

# 유사입자에 의한 개수로 난류 유속 분포의 변화에 대한 재검토

## Re-evaluation of Change of Mean Velocity Profile in Open-Channel Turbulent Flows due to Sediment Particles

류 권 규\* / 윤 병 만\*\*

Yu, Kwongkyu / Yoon, Byungman

### Abstract

It is well known that sediment particles introduced in open-channel turbulent flows change mean velocity profile, since Vanoni suggested the reduction of the Karman constant in 1946. However, how the sediment particles take such a role and what parameters would be changed have been debated up to now. Some researchers, on the other hand, have insisted that the constant would not be changed regardless of introducing sediment particles. The present study is a careful re-evaluation of the previous studies on this issue. The study revealed some questionable approaches or methods in the decision of the previous researches and found the reason why this issue has been debated for a long time. The result indicated that the Karman number is reduced by adding sediment particles, but the amount of reduction is much smaller than the previous researches insisted. Finally, the present study proposes a mechanism of the Karman number reduction due to sediment particles.

**keywords** : turbulent flow, velocity profile, sediment particle, Karman number

### 요 지

Vanoni가 1946년에 유사를 포함한 흐름에서는 Karman 상수가 감소한다고 제안한 이후로 개수로 흐름에서 유사 입자가 평균 유속 분포를 변화시킨다는 것은 매우 잘 알려진 사실이다. 그러나 유사 입자가 어떤 역할을 하는지, 어떤 매개 변수가 변화할 것인지에 대해서는 현재까지도 논쟁이 계속되고 있다. 한편, 어떤 연구자들은 난류중에 유사 입자가 투입되더라도 Karman 수는 변하지 않는다고 주장하였다. 본 연구에서는 Karman 수의 변화에 대한 기존의 연구들을 재평가하였다. 이를 통하여 기존 연구들의 방법에서 몇 가지 오류들을 밝혀 내었으며, 왜 이 사항이 오랜 동안 논쟁이 되어왔는가 하는 이유를 찾아 내었다. 또한 분석 결과 유사 입자의 투입에 의해 Karman 수는 감소되지만 그 감소량은 기존의 연구들에서 제시된 것보다 훨씬 작음을 밝혔다. 또한 본 연구는 유사의 투입에 의해 Karman 수가 감소되는 기구를 제시하였다.

**핵심용어** : 난류, 유속 분포, 유사 입자, Karman 수

### 1. 서 론

난류 중에 유사 입자가 들어가면, 유사 입자는 난류와 상호 작용을 하여 난류의 특성을 변화시키는 것으

로 알려져 있다. 구체적으로는 난류의 평균 유속 분포나 난류 강도, Reynolds 응력 분포 등이 변화되는 것으로 알려져 있으나, 그 변화의 크기나 경향에 대해서는 여전히 논쟁중인 것들이 많다(Muste, 2001). 그 중에서

\* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 전임강사 · 공학박사(e-mail: pururumi@deu.ac.kr)

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

가장 큰 논쟁을 불러 일으킨 것은 유속 분포 변화, 다른 면에서는 Karman 상수의 변화이다. 이에 대해서는 일찍이 Vanoni (1946)가 개수로 난류 중에 유사 입자를 포함한 흐름에서는 유사에 없는 깨끗한 물보다 Karman 상수가 감소한다고 주장한 것이 그 효시이다. 그의 주장은 Einstein and Chien (1955), Vanoni and Nomicos (1960), Elata and Ippen (1961)과 같은 연구들에 의해 뒷받침되었으며, Vanoni (1975)와 같은 수많은 유사 관련 교과서에 실려져 거의 정설처럼 인식되어 왔다. Fig. 1은 Vanoni and Nomicos (1960)가 Vanoni (1946)의 주장을 뒷받침하기 위해 작성한 그림이다. Fig. 1의 오른쪽 그림에서 알 수 있듯이 깨끗한 물에서는 Karman 상수가 0.4였으나, 유사 농도가 15.8 g/l 일 때는 0.21로 현저하게 감소하였다. Karman 상수가 감소한다는 것은 바닥 근처에서 유속 분포식의 기울기가 더 급해진다는 것을 의미한다. (이런 점에서, Karman 상수는 더 이상 상수가 아니므로, 이 표현도 Karman 수라고 하는 것이 더 적합할 것으로 보이며, 이 때문에 앞으로 본고에서는 Karman 수라고 표현할 것이다.) 여기서 ‘유속 분포의 기울기’란 유속의 연직 분포를 나타내는 식의 기울기를 말한다. 즉 다음에 나오는 Eq. (1)의 기울기( $1/\kappa$ )를 의미한다.

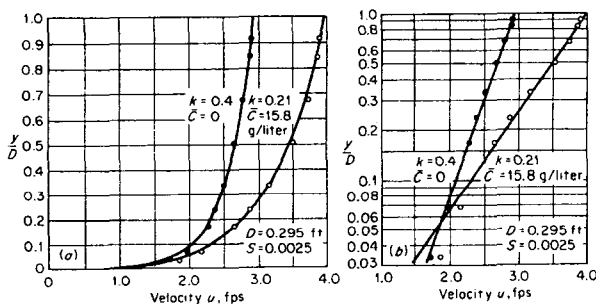


Fig. 1. Velocity profiles for clear-water and sediment-laden flow (Vanoni and Nomicos, 1960)

Karman 수의 감소에 대한 주장은 Coleman (1981)이 유사 농도가 높아지더라도 이것이 변하지 않고 일정하다고 주장하기 전까지는 부인할 수 없는 정설로 취급되었다. 그러면서 Coleman (1981)은 Coles (1956)의 후류 법칙을 이용하여 후류 계수  $\Pi$ 를 도입하면, Karman 수가 변하지 않고 상수로 일정하게 유지됨을 보였다. 이를 계기로 유사 입자에 의한 평균 유속 분포의 변화에 대한 논쟁이 시작되었다.

Gust and Southard (1983), Lyn (1986), Best et al. (1997), 그리고 Guo (1998) 등은 Vanoni (1946)의 주장

을 지지하였고, Itakura and Kishi (1980)와 Umeiyama and Gerritsen (1992)은 Coleman (1981)의 주장을 지지하였다. Muste (2001)는 20여 개가 넘는 관련 연구를 하나의 큰 표로 요약하였다. 이렇게 많은 연구들이 여러 가지로 논쟁을 벌이고 있으나, 어떤 주장이 옳은가에 대해서는 아직 확실하지 않다.

본 연구에서는 왜 이렇게 결론이 나지 않고 논쟁이 계속되는가 하는 점과 이런 종전의 연구들에서 문제는 없는가 검토하고자 한다. 본 연구에서 이들 모두를 면밀히 검토한 결과, 몇몇 연구에서는 유속 분포 공식을 잘못 이용하였거나, 적합하지 않은 자료를 이용하는 등 연구 방법이나 자료 등에 문제가 있음이 발견되었다.

## 2. 유속 분포와 매개 변수들

### 2.1 유속 분포

일반적으로 매끄러운 하상의 난류의 평균 유속 분포는 하상 가까이의 내부 영역(inner region)에서는 대수 법칙(log-law)을 따르는 것으로 알려져 있다. 간혹 외부 영역까지 확대하여 대수 후류 법칙(log-wake law)을 이용하기도 하나, 어디까지나 근본이 되는 것은 대수 법칙이다. 대수 법칙은 Prandtl과 von Karman 등이 반경험적으로 유도하였으며, Millikan에 의하여 내부 영역과 외부 영역의 유속의 경사가 일치하는 조건으로 유도된 바 있다 (Kundu, 1990). 대수 법칙은 다음과 같이 나타내어진다.

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

여기서  $u$ 는 주흐름 방향의 유속,  $u_*$ 는 마찰 속도,  $\kappa$ 는 Karman 수,  $y$ 는 하상으로부터의 높이,  $\nu$ 는 물의 동점성 계수,  $B$ 는 적분 상수이다. 깨끗한 물의 경우  $\kappa$ 는 0.41,  $B$ 는 5.5 정도로 알려져 있다. 일반적인 경우 대수 법칙은 후류 성분이 강한 외부 영역이나 벽 가까이에는 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다. Nezu and Nakagawa (1993)은 대수 법칙을 적용할 수 있는 상한으로  $y/h \leq 0.2$ 를 제시한 바 있다. 이 외에도 대수 법칙의 적용 한계에 대해서는 Kundu (1990)에서도 자세히 기술한 바 있다.

한편, 외부 영역(outer region)의 유속 분포는 유속 결손 법칙으로 나타낼 수 있다. 이 유속 결손 법칙은 대수 법칙을 수면까지 적용하여 유도한 것이다. 이 식의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (2)$$

여기서  $u_{\max}$ 는 최대 유속이고,  $\delta$ 는 경계층의 두께(개수로 흐름의 경우 수심  $h$ )이다.

한편, 대수 법칙은 후류 영역에 적용할 수 없기 때문에, Coles (1956)는 후류 효과를 표현할 수 있는 항을 추가하여 다음과 같은 대수-후류 법칙(log-wake law)을 제안하였다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{y u_*}{\nu}\right) + B + \frac{2\Pi}{\kappa} W\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (3)$$

여기서  $\Pi$ 는 후류 강도(wake strength parameter)이고,  $W$ 는 후류 함수(wake function)이다. 경험적으로 Coles (1956)는 후류 함수가 다음과 같은 형태를 갖는다고 제안하였다.

$$W\left(\frac{y}{\delta}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi y}{2\delta}\right) \quad (4)$$

Eq. (3)을 외부 변수인  $u_{\max}$ 와  $\delta$ 를 이용하여 다시 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{y}{\delta}\right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2\left(\frac{\pi y}{2\delta}\right) \quad (5)$$

이러한 수정에도 불구하고, 대수 후류 법칙인 Eq. (3)이나 Eq. (5)는 자유 수면 영역(free surface region)인  $y/\delta > 0.6 \sim 0.9$ 에는 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다. 그것은 이 식이 수면 경계 조건을 만족하지 않기 때문이다(Guo, 1998).

수면 경계 조건을 만족하도록 하기 위해 Guo (1998)는 새로운 항을 도입하고, 이 식을 수정 대수 후류 법칙(modified log-wake law)이라고 하였다.

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \log(\xi) + \Omega \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\xi\right) + \frac{1}{\kappa}(1 - \xi) \quad (6)$$

여기서  $\Omega(= 2\Pi/\kappa)$ 는 후류 계수이고,  $\xi(= y/\delta)$ 는 무차원 수심이다. Eq. (6)에서 우변의 첫항은 벽 근처의 관성 효과를 나타내며, 둘째 항은 큰 규모의 난류 혼합, 셋째 항은 수면 경계의 영향을 나타낸다(Guo, 1998).

## 2.2 매개 변수들

위와 같은 다양한 유속 분포 공식들은 총 3개의 매개 변수 (또는 계수), Karman 상수(또는 Karman 수)  $\kappa$ , 적분 상수  $B$ , 후류 계수  $\Pi$  (또는  $\Omega$ )를 가지고 있다. 매끄러운 하상 위의 난류에 대해 Karman 수는 대략 0.41, 적분 상수는 5.5의 값을 갖는 것이 알려져 있으나, 후류 계수에 대해서는 그 값이 연구자들에 따라 천차만별이다. 위의 세 가지 계수는 모두 물리적 성질을 직접 표현하는 계수들이 아니므로, 실험에서 직접 값을 측정할 수 없다. 이들 계수를 결정하기 위해서는 먼저 적절한 공식을 선정하고 회귀 분석 등을 통하여 그 값을 산정하여야 한다. 예를 들어 같은 자료를 이용하더라도 Eq. (1)과 Eq. (2)에서 나온 Karman 수의 값이 다르게 될 수 있다는 의미이다. 이외에도 마찰 속도  $u_*$ 도 매개 변수로 볼 수 있으나, 마찰 속도는 위의 세 매개 변수와 달리 직접 측정이 가능하다. 마찰 속도의 측정 방법에 대해서는 Yu (2004)에 자세히 논의되어 있다.

먼저, 이들 매개 변수들을 검토하는 데, 무엇보다도 기본이 되는 것은 Karman 수이다. 그런데, Karman 수는 대수 법칙에서 처음 나온 것이므로, 유속의 변화를 살펴 보기 위해서는 대수 법칙을 이용하는 것이 가장 무난할 것으로 보인다. 대수 법칙의 유용 범위는 큰  $y^+(= y u_*/\nu)$ 와 작은  $y/\delta$ 가 필수적이다 (Kundu, 1990). 이것은 대수 법칙을 유도할 때 적용한 기본 가정 때문이다. 대수 법칙을 적용할 수 있는 하한은  $y^+ \cong 30 \sim 70$  (어떤 경우는  $30 \sim 50$  정도라고 하기도 하며 흐름 상태에 따라 다르다), 상한은  $y/\delta \cong 0.2$  (이를 내부 변수로 표현하면  $y^+$ 가 대략 1,000 이하이다.) 정도이다.

## 2.3 종전 연구의 문제들

일반적으로 어떤 공식의 매개 변수를 실측 자료의 회귀 분석으로 결정할 때는, 다음의 네 가지 사항에 주의할 기울여야 한다.

- ① 함수나 공식, 계수의 형태를 적절하게 선정하여야 한다.
- ② 이용하려는 자료가 충분히 유의성이 있어야 한다.
- ③ 상관 계수는 충분히 커야 한다.
- ④ 잔차는 무작위 잡음(random noise)으로 간주할 수 있어야 한다.

만일 위의 조건들 중 하나라도 만족하지 못할 경우 회귀 분석의 결과는 신뢰성이 의심스럽게 되는 것이다. 많은 공학이나 이학 연구들에서 이러한 절차를 충분히

검토하지 않은 채 회귀분석이 이루어 지고 있다. 가장 빈번한 오류는 첫째와 둘째 사항을 지키지 않는 것이다. 첫째와 둘째 조건을 위반한 상태에서 상관 계수가 높다고 해서 무조건 채택하는 경우가 가장 빈번한 것으로 보인다.

이와 같은 관점에서 각 매개 변수들에 대해서 살펴 보기로 하자.

Muste (2001)가 정리한 약 20가지가 넘는 연구들 중에서 많은 수가 대수 법칙을 개수로 흐름 전체에 대해 적용한 것이다. 대수 법칙을 개수로 흐름 전체에 적용한 것은 Keulugan (1938)이 처음 시도한 것이다. 그는 개수로 흐름을 하나의 경계층 흐름으로 간주하였다. 이런 방법은 흐름 전체에 대한 적절한 유속 분포 공식이 없을 경우에 아직까지도 빈번히 이용되는 방법이다. Vanoni (1946)가 이 결과를 발표하였을 당시에는 후류 영역에 대한 개념이 존재하지 않았으며, 그는 당연히 대수 법칙을 수심 전체에 걸쳐 적용하였다. 그 결과는 Fig. 2에 보인 것과 같이 과대 추정을 하게 된다. 즉, 회귀 분석에 포함시켜서는 안 될 후류 영역의 자료를 모두 포함한 결과, 유속 분포의 기울기가 과대 추정되는 결과를 보인 것이다. Karman 수는 유속 분포의 기울기의 역수이므로, 결과적으로 Karman 수가 과소 추정되게 된다. 앞의 Fig. 1에서 제시된 자료를  $y/d < 0.2$ 인 3개의 자료만 이용하여 새로 Karman 수를 산정하면 Fig. 3에 보인 바와 같이 0.283이 된다. 이 값은 Vanoni and Nimocos (1960)가 추정한 값 0.219에 비해 약 30% 이상이나 큰 값이다. 다시 말하자면, Vanoni and Nimocos (1960)는 Karman 수의 감소량을 과대 추정한 것이다.

이런 문제는 초기 단계의 여러 연구들, 즉 Vanoni (1946), Einstein and Chien (1955), Vanoni and

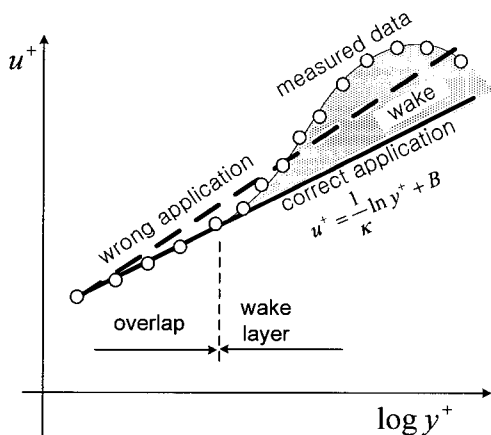


Fig. 2. Overshooting of Karman number in Vanoni (1946)'s study

Nomicos (1960), Elata and Ippen (1961) 등 거의 모든 연구에서 공통적으로 나타나는 문제들이다. Vanoni and Nomicos (1960)의 자료들 중에서 일부 자료들에 대해 Karman 수를 산정한 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 4열의 자료는 Vanoni and Nomicos (1960)의 원문에서 제시된 값들이며, 5열은 본 연구에서 내부 영역의 자료( $y/d < 0.2$ 인 자료점이 3개 이상 제시된 경우)만을 이용하여 재산정한 결과이다. 이 결과에서 유사 입자가 Karman 수를 감소시키는 경향을 확실히 알 수 있다. 그러나, Run No. 6의 경우 유사가 포함되지 않은 정수이기 때문에 Karman 수가 0.41 정도의 값이 계산되어야 한다. 그러나 주어진 자료를 이용하여 재산정한 결과 0.436과 같이 약간 큰 값이 나왔다. 이런 점에서 여전히 이들 측정 자료의 정확성은 그다지 높지 않다는 것도 알 수 있다. Vanoni (1946)의 자료를 이용한 결과는 정수 중에서도 Karman 수가 신뢰하기 힘든 값을 보였으며, Einstein and Chien (1955)의 자료는 내부 영역의 측정점 수가 작아서 Karman 수를 산정하기 곤란하였다.

Table 1. Re-evaluation of Karman numbers with Vanoni and Nomicos (1960)'s data

Run No.	Sed. Conc. (g/l)	Shear Vel. (ft/s)	Karman No.	
			Vanoni & Nomicos	Present
1	3.64	0.151	0.369	0.366
3	4.60	0.110	0.265	0.324
5	6.92	0.111	0.223	0.274
5A	8.08	0.109	0.219	0.283
6	0.00	0.136	0.384	0.436

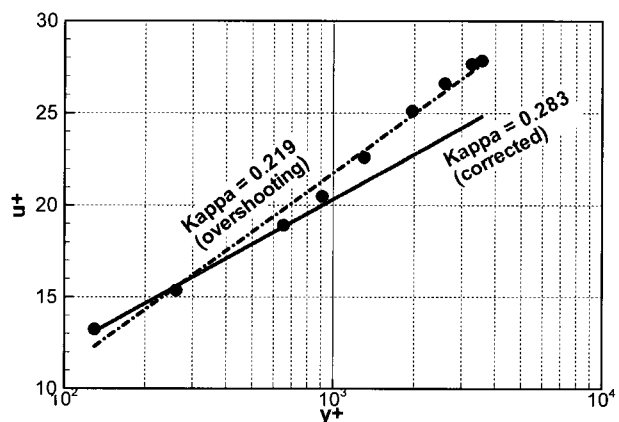


Fig. 3. Corrected Karman number for Vanoni and Nimocos (1960)'s data

두 번째, 문제는 회귀 분석에 이용된 자료의 문제이다. 앞서 언급한 바와 같이 대수 법칙은 큰  $y^+$  와 작은  $y/\delta$ 에 대해 적용할 수 있도록 유도되었다. 만일 자료의 범위가 이 공식의 유효 범위를 넘어간다면, 이런 자료를 이용하여 Karman 계수를 추정한다는 것은 불가능하다. 그런데, Muste (2001)에 제시된 많은 연구들이 이용한 자료는  $y/\delta$ 가 상당히 크며, 심지어는 이 값이 0.2 이하인 자료점이 하나도 없는 경우도 있다. 이 경우 산정된 Karman 수 값은 당연히 신뢰할 수 없게 된다.

한편, 'Karman 수는 일정하고, 후류 함수만 도입하면 유속 분포의 변동을 설명할 수 있다'고 한 Coleman (1981)의 이론은 이런 점에서 또 다른 허점을 보인 것이다. 그는 Karman 수를 산정할 때 Eq. (5)와 같은 유속 결손 법칙을 이용하였다. 이 경우 유속 결손 법칙의 적용성에 대한 검토가 먼저 필요하게 된다. 유속 결손 법칙은 대수 법칙이 후류 영역에 적용 가능하다는 가정에서, 최대 유속점에 대수 법칙을 적용하여 유도한 것이다. 따라서, 이 기본 전제가 문제가 있다면 당연히 유속 결손 법칙도 문제를 지니게 되는 것이다. Coleman (1981)의 논의는 이런 점이 간과된 것이다. 또한, 유속 결손 법칙은 Karman 수와 후류 계수라는 두 가지 매개 변수를 가지고 있다. 따라서 만일, Coleman 처럼 주장하려면 당연히 내부 영역에서 Karman 수를 추정하고 이 계수가 변화가 없음을 보인 뒤 후류 계수를 추정하여야 하는 것이다. 이런 점에서 Coleman (1981)도 Vanoni (1946)와 유사한 오류를 범한 것이다.

아울러 위의 자료들을 이용한 연구들 (Guo, 1998; Guo and Julien, 2001; Wang et al., 2001)들도 부분적으로 의심스러운 결론에 도달한 것으로 보인다.

본 연구에서는 Karman 수의 계산이 자료의 선택에

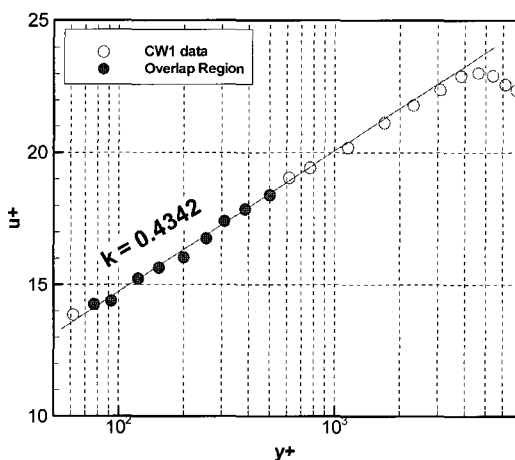


Fig. 4. Wang and Qian (1989)'s CW1 data applied to the log-law

얼마나 민감한가를 보이기 위해, 실측 자료를 이용하여 직접 추정해 보았다. 이용된 자료는 Wang and Qian (1989)의 CW1 자료이다. 이것은 유사도가 없는 깨끗한 물에 대해 측정된 유속 분포이다. Fig. 4는 이 자료에서  $70 \leq y^+ \leq 500$ 만을 이용했을 때 추정된 Karman 수로 0.4342의 값을 보인다. 이에 대해 Guo (1998)은  $\kappa = 0.419$ 와  $\Omega = 1.32$ 로 추정하였다. Guo의 계산에서  $u_* = 9.16$  cm/s,  $u_{max} = 2.11$  m/s,  $\delta = 6.36$  cm가 이용되었다 (원저에서는  $u_* = 7.71$  cm/s로 주어졌으나, Guo는 측벽 보정을 통해서 9.16 cm/s로 수정하였다). 이 자료에서 회귀 분석에 이용되는 자료점을 늘리거나 줄이면서 Karman 수의 값의 변화를 나타낸 것이 Fig. 5이다.  $x$ 축은 처음 자료점의  $y^+$ 이고,  $y$ 축은 마지막 자료점의  $y^+$ 이다. 예를 들어  $70 \leq y^+ \leq 500$ 의 자료점을 이용하였을 경우  $x$ 축은 70이고,  $y$ 축은 500이 되는 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시작점은 100~700이고, 끝점은 300~1,000일 경우에만 Karman 수의 값이 0.41~0.43의 범위가 계산됨을 알 수 있다. 그림의 오른쪽 아랫 부분은 시작점이 너무 큰 경우이며 이 경우 Karman 수의 값은 0.30 이하로 급격히 작아진다. 앞서 언급한 많은 연구들이 범한 오류가 이것이다. 즉, 외부 영역의 자료에서 Karman 수를 구할 경우 실제보다 상당히 작은 값들로 추정된다.

또 다른 예로, Guo (1998)는 Zagarola (1996)의 관수로 자료와 Guy et al. (1966), McQuivey (1973), Coleman (1981), Wang and Qian (1989), Kironoto (1993), Muste (1995)의 7개의 개수로 자료를 이용하였다. 그런데, 그 중 위의 자료 조건을 만족하는 것은 오직 Wang and Qian (1989)의 자료뿐이다.

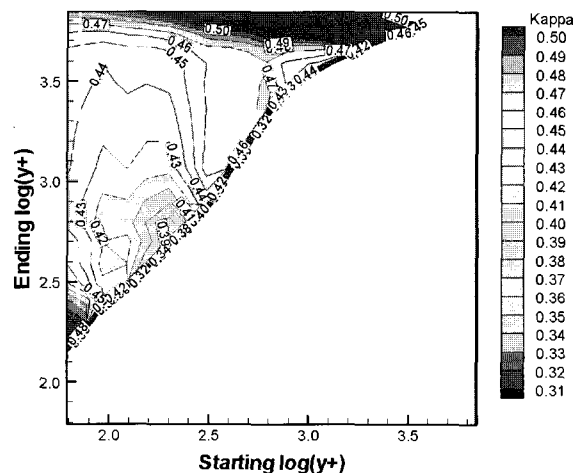


Fig. 5. Change of  $\kappa$  with the range of measurements considered in the regression

Karman 수의 변화에 대한 Coleman (1981)의 주장은 Karman 수 자체를 상수로 가정하고, 외부 영역에 대해 후류 함수를 도입한 것으로 유속 분포 변화를 나타낼 수 있다고 한 것이다. 다시 말하자면, 유사 입자에 의한 유속 분포 변화가 내부 영역이 아닌 외부 영역에서 생긴다는 의미이다. 그러나 실제에 있어 유사 입자 (특히 무거운 유사 입자)들은 하상 가까이에 밀집하게 되며, 후류 영역 보다는 내부 영역에 보다 큰 영향을 미친다. Yu (2004)의 측정 결과에서 나타난 바와 같이 실제 유속 분포의 변화가 내부 영역에 집중된다는 점에서 볼 때 Coleman (1981)의 주장은 신뢰하기 힘든 점이 있다.

이에 관련된 또 하나의 주장은 Kaftori et al. (1995, 1998)의 연구에서 수행한 것처럼 Karman 수를 상수로 가정하고 유속 분포의 변화가 마찰 속도의 변화 때문에 생긴다고 본 것이다. 이런 류의 연구에는 Muste and Patel (1997), Cellino (1998)의 연구들이 있다. 그러나, 이 역시 Yu (2004)의 연구의 실측 자료에 따르면 유사 입자는 마찰 속도의 변화가 아닌 Karman 수의 변화를 일으키는 것으로 나타났다.

이외에 Nouh (1989)의 연구는 Karman 수를 구하기 위해 2개의 자료점을 이용하였는데, 이렇게 할 경우 실제 산정된 Karman 수의 값이 자료점의 선택에 매우 민감하게 되므로, 산정된 값을 신뢰하기 힘들게 된다.

## 2.4 유사를 포함한 흐름의 유속 분포 측정

유사를 포함한 흐름을 내부 영역을 포함하여 측정된 연구는 매우 드물다. 기존의 연구로는 Kaftori et al. (1995, 1998), Kiger and Pan (2002), Righetti and Romano (2004), Yu (2004) 등이 있다. 이들 중 Kaftori et al. (1995, 1998)의 연구는 Karman 수는 상수이고 유사 입자가 마찰 속도를 변화시킨다고 가정하였다. 또한 Kiger and Pan (2002)과 Righetti and Romano (2004)의 연구는 유사 입자가 난류 강도에 미치는 영향에 대

해 주안을 두고 있으며, Karman 수의 변화에 대해서는 뚜렷한 결론을 제시하지 않고 있다. 위의 연구들 중 하나인 Yu (2004)에 의한 유사 흐름의 측정 결과(Table 2)는 유사 농도의 변화에 따라 다음과 같이  $\kappa$  값이 변화함을 보여 주고 있다.

## 2.5 유속 분포 변화의 기구

유사 입자에 의해 난류의 유속이 변화하는 기구 (mechanism)는 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다. Yu (2004)의 연구에서 제시한 바와 같이 (Fig. 6 참조) 유사 입자의 속도가 하상에서 떨어진 외부 영역에서는 물보다 느리지만, 하상 가까이에서는 오히려 물보다 빠르다는 것이다. 이것은 하상 가까운 영역의 완충영역이나 중부 영역에서는 유속 분포의 기울기가 급해진다는 것을 의미한다. 이 때문에 유속 분포의 기울기는 급하게 되고, Karman 상수의 값은 줄어들게 된다. Righetti and Romano (2004)의 측정에서도 물과 유사 입자의 속도 분포는 비슷한 결과를 제시한 바 있다.

## 2.6 유사 입자에 의한 유속 분포의 변화

이와 같이 기존의 연구들에 대한 재평가와 새로운 실측 자료들에 근거하여 해석하자면, 유사 입자가 유속 분포에 미치는 영향을 다음과 같이 요약될 수 있을 것이다.

일단, 매끄러운 하상 위를 흐르는 난류 중에 유사 입자를 투입하면 유사 입자에 의해 외부 영역의 유속은 느려지고 내부 영역의 유속은 빨라지는 경향이 있다. 이것은 외부 영역에서는 유사 입자에 의해 속도 지체 (velocity lag)가 생기고, 내부 영역에서는 점성이 없는 유사 입자가 오히려 물보다 빨리 움직여서 유속을 다소간 증가시키는 역할을 하게 된다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 7과 같다. 즉, 유사가 없는 물에 비해 유속 분포의 기울기가 급해지게 된다. 이것이 Karman 수의 감

Table 2. Flow parameters of water-sediment mixture (Yu, 2004)

Runs		CW1	NS1	NS2	NS3
Sed. conc. ( $\times 10^{-3}$ )		0.00	0.46	0.92	1.62
Reynolds no.		17,670	17,650	17,420	17,340
Froude no.		1.89	1.81	1.76	1.75
Velocity gradient		0.104	0.107	0.110	0.117
Friction velocity $u_*$ (m/s)		0.042	0.042	0.043	0.043
Karman no. $\kappa$		0.402	0.396	0.389	0.367
Integral const. $B$		5.50	5.03	4.37	3.39
Mean velocity (m/s)	$\bar{U}$	0.839	0.813	0.796	0.792
	$\bar{V}$	0.000	-0.001	0.001	0.000

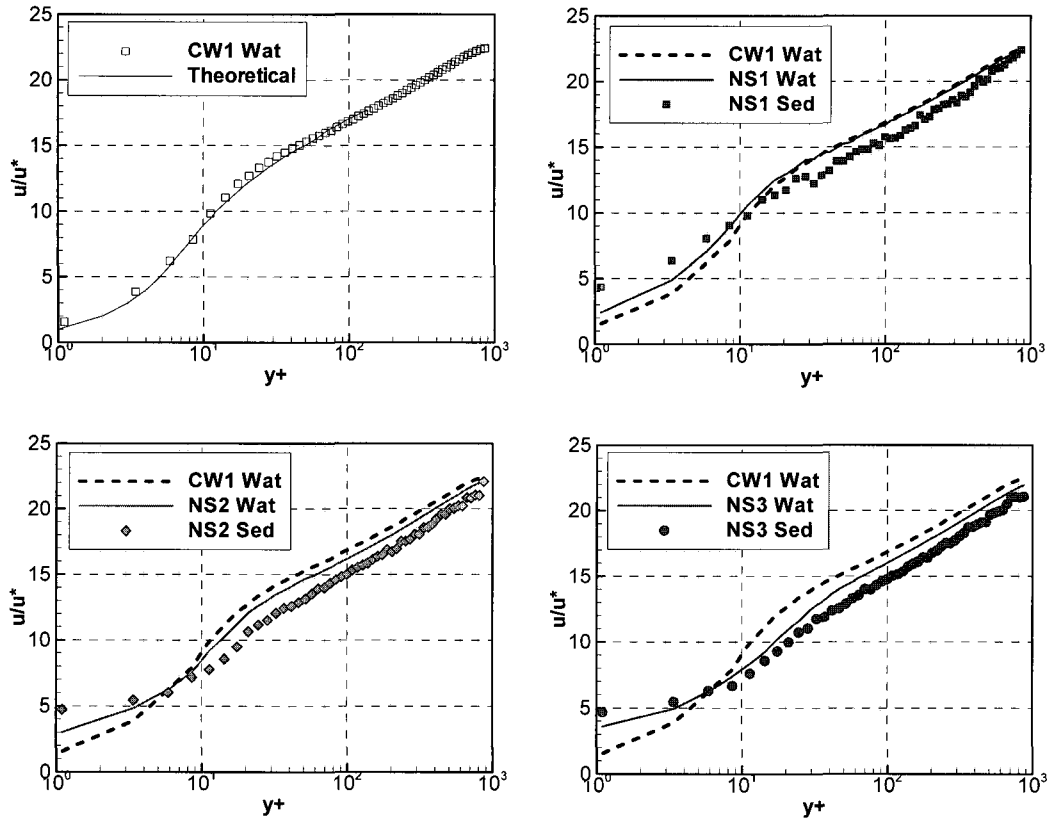


Fig. 6. Velocity profiles of water and sediment in sediment-laden flows (Yu, 2004)

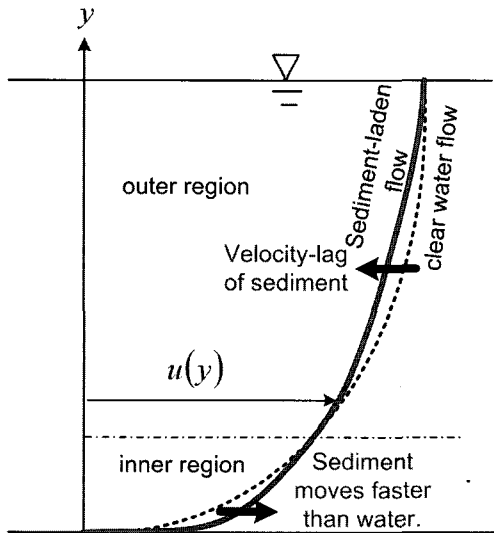


Fig. 7. Concept of velocity profile change due to introduction of sediment particles

소로 나타나게 된다. 그러나, 그 감소량은 Vanoni (1946)나 Einstein and Chien (1955)이 제시한 감소량에 비해서는 현저히 작은 것으로 보인다.

한편, Einstein and Chien (1955)는 Karman 수의 변화를 Richardson 수의 함수로 표현한 바 있다. 그러나

앞서 지적한 바와 같이 이들의 연구에서 산정한 Karman 수의 값은 신뢰하기 힘든 면이 있으며, 이런 점에서 Richardson 수의 함수로 나타내는 것도 어려운 것으로 보인다. 아울러, 현재까지는 유사 흐름에서 내부 영역을 포함하여 유속 분포를 측정하여 제시한 자료가 그리 많지 않기 때문에 Einstein and Chien (1955)과 같이 Karman 수의 변화를 Richardson 수나 다른 매개변수의 함수로 나타내기는 어려울 것이다. 그러나, 앞서 제시한 유속 변화의 기구를 고려한다면 다음과 같은 변수들을 이용하여 Karman 수의 변화를 나타내는 것이 가능할 것이다. 첫째는 유사의 농도이다. 유사 입자는 유속과 비교해 속도 지체 (외부 영역)와 속도 증가 (내부 영역)가 생기므로 유사 농도가 높을수록 유사 속도가 유속을 변화시킬 가능성이 커진다. 둘째는 유사 농도 분포이다. 이것은 무거운 유사일수록 바닥쪽으로 치우쳐 분포하며 이에 따라 유속에 미치는 영향이 유사 무게에 따라 달라지게 되기 때문이다. 따라서 이와 같이 유사의 평균 농도와 유사의 입경 (다른 표현으로는 유사의 중량)이 Karman 수의 변화와 직접적인 함수 관계를 갖게 될 것임을 시사한다. 다만, 현재까지 측정된 자료만으로는 확실한 함수 관계를 유도하기 곤란한 면이 있다.

### 3. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 매끄러운 하상 위를 흐르는 개수로 난류에 투입된 유사 입자가 유속 분포에 미치는 영향에 대해 수행한 많은 연구들 중 상당수가 회귀 분석 상의 오류, 기본 가정의 오류 등을 지니고 있는 것으로 보인다.
2. 아울러, 매끄러운 하상 위를 흐르는 개수로 난류에 유사 입자를 투입하면 Karman 수가 감소한다. 그러나 그 감소량은 기존의 연구에서 제시된 값에 비해 현저히 작다.
3. 유사 입자가 Karman 수를 감소시키는 기구는 유사 입자가 외부 영역에서는 속도 지체를 일으키고 내부 영역에서는 유속을 증가시켜 유속 분포의 기울기를 증가시키기 때문인 것으로 해석할 수 있다.
4. 유사 입자에 의한 Karman 수의 감소는 유사의 평균 농도와 유사의 입경의 함수로 제시될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-2)에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- Best, J., Bennett, S., Bridge, J. S., and Leeder, M. (1997). "Turbulence modulation and particle velocities over flat sand beds at low transport rates." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(12), pp. 1118-1129.
- Cellino, M. (1998). *Experimental study of suspension flow in open channels*, Ph. D. dissertation, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Coleman, N. L. (1981). "Velocity profiles with suspended sediment." *J. of Hydraulic Research*, 19(3), pp. 211-229.
- Coles, D. (1956). "The law of the wake in the turbulent boundary layer." *J. of Fluid Mechanics*, 1, pp. 191-226.
- Einstein, H. A., and Chien, N. (1955). *Effect of heavy sediment concentration near the bed on the velocity and sediment distribution*. Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley, CA.
- Elata, C., and Ippen, A. T. (1961). *The dynamics of open channel flow with suspensions of neutrally buoyant particles*. Technical Report No. 45, Hydrodynamics Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- Guo, J. (1998). *Turbulent velocity profiles in clear water and sediment-laden flows*, Ph.D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Guo, J., and Julien, P. Y. (2001). "Turbulence velocity profiles in sediment-laden flows." *J. of Hydraulic Research*, 39(1), pp. 11-23.
- Gust, G., and Southard, J. B. (1983). "Effects of weak bed load on the universal law of the wall." *J. of Geophysical Research*, 88(C10), pp. 5939-5952.
- Guy, H. P., Simons, D. B., and Richardson, E. V. (1966). *Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-1961*. Professional Paper 462-I, U.S. Geological Survey.
- Itakura, T., and Kishi, T. (1980). "Open channel flow with suspended sediments." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 106(8), pp. 1325-1343.
- Kaftori, D., Hetsroni, G., and Banerjee, S. (1995). "Particle behavior in the turbulent boundary layer. II. Velocity and distribution profiles." *Physics of Fluids*, 7(5), pp. 1107-1121.
- Kaftori, D., Hetsroni, G., and Banerjee, S. (1998). "The effect of particles on wall turbulence." *Int. J. of Multiphase Flow*, 24(3), pp. 359-386.
- Keulegan, G. H. (1938). "Laws of turbulent flow in open channels", *J. Research*, National Bureau of Standards, 42(1), pp. 1-17.
- 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), pp. 1-17.
- Kironoto, B. A. (1993). *Turbulence characteristics of uniform and non-uniform, rough open-channel flow*, Ph. D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Kundu, P. K. (1990). *Fluid mechanics*, Academic Press.
- Lyn, D. A. (1986). *Turbulence and turbulent transport in sediment-laden open-channel flows*. Report



- No. KH-R-49, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- McQuivey, R. S. (1973). *Summary of turbulence data from rivers, conveyance channels, and laboratory flumes*. Geological Survey Professional Paper 802-B, U.S. Geological Survey.
- Muste, M. (1995). *Particle and liquid velocity measurements in sediment-laden flows with a discriminator laser-doppler velocimeter*, Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Iowa, Iowa City, IA.
- Muste, M. (2001). "Source of bias errors in flume experiments on suspended-sediment transport." *J. of Hydraulic Research*, 40(6), pp. 695-708.
- Muste, M., and Partel, V. C. (1997). "Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(9), pp. 742-751.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, A.A. Balkema.
- Nouh, M. (1989). "The von Karman coefficient in sediment-laden flow." *J. of Hydraulic Research*, 27(4), pp. 477-499.
- Righetti, M., and Romano, G. P. (2004). "Particle-fluid interactions in a plane near-wall turbulent flow", *J. of Fluid Mechanics*, vol. 505, pp. 93-121.
- Umeyama, M., and Gerritsen, F. (1992). "Velocity distribution in uniform sediment-laden flow." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(2), pp. 229-245.
- Vanoni, V. A. (1946). "Transportation of suspended sediment by running water." *Trans. of ASCE*, 111, pp. 67-133.
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation engineering*, ASCE.
- Vanoni, V. A., and Nomicos, G. N. (1960). "Resistance properties of sediment-laden streams." *Trans. of ASCE*, 125, pp. 1140-1164.
- Wang, X., and Qian, N. (1989). "Turbulence characteristics of sediment-laden flows." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 115(6), pp. 781-799.
- Wang, X., Wang, Z.-Y., Yu, M., and Li, D. (2001). "Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law." *Journal of Hydraulic Research*, 39(2), pp. 211-217.
- 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.
- Zagarola, M. V. (1996). *Mean-flow scaling of turbulent pipe flow*, Ph.D. dissertation, Princeton Univ., Princeton, NJ.

(논문번호:06-55/접수:2006.05.22/심사완료:2006.08.02)