에서는 특별히 가정 (4)에 대해서 집중적으로 검토해 보고자 한다.

## 2. 기존의 관련 연구

개수로에서의 난류 측정은 매우 까다롭고 어려운 일이다. 여기에 유사 입자가 포함될 경우 그 어려움은 배가 된다. 따라서 앞의 (3)~(5)의 가정에 대해서는 이론적이나 실험적인 면에서 모두 만족할 만한 성과가 나오지 못하였다. 이를 해결하기 위해서는 특별한 장비가 뒷받침되어야 하기 때문이다.

먼저, (3)번 가정은 유사 확산 계수가 난류 확산 계수와 같다는 것이다. 이를 식으로 표현하면 Eq. (2)와 같다.

$$\epsilon_s = \beta \epsilon_m \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_m$  은 물의 운동량 확산 계수이며,  $\beta$  는 비례 상수로 일반적으로 1.0으로 가정한다. 이 값에 대해서는 오랫동안 논쟁이 되어 왔으나(예를 들면, Jobson and Sayre, 1970), 이들의 경우는 모두 실제  $\beta$  값을 측정하는 것이 아니라 간접적으로 산정한 것이므로 그 진위를 파악하기 어려운 점이 있다. 실험적으로  $\beta$  값을 직접 측정된 사례는 최근에 Cellino (1998)가 측정하여 이 값이 1.0보다 작음을 입증한 것이 유일한 것으로 보인다.

(4)번 가정에 대해서도 1990년대 후반 들어서야 본격적인 연구가 추진되었다. 학계에 보고된 사례로는 LDV(Laser Doppler Velocimetry)에 위상을 판별할 수 있는 장치를 이용하여 유사와 물의 속도를 별도로 측정하는 데 성공한 사례 (Muste, 1995; Righetti and Romano, 2004)와 PIV에 특별한 필터링 기법을 이용한 경우(Kiger and Pan, 2002)가 보고된 바 있다. 이들은 모두 부유사 입자가 물에 비해 약간의 속도지체(velocity-lag)를 보인다는 결과를 제시한 바 있다. 그러나, Muste (1995)의 경우는 측정 범위가 외부 영역(outer region)에 국한되었고, Righetti and Romano (2004)와 Kiger and Pan (2002)은 오직 한 경우의 실험 자료만을 이용하였을 뿐이다.

또한, Greimann (1998)은 Enwald, et al. (1996)이 제안한 이상류(二相流, two-phase flow)에 대한 지배방정식에서 유사 입자의 속도 분포를 유도한 바 있다. 또한 Cheng (2004)은 유사 입자들간의 충돌과 차폐 효과(hiding effect)를 이용하여 유사 입자의 속도 지체를 유도하였다. 그러나, 이들의 연구는 결과에 관계없이 유도

과정에서 신뢰하기 힘든 가정과 간략화에 의존한 문제가 있는 것으로 보인다.

한편, (5)번 가정에 대해서도 현재까지 만족할 만한 측정 성과가 도출되지 못하고 있다. 간접적인 방법으로 Hwang (1985)이 진동 난류에서 유사 입자의 침강 속도가 감소됨을 입증한 바 있으나, 개수로 난류에서 유사 입자의 침강 속도 변화에 대해 측정된 사례는 없는 것으로 보인다.

### 3. 실험 및 영상 획득

실험은 일본 고베의 고베 대학 수리 실험실에 있는 순환 수로에서 수행되었다 (Fig. 1 참조). 실험 수로의 길이는 6.0 m, 폭 0.15 m 이며, 수로 바닥은 스테인리스 판으로 되어 있고 상류단에서 5.3 m 지점에 측정을 위한 유리창이 있다. 유사 입자의 퇴적을 방지하기 위해서 상류와 하류의 탱크 수위는 최소한으로 제한하였다. 실험시 수온은 상온(약 22°)을 유지하였으며, 수로 경사는 0.011, 수심은 약 0.02 m, 평균 유속은 0.9 m/s 이다. 영상을 만들기 위한 장치로는 최소 펄스 간격 5 ns로 20 mJ의 에너지를 방출하는 두 개의 펄스 Yag 레이저 (Big Sky Laser사의 모델명 ULTRA)가 이용되었다. 레

이저의 측정 빈도는 15 Hz이며, 적용된 영상 사이의 시간 간격은 0.2 ms이었다. 추적 입자로는 크기 0.02 mm, 비중 1.02~1.03인 나일론-12를 이용하였으며, 유사 입자로는 비중 2.65인 자연 모래를 0.2 mm와 0.25 mm로 체가름하여 사용하였다. 레이저 영상은 Kodak Mega-plus, ES 1.0 Progressive Scan 카메라와 XCAP 소프트웨어를 이용하여 디지털 영상으로 만들어 저장하였으며, 영상의 해상도는 1008×1018 픽셀이다.

실험 케이스는 유사가 포함되지 않은 정수(CW)와 유사 농도를 증가시켜 가며 NS1, NS2, NS3의 세 가지 경우를 실험하였다. NS1의 경우 유사 농도는 부피 단위로  $0.46 \times 10^{-3}$  이었으며, NS2와 NS3는 각각 대략 2배 ( $0.92 \times 10^{-3}$ )와 4배 ( $1.62 \times 10^{-3}$ ) 정도에 해당한다. 각 경우에 대해 약 6,000 쌍의 이미지를 획득하였다. 이 실험의 수리 특성과 유사 특성은 Table 1에 요약되어 있다.

한편, Fig. 2는 0.2 ms 간격으로 촬영된 한 쌍의 영상을 예로 보인 것이다 (인쇄된 영상에서 입자들이 쉽게 판독될 수 있도록 하기 위해 영상을 반전시켰다). Fig. 2에서 큰 입자들은 유사 입자이고 작은 입자들은 물의 추적 입자이다.

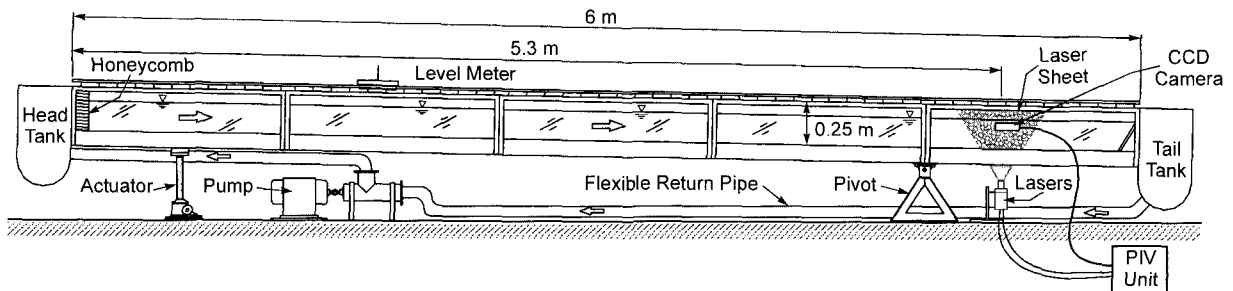
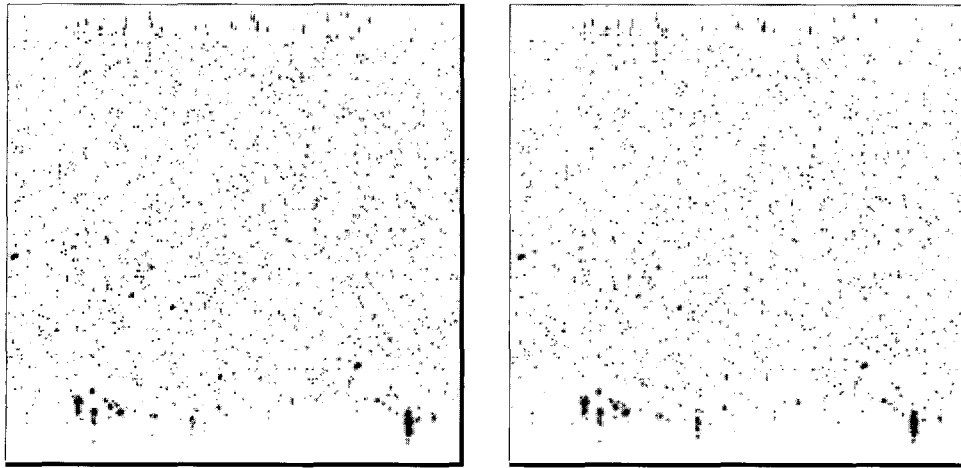


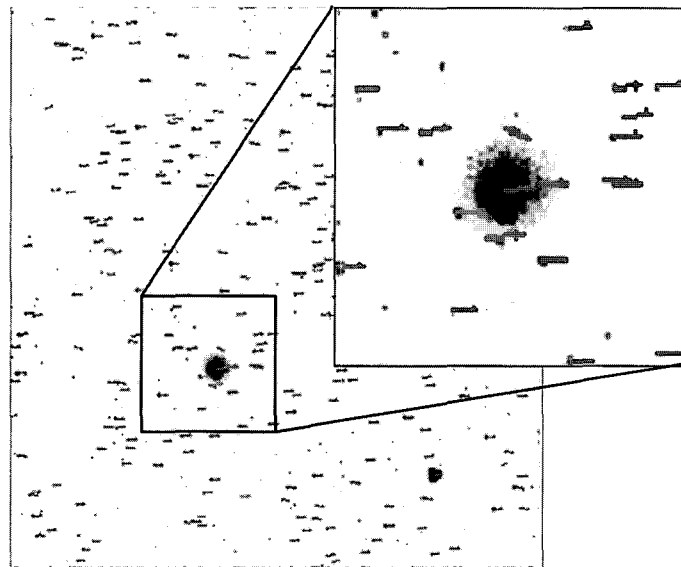
Fig. 1. Layout of the experiment flume

Table 1. Characteristics of the experiments

runs		CW1	NS1	NS2	NS3
		clear water	water, sand	water, sand	water, sand
hydraulic condition	width (m)	0.15	0.15	0.15	0.15
	depth (m)	0.021	0.021	0.021	0.021
	slope	0.0113	0.0113	0.0113	0.0113
	temp. (°C)	22~23	23	22	23~24
	hyd. radius (m)	0.016	0.016	0.016	0.016
	Reynolds no.	17,670	17,650	17,420	17,340
sediment properties	specific gravity	-	2.65	2.65	2.65
	size (mm)	-	0.21~0.25	0.21~0.25	0.21~0.25
	fall vel.(m/s)	-	0.024	0.024	0.024
	conc. ( $\times 10^{-3}$ )	0.00	0.46	0.92	1.62
no. of image pairs analyzed		1,742	3,493	5,826	5,828



(a) First image (b) Second image  
**Fig. 2. Sample images of sediment-laden flow**



**Fig. 3. A sample velocity vector field**

#### 4. 영상 분석에 의한 속도 지체의 측정

##### 4.1 마찰 속도의 측정

획득한 영상을 Yu (2004)에 의해 제안된 PTV를 이용하여 분석하였다. Fig. 2와 같은 한 쌍의 영상에서 PTV 분석에 의해 구한 순간 유속장의 일부를 예로 보이면 Fig. 3과 같다. 실험의 한 케이스에 대해 약 6,000 쌍의 순간 속도장을 구할 수 있으므로, 이들을 Fig. 4와 같이 세로 방향으로 53개의 격자를 형성하여 통계처리하면 물과 유사의 평균 유속, 난류 강도, Reynolds 응력, 난류 확산 계수 등을 구할 수 있다. 이렇게 하여, 바닥에서  $y^+ = 2.5$  까지 근접하여 물과 유사의 속도를 구하였다. 여기서  $y^+ \equiv yu_*/\nu$ 는 무차원 거리로, 종종

벽거리(wall distance) 또는 벽단위(wall unit)라고 불리며,  $y$ 는 연직 방향의 높이,  $u_*$ 는 마찰 속도,  $\nu$ 는 물의 동점성계수이다.

Table 2는 각각의 분석 결과를 나타내고 있다. 물과 유사의 특성을 나타내기 위해 유속의 대수분포식과 Reynolds 응력 분포식의 매개변수들을 이용하였다. 즉 Table 2에서 '유속 분포식의 경사'는 유속의 대수분포식에 포함되어 있는 계수인  $u_*/\kappa$ 를 의미한다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) + B \quad (3)$$

여기서,  $u$ 는 하상으로부터 높이  $y$ 에서의 흐름 방향의 유속,  $\kappa$ 는 von Karman 상수,  $B$ 는 적분 상수 이

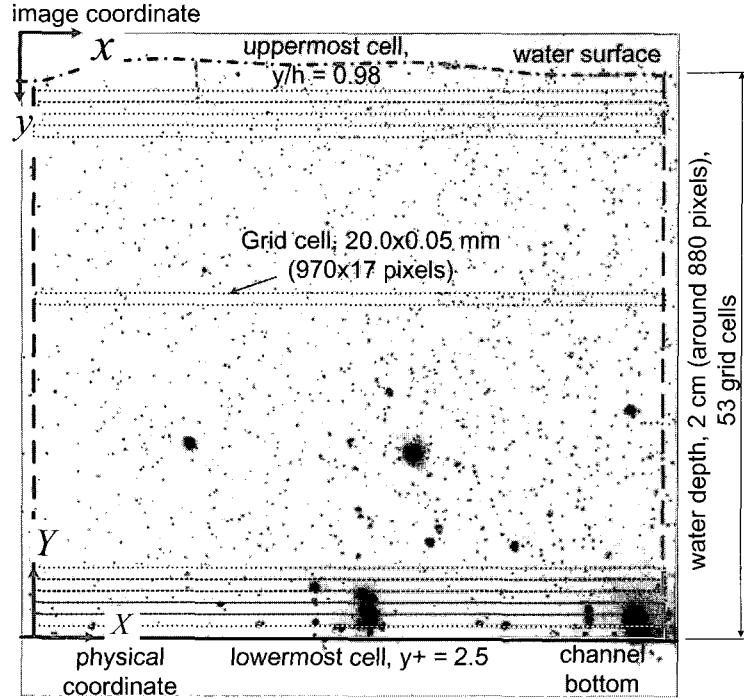


Fig. 4. Layout of grid cells for statistical analysis of velocity fields

Table 2. Characteristics of flow and sediment by using PTV

runs		CW1	NS1	NS2	NS3
slope of vel. profile		0.1043	0.1044	0.1083	0.1129
friction velocity (m/s)	$u_{*1}$	0.042	0.042	0.043	0.043
	$u_{*2}$	0.042	0.042	0.042	0.042
Karman const., $\kappa$		0.402	0.402	0.380	0.374
integral const., $B$		5.50	5.40	4.54	3.92
mean vel. (m/s)	$\overline{U_w}$	0.839	0.813	0.796	0.793
	$\overline{U_s}$	-	0.786	0.758	0.753

다.  $\kappa$  와  $B$  의 값은 측정된 유속 분포에서 대수분포식이 성립하는 중복영역 (overlap region)의 자료를 회귀분석하여 구한다.

마찰 속도를 구하는 데는 여러 가지 방법이 있으나 (Yu, 2004), 여기서는 Reynolds 응력 분포식에 의한 방법과 운동량 평형식에서 구하는 두 가지 방법을 이용하였다. 즉, Reynolds 응력 분포식은 Eq. (4)와 같다.

$$-\overline{u'v'} = u_*^2 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (4)$$

Eq. (4)에서 구한 마찰 속도를  $u_{*1}$  이라 한다. 여기서  $h$  는 수심이다. 한편, 운동량 평형식은 Eq. (5)와 같다.

$$u_* = \sqrt{gRS_e} \quad (5)$$

Eq. (5)에서 구한 마찰 속도는  $u_{*2}$  로 나타낸다. 여기서  $g$  는 중력가속도,  $R$  은 수리반경,  $S_e$  는 에너지 경사이다.

#### 4.2 속도 지체의 측정

Table 2에서 물과 유사의 평균 유속을 살펴 보면, 유사 입자는 물에 비해 평균적으로 4~5% 정도 느리게 이동됨을 알 수 있다. NS2의 경우에 보면 물이 평균적으로 0.796 m/s로 이동하는 데 반하여, 유사는 0.758 m/s로 이동한다. 이 경우 평균 속도 지체 (velocity-lag ≡ 물의 속도 - 유사 속도)는 0.038 m/s로 평균

유속의 약 5%에 해당한다. 이 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 5 (선형축)와 Fig. 6 (대수축)과 같다. 또한 속도 지체만을 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 6에서 'Theoretical'로 표시된 실선은 벽법칙과 완충영역의 유속, 대수법칙을 합성한 것이다. 세 경우는 각각 유사의 농도가 저, 중, 고인 경우이다. 한편, 농도에 따른 속도 지체의 변화에 대해서는 농도에 따라 약간의 변화 경향을 보이나, 이용된 자료셀의 수가 세 개에 불과하며 각 결과가 뚜렷한 경향성을 보이지 않기 때문에 현재로서는 어떤 결론을 내리기 곤란하다. 대체적인 경향만을 살펴 본다면, 농도가 높아질수록 깊이에 따른 속도 지체의 변화가 작아지는 것으로 보인다.

또한, Fig. 6은  $y^+ \leq 10$ 인 점성저층 (viscous sublayer)에서는 오히려 유사 입자가 물보다 빠르게 이동함을 보여 주고 있다. 이것은 물이 가진 점성 때문에 바닥에서 점착 조건(no-slip condition)을 만족하기 위해 바닥 근처에서 물입자는 속도가 급격히 감소되지만, 유사는 이 조건에 구애받지 않아 물만큼 속도 감소를 보이지 않기 때문으로 보인다. 이러한 거동은 Kiger and Pan (2002)와 Righetti and Romano (2004)의 측정에서

도 나타난 바 있다. 이러한 지체 속도의 역전 현상은 유사 입자에 의한 Karman 상수의 감소(Vanoni, 1946)를 효과적으로 설명할 수 있도록 해 준다.

Figs. 5~7에서 특징적으로 알 수 있는 것은 바닥에서 어느 정도 이상 떨어진 영역( $y^+ > 10$ )에서는 바닥에서 멀어질 수록 속도 지체가 감소한다. 이 경향은 Muste (1995)의 실험에서도 발견된 바 있다. 또한 Greimann (1998)은 이를 Eq. (6)과 같이 나타낸 바 있다.

$$u_L = v_s 0.66(1 - y/h)^2 \exp(1.34y/h) \quad (6)$$

여기서  $u_L$ 은 물 입자에 대한 유사 입자의 속도 지체이다.

Eq. (6)은 Fig. 7에 검정색 실선으로 표시되어 있다. 이를 보면 Greimann의 식은 속도 지체의 경향성을 나타내지만, 실제 크기는 제대로 기술하지 못함을 알 수 있다. 그것은 Eq. (6)이 속도 지체가 단순히 (정수 중에서) 유사의 침강 속도에 비례한다고 가정하여, Eq. (1)의 가정 (5)와 마찬가지로 난류에 의한 유사의 침강 속도 변화를 무시했기 때문으로 보인다.

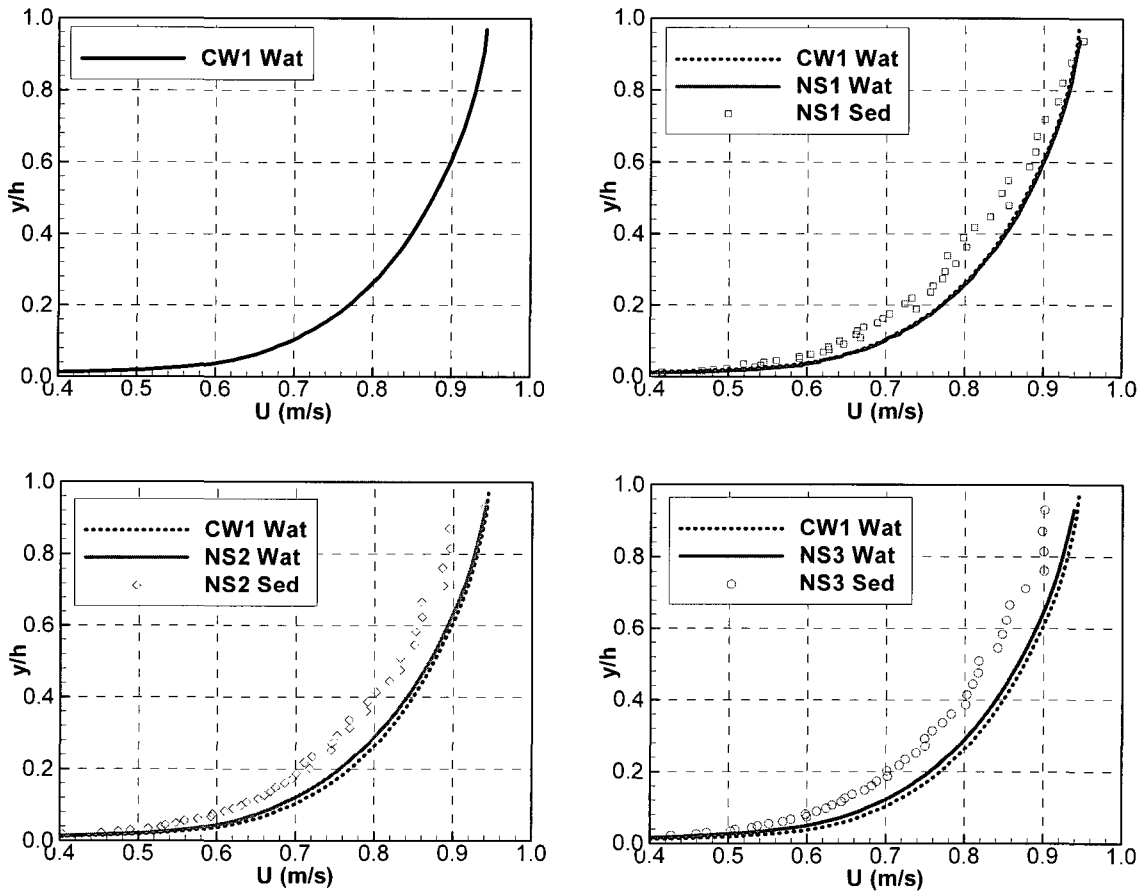


Fig. 5. Velocity profiles of water and sediment in sediment-laden flows (linear scale)

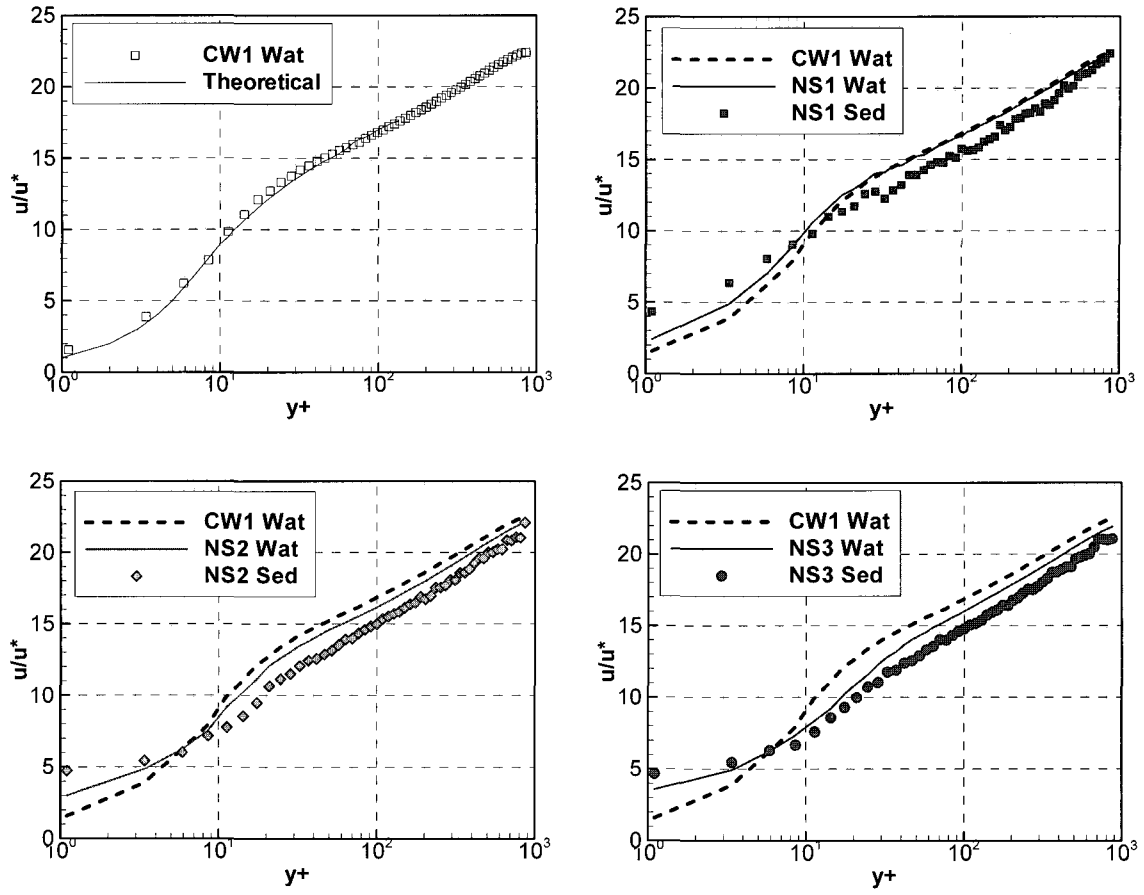


Fig. 6. Velocity profiles of water and sediment in sediment-laden flows (log scale)

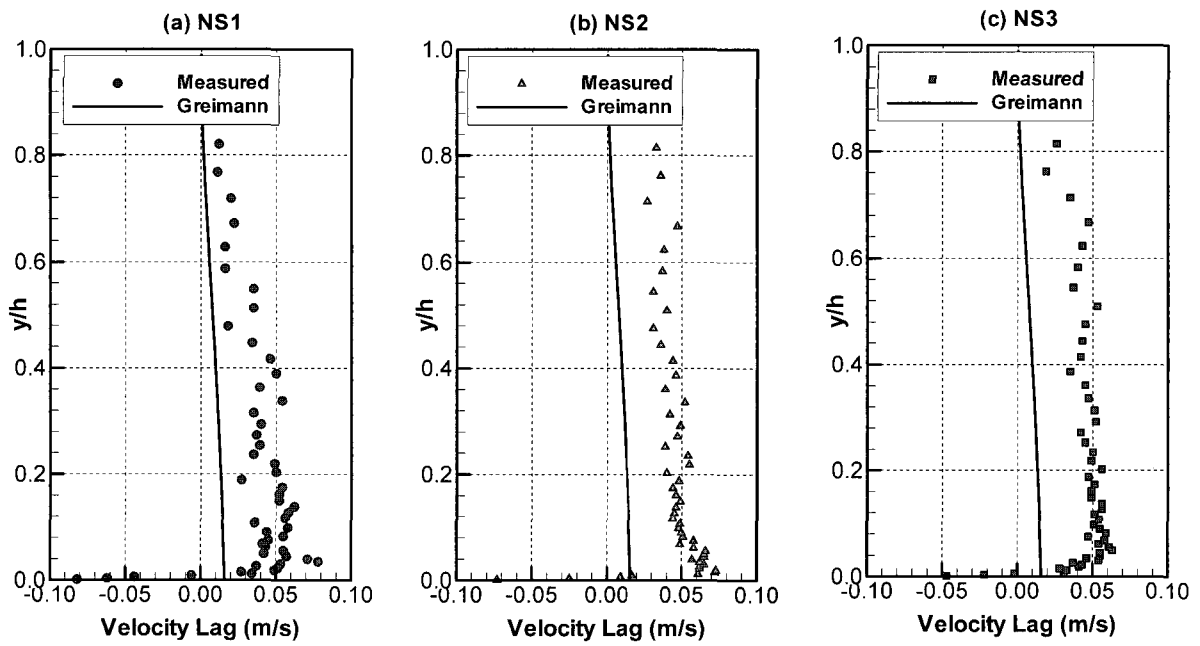


Fig. 7. Velocity-lags in sediment-laden flows

한편, 최근에 Cheng (2004)도 유사 입자의 속도 지체에 대한 이론식을 발표한 바 있으나, 그의 식으로 계산된 속도 지체는 Greimann (1998)의 식보다 작은 값을 나타내었다. 또한, Cheng (2004)의 속도 지체식은 그 유동 과정에서 근거가 의심스러운 가정 (유사 입자의 속도 지체가 입자들간의 충돌에 의한 것이라는 가정)에 근거하고 있어 신뢰하기 힘든 면이 있다.

속도 지체의 변화가 난류의 어떤 성분과 관련이 있는가를 분석하기 위해, 난류 강도 ( $\overline{u'^2}/u_*^2$ )와 Reynolds 응력 ( $-\overline{u'v'}/u_*^2$ )에 대해 살펴 보았다.

Fig. 7에서 속도 지체가 최대에 이르는 지점은  $y/h = 0.05$  정도인 것으로 나타났다. 이 지점의 높이를 내부 변수(벽 거리)로 나타내면,  $y^+ = 30 \sim 50$  정도이다. 이 지점은 Reynolds 응력이 최대가 되는 지점과 거의 일치한다. Fig. 8에서 보면, NS1의 경우는 산포가 심하여 쉽게 알 수 없으나 NS2와 NS3 경우는 Reynolds 응력의 분포가 최대값을 가지는 부분과 속도 지체가 최대에 이르는 부분이 상당히 일치함을 알 수 있다. 한편, Panton (1990)은 난류의 Reynolds 응력이

최대가 되는 지점에 대해서 Eq. (7)을 제시한 바 있다.

$$y_{max}^+ = \sqrt{Re\epsilon/\kappa} \quad (7)$$

Eq. (7)을 적용하여 계산해 보면, 본 실험의 경우에 Reynolds 응력이 최대가 되는 지점은  $y^+ \approx 200$  정도 이어야 하나, 측정 결과는  $y^+ = 30 \sim 50$ 에서 최대가 된다. 이처럼 차이가 나는 이유는, Panton (1990)의 자료가 상당히 작은 Reynolds 수의 결과에서 유도되었기 때문으로 보인다.

한편, 난류 강도와와의 관계를 살펴 보면 다음과 같다. Eckelmann (1974)의 실험 결과에 의하면  $y^+ \approx 13$  정도 되는 점에서 난류 강도가 최대에 이르는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 측정 결과도 거의 같은 위치에서 난류 강도가 최대값에 이르는 것을 보여 주어, 본 연구의 난류 측정이 상당히 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다. 이런 점에서 결국, 유사의 속도 지체는 난류 강도가 아니라 Reynolds 응력이 가장 크게 관련이 있음을 알 수 있다.

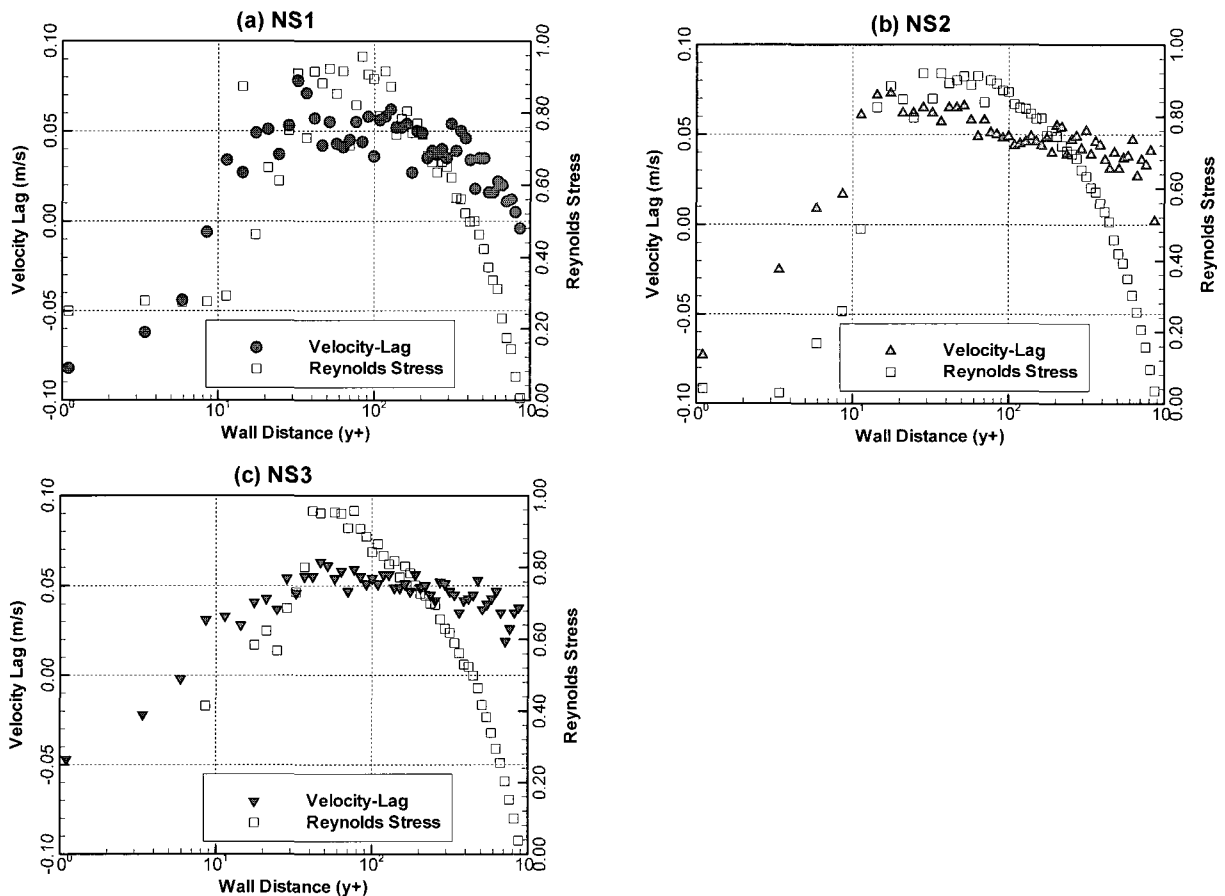


Fig. 8. Velocity-lags of sediment particles and Reynolds stress



### 4.3 속도 지체의 발생 이유

유사 입자가 물보다 느리게 이동하는 것은 전적으로 유사 입자의 비중이 물보다 크기 때문으로 보인다. 유사 입자의 비중이 물과 같거나 비슷한 경우에는 속도 지체를 발견할 수 없기 때문이다(Yu, 2004). 즉, 동일 흐름에 대해 비중이 1.02~1.03 정도로 거의 물에 가까운 나일론-12를 같은 농도로 투입하고 수행한 일련의 입자의 속도 측정 결과에서는 속도 지체가 발견되지 않았기 때문이다. 또한 기존의 연구들 중에서도 비중이 물과 비슷한 경우에 속도 지체를 보고한 연구는 한 건도 없다. 속도 지체가 생기는 것은 난류의 터짐 현상(bursting)과도 관련이 있는 것으로 보인다. 쓸기 현상(sweep)이 일어날 때 유사 입자는 그 크기와 비중 때문에 가속되는 데 물보다 많은 시간이 걸리게 되고 이 때문에 물과 같은 속도에 느리게 도달한다. 반면 방출(ejection)이 일어날 때 유사 입자는 수평방향의 감속이 늦게 되고, 연직방향의 가속 또한 늦게 된다. 즉, 유사 입자는 이 경우 물의 일반적인 거동을 방해하는 역할을 하게 된다. 즉, 난류 강도가 가장 강해서 물의 가속이 빈번히 일어나는 곳일수록 유사 입자의 속도 지체가 커질 가능성이 높게 된다. 이것이 비중이 물보다 큰 유사 입자에서 속도 지체가 생기는 이유인 것으로 보인다.

유사 입자의 속도 지체가 있다는 사실은 앞서 언급한 Eq. (1)의 여러 가정 중 가정 (4)가 어느 정도 한계가 있음을 의미한다. 이 결과에서 난류와 유사 입자의 상호 작용 중 많은 부분이 설명된다. 그 대표적인 예로는 유사 입자를 투입하면, Karman 상수가 감소된다는 것이다 (Vanoni, 1946). Karman 상수의 감소는 다음과 같이 설명될 수 있다. 유사 입자는 물과 운동량을 교환하면서 물의 속도 분포를 변화시키는 결과를 초래한다. 즉, 외부 영역에서는 유속을 감소시키고 내부 영역에서는 유속을 증가시킨다. Karman 상수를 결정하는 영역이 내부 영역과 외부 영역이 겹치는 중첩 영역이므로, 중첩 영역의 입장에서 보면 상부의 유속은 느려지고 하부는 빨라져서 유속 분포의 기울기는 증가한다. 유속 분포의 증가는 바로 Karman 상수의 감소로 연결된다는 것이다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 입자 추적 유속계 (PTV)를 이용하여 자연 모래를 투입한 난류의 흐름의 유속과 유사의 속도를 측정하였다.

- (2) 측정 결과, 하상에서 어느 정도 떨어진 외부 영역에서 유사 입자의 속도는 물보다 느린 경향을 보였다. 본 연구의 경우 이 속도 지체의 양은 평균 유속의 약 5% 정도였으며, 속도 지체가 최대에 이르는 지점은  $y/h \approx 0.05$  ( $y^+ = 30 \sim 50$ ) 정도인 것으로 나타났다. 비중이 물과 같은 입자에 의한 결과를 고려하면, 속도 지체가 생기는 이유는 유사 입자의 비중에 의한 관성 효과로 보인다.
- (3) 반면, 하상에 근접한 영역( $y^+ \leq 10$ )에서 오히려 유사 입자의 속도가 물보다 빠르게 나타났다. 그 이유는 유체는 점성 때문에 바닥에서 속도가 0이 되는 점착 조건을 만족시켜야 하지만, 유사 입자는 점착 조건에 구애받지 않기 때문으로 보인다.
- (4) 유사 입자의 속도 지체에 가장 크게 영향을 미치는 것은 난류 강도가 아니라 Reynolds 응력인 것으로 보인다.

## 참고 문헌

- Cellino, M. (1998). *Experimental study of suspension flow in open channels*, Ph. D dissertation, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Cheng, N. S. (2004). "Analysis of velocity lag in sediment-laden open channel flows," *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(7), pp. 657-666.
- Enwald, H., Peirano, E., and Almstedt, A.-E. (1996). "Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization." *Int. J. of Multiphase Flow*, 22 (Supplement), 21-66.
- Greimann, B. P. (1998). *Two-phase flow modeling of suspended sediment transport*, Ph.D. thesis, University of Iowa, Iowa City, IA.
- Hwang, P. A. (1985). "Fall velocity of particles in oscillating flow." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111(3), 485-502.
- Jobson, H. E., and Sayre, W. W. (1970). "Vertical transfer in open channel flow." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 96(3), 703-724.
- Kiger, K. T., and Pan, C. (2002). "Suspension and turbulence modification effects of solid particles on a horizontal turbulent channel flow." *J. of Turbulence*, 3 (1), 1-21.
- Muste, M. (1995). *Particle and liquid velocity measurements in sediment-laden flows with a*

- discriminator laser-doppler velocimeter*, Ph.D. thesis, University of Iowa, Iowa City, IA.
- Panton, R. L. (1990). "Scaling turbulent wall layers." *J. of Fluids Engineering*, 112(12), pp. 425-432.
- Righetti, M., and Romano, G. P. (2004). "Particle-fluid interactions in a plane near-wall turbulent flow," *J. of Fluid Mechanics*, 505, pp. 93-121.
- Vanoni, V. A. (1946). "Transportation of suspended sediment by running water." *Trans. of ASCE*, 111, 67-133.
- Yu, K. (2004). *Particle tracking of suspended-sediment velocity in open-channel flow*, Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Iowa, Iowa City.
- (논문번호:05-103/접수:2005.07.16/심사완료:2005.11.11)