

환형수조에서 흐름특성에 관한 실험적 연구

최인호·김종우[†]

서일대학교 토목공학과

An Experimental Study on Flow Characteristics in the Open Annular Flume

In Ho Choi·Jong Woo Kim[†]

Department of Civil Engineering, Seoil University, Seoul, Korea

(Received : 19 June 2019, Revised: 25 July 2019, Accepted: 25 July 2019)

요약

본 실험연구는 자유수면을 이루는 환형수조에서 초음파 유속계를 이용하여 흐름특성을 분석하였다. 여기서 점착성 유사의 응집을 방해하지 않도록 설계된 실린더의 회전에 따라 흐름이 형성되도록 하였다. 종방향 유속에 대한 내부 실린더의 영향은 이동 경계 근처에서 가장 높았고 외측 벽쪽으로는 감소했다. 종방향 저유속에서 난류 운동에너지는 바닥근처 지점에서 가장 크게 나타났지만 종방향 유속이 증가함에 따라 위쪽으로 이동하였다. 멱법칙으로 산정된 종방향 유속은 바닥 마찰길을 고려한 대수분포형태인 로그법칙으로 예측한 값보다 실측치와 잘 일치하였다. 레이놀즈 응력 방법으로 산정한 평균마찰속도는 종방향 유속이 증가할 때 로그법칙과 멱법칙으로 계산된 값보다 작게 나타났다.

핵심용어 : 환형수조, 마찰속도, 점착성 유사, 레이놀즈 응력

Abstract

This study investigated the flow characteristics in an annular flume with a free water surface using the Acoustic Doppler Velocimeter(ADV) in the laboratory. The flow was driven by the rotation of the inner cylinder in a way designed not to interfere with flocculation of cohesive sediments. The effect of the inner cylinder for the longitudinal velocities showed highest near the moving boundary and decreased towards the outer wall. At the lower longitudinal velocity, there was a peak in turbulent kinetic energy near the bed, whereas it moved upward to with increasing of the velocity. The longitudinal velocities estimated using the power law were in good agreement with the measured values than the values predicted by the log-law with roughness lengths. The average friction velocities evaluated by Reynolds shear stress were smaller than the values calculated using the log-law and power law when increasing the longitudinal velocity.

Key words : Annular flume, Friction velocity, Cohesive sediments, Reynolds stress

1. 서 론

환형수조는 점착성 유사의 침식, 이송, 퇴적거동을 연구하기 위해 주로 사용한다(Krishnappan, 1993; Johansen, 1998). 점착성 유사는 플럭(floc)과 응집 또는 침전을 통해 수생태계에 서 먹이사슬형성에 악영향을 미치며, 탁도를 야기시켜 수중에 빛이 차단되므로 식물성 플랑크톤의 광합성 작용을 방해하는 등 다양한 환경 변화를 초래하는 것으로 알려져 있다. 또한 하천, 저수지, 항만, 하구 등의 지형변화에 직접적으로 영향을 주는 요소이므로 점착성 유사 농도의 시공간적 분포를 파악하는 것은 중요하다. 점착성 유사의 이송과 확산은 다양한 물리-화학적 요인의 영향을 받으므로 그 특성을 이해하기가 복잡하다.

실제 관측을 통해 정확하게 파악하기는 현실적으로 어렵기 때문에 많은 연구가 실내 실험으로 점착성 유사의 이송과 확산에 관한 분석이 이루어지고 있다.

지난 수십 년 동안 많은 학자들은 점착성 유사의 침식, 이송과 퇴적 현상을 다양한 방법으로 연구하였다. 점착성 유사는 이온성분을 띠므로 시공간적으로 미세 입자간의 결합상태인 플럭(floc) 또는 응집이 일어나며, 난류에 의해 쉽게 분리된다(Van Leussen, 1994). 플럭은 직선수조(straight flume)의 재순환 펌프 영향으로 쉽게 파괴된다(Krishnappan, 2004). 이러한 단점을 보완하기 위해 환형수조가 고안되었으며, 흐름이 순환하는 원형형태 수로모양을 이룬다(Krishnappan and Engel, 2004; Neumeier, et al., 2006; Skulovich, et al., 2018). 흐름은 수면에 밀착된 링의 회전으로 발생되며, 무한한 흐름 경로를 제공하고 응집을 방해하지 않도록 특별히 설계되었다(Parchure and Mehta, 1985; Spork, 1997). Krishnappan

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Seoil University, Seoul, Korea
E-mail: jwkim@seoil.ac.kr

(1993)와 Gharabaghi et al.(2007)은 환형의 상부 판(상부 링)이 회전하는 환형수조 내 흐름장을 연구하였다. Booij(1994)는 환형수조의 곡률에 의해 2차 순환류가 발생한다는 사실을 밝혀냈으며 플러의 침강속도에 비해 그 속도가 작지 않을 것으로 예상하였다.

하지만 기존의 환형수조는 흐름을 발생시키는 상부 링 때문에 자유수면이 크게 제한 받으며, 환형수조 내에 측정장치를 설치하는데 어려움이 있다(Hillebrand, 2008; Choi and Kim, 2014). Choi and Kim(2017, 2018)은 자유수면이 존재하는 소형 환형수조에서 점착성 유사의 플러 밀도와 침강에 관한 연구를 한 바가 있었지만 좀 더 큰 환형수조를 통한 실험의 필요성을 인지하였다.

즉 본 연구는 이러한 단점을 보완하고자 국내에서 최초로 상부 링 대신 회전체 실린더를 설치한 환형수조를 제작하여 흐름특성을 분석하였다. 흐름은 환형수조 내 중앙에 설치된 실린더 회전으로 형성된다. 초음파 유속계(ADV)를 이용하여 종방향 유속, 횡방향 유속, 연직방향 유속, 난류 운동에너지, 바닥 전단응력 등을 분석하였다. 종방향 유속은 로그법칙 형태인 대수분포식과 멱함수에 따른 산정 값과 비교하였다. 마찰속도는 로그법칙과 멱법칙을 사용하여 바닥전단응력을 산정하였고 레이놀즈 전단응력방법과 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 유속분포

난류의 연직 유속분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 로그법칙(log-law) 형태인 대수분포식이라고 한다(Von Kármán, 1930).

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) + C_1 \tag{1}$$

여기서 u_* ($= \sqrt{\tau/\rho_w}$)는 마찰속도, ρ_w 는 유체 밀도, y 는 하상으로부터 수심, u 는 y 지점 유속, k 는 Kármán 상수(≈ 0.41), ν 는 동점성 계수, C_1 는 적분상수(≈ 5.5)이다.

연직 유속분포 식(1)은 식(2)와 같이 변경하여 나타낼 수 있다(Schlichting and Gersten, 2000).

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \tag{2}$$

여기서 y_0 는 바닥 마찰길이(roughness length)이다. 로그분포는 $y \gg y_0$ 에서 유효하게 적용될 수 있다.

식 (2)의 바닥 마찰길이(y_0)는 매끈한 벽(smooth wall)의 완난류이면 식 (3)으로 표현하며, 거친 벽(rough wall)의 전 난류이면 식 (4)로 제안하였다(Mohrig, 2004; Whipple, 2004).

$$y_0 = \frac{\nu}{9u_*} \tag{3}$$

$$y_0 = \frac{k_s}{30} \tag{4}$$

여기서 k_s 는 등가조고이다.

또 다른 쉽게 적용할 수 있도록 제시된 경험공식으로 연직 유속분포는 식 (5)와 같이 멱법칙(power law)으로도 표현할 수 있다.

$$\frac{u}{u_*} = \alpha \left(\frac{u_* y}{\nu}\right)^\beta \tag{5}$$

여기서 α 는 멱함수 계수, β 는 멱함수 지수이다. α 와 β 는 실험을 통해 결정된다. Barenblatt et al. (1997)는 멱법칙을 압력경사와 높은 레이놀즈 수에 제한 없이 적용할 수 있음을 증명하였다.

2.2 전단응력

난류 흐름의 바닥전단응력을 산정하는 방법은 레이놀즈 전단응력(Reynolds shear stress) 방법, 대수법칙, 멱법칙 등이 있다.

레이놀즈 전단응력 연직분포를 고려한 바닥전단응력(bed shear stress)은 다음 식 (6)과 같이 추정할 수 있다(Duan, 2009).

$$\tau_b = \sqrt{(-\overline{u'w'})^2 + (-\overline{v'w'})^2} \tag{6}$$

여기서 u', v', w' 는 각각 x축, y축, z축 방향 유속변동 값이다. 본 연구는 SonTek의 초음파 유속계(ADV)를 이용하여 각 지점마다 측정된 유속 값에 대해 분석하였다.

2.3 실험조건

아크릴판으로 제작된 환형수조 높이(H)는 600 mm, 두께는 8 mm, 직경(D₁)은 1,100 mm이다. 본 연구에서 환형수조의 수심(h)은 200 mm이다. 수조의 중앙에 스테인리스 강판으로 만들어진 회전체 실린더를 설치하였고 외측 벽과 내측 회전체 사이로 흐름을 발생시켰다. 회전체 실린더 직경(D₂)은 400 mm이다. 내측 벽과 외측 벽 사이 통수폭(b)은 350 mm이다. 초음파 유속계(ADV)를 통수폭 사이에 좌·우와 상·하로 이동할 수 있게 설치하였다(Fig.1). ADV는 유속에 대해 가장 높은 정확도를 센서 끝단 중심부로부터 5 cm 떨어진 지점에서 보이므로 이를 고려하였다. ADV는 외측 벽으로부터 횡방향 50 ~ 300 mm까지 이동할 수 있으며, 연직방향 측정 범위를 수로바닥으로부터 2 ~ 140 mm 구간으로 설정하였다. 유속분포를 고려하여 각 지점마다 16 Hz의 주파수로 샘플링을 하여 약 200 ~ 500 개의 유속측정 값을 수집하였다. 횡방향(y축)으로는 y = 0 ~ 350 mm 구간에서 6개 지점, 연직방향(z축)으로는 z = 2 ~ 140 mm 구간에서 11개 지점을 유속측정 지점으로 채택하였다.

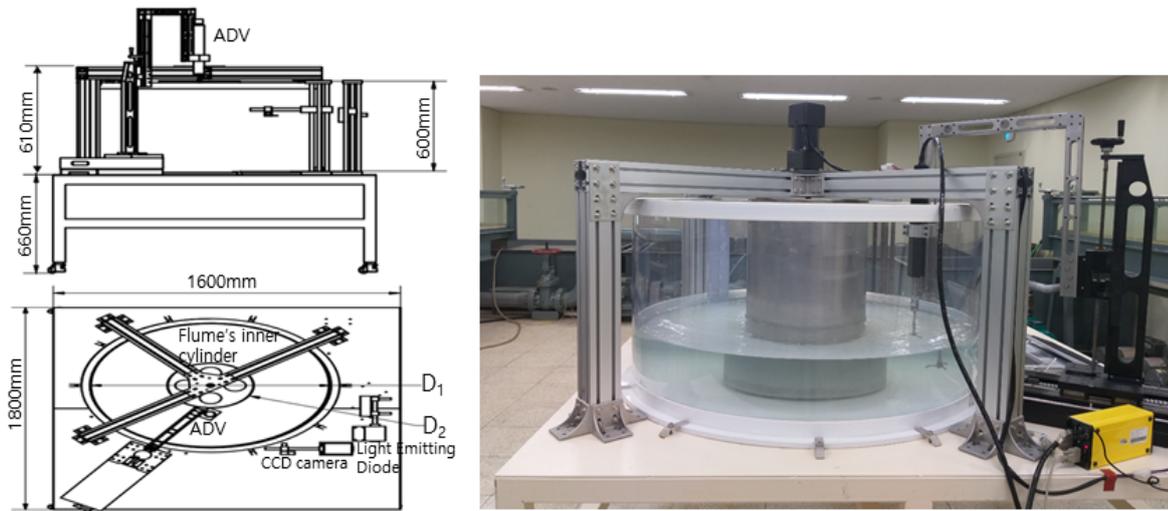


Fig. 1. Schematic and photographs of the experimental setup.

3. 실험결과

3.1 유속분포

Fig. 2는 환형수조 바닥으로부터 0.2 cm와 0.5 cm 지점에서 기준속도($u_{ref} = \pi D_2$) 증가에 따른 환형수조의 종방향 유속분포를 보여준다. 환형수조의 수심(h)은 200 mm이다. 종방향 유속은 외측 벽으로부터 횡방향 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm 지점에서 측정하였다.

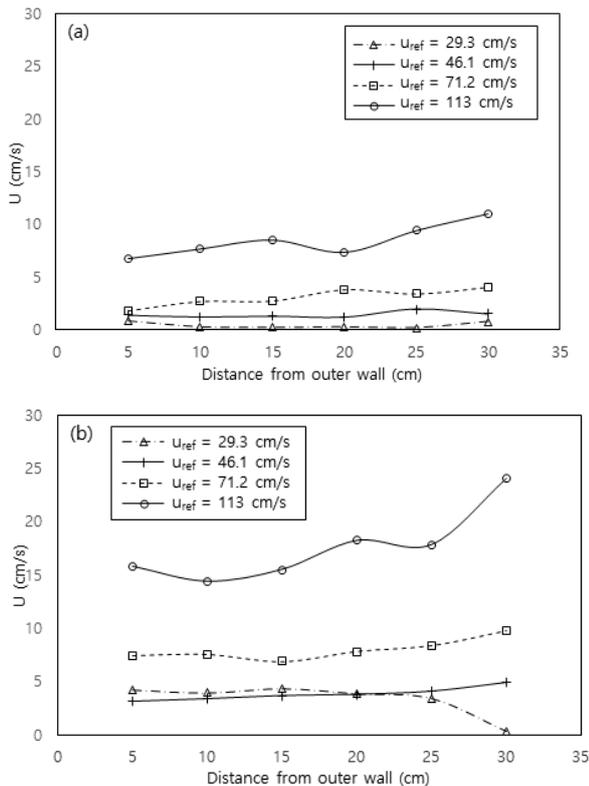


Fig. 2. Measured velocity profiles achieved (a) 0.2 cm and (b) 0.5 cm above annular flume bottom.

회전체 실린더는 저면에서 기준속도가 증가함에도 불구하고 종방향 유속에 대해 그 영향이 크지 않았다(Fig. 2). 기준속도 (u_{ref}) 113 cm/s 조건일 때 종방향 유속은 중앙지점에서는 일정한 분포를 나타내지만 회전체 실린더 측벽 이동 경계에 근접할수록 높아진다. 회전체 실린더 측벽 근처 30 cm 지점을 제외하면 종방향 유속에 대한 실린더 회전의 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 외측 벽 마찰력은 횡방향 5 cm 지점 종방향 유속에 대한 영향이 미미함을 나타낸다(Fig. 2).

Fig. 3과 같이 종방향 유속은 기준속도와 수심비(relative depth) 변화에 따라 측정하였다. 환형수조의 수심(h)은 200 mm이다. 기준속도(u_{ref}) 29.3 cm/s 상황에서는 종방향 유속에 대한 외측 벽과 내측 실린더 영향이 미미하지만(Fig. 3(a)), 기준속도(u_{ref}) 71.2 cm/s 조건에서 종방향 유속은 수심비(z/h) 0.01($z = 2$ mm)과 0.025($z = 5$ mm) 지점을 제외하고 내측

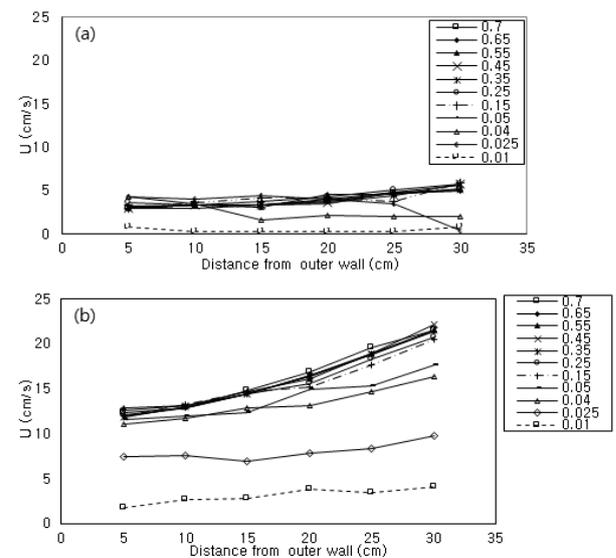


Fig. 3. Measured velocity profiles in the annular flume at (a) $u_{ref} = 29.3$ cm/s and (b) $u_{ref} = 71.2$ cm/s. Relative depths are given by the numbers in the legend.

실린더의 영향을 받는 것을 볼 수 있다(Fig. 3(b)). 각 지점 유속은 내측 실린더에 접하는 이동 경계 근처에서 가장 높고 외측 벽으로 갈수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 Hillebrand(2008)에 의해 제시된 환형수조($D_1 = 1,200$ mm, $D_2 = 450$ mm, $h = 280$ mm, $b = 375$ mm)에서 실시한 연구결과와 동일한 경향을 보였다.

Fig. 4(a)는 기준속도(u_{ref}) 29.3 cm/s 조건과 외측 벽으로부터 6개 지점(5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm)에서 종방향 유속을 측정하였다. 또한 동일한 지점에서 각각 횡방향 유속을 측정하였다. 외측 벽과 내측 벽 실린더 지점에서 종방향 유속은 약간 차이점을 볼 수 있었다. Fig. 4(b)와 같이 횡방향 흐름은 바닥으로부터 수심 10 cm까지 외측 벽(outer wall)에서부터 내측 벽(inner wall)인 실린더 회전체 방향을 나타내며, 수심 11 cm보다 높은 곳에서는 서서히 흐름방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 저유속에서 2차 순환류(secondary flow)가 약하게 형성됨을 볼 수 있다. ADV는 센서 끝단 중심부로부터 5 cm 떨어진 지점에서 유속에 대해 가장 높은 정확도를 보이므로 수심 14 cm 이상에서는 유속을 측정하지 못했다.

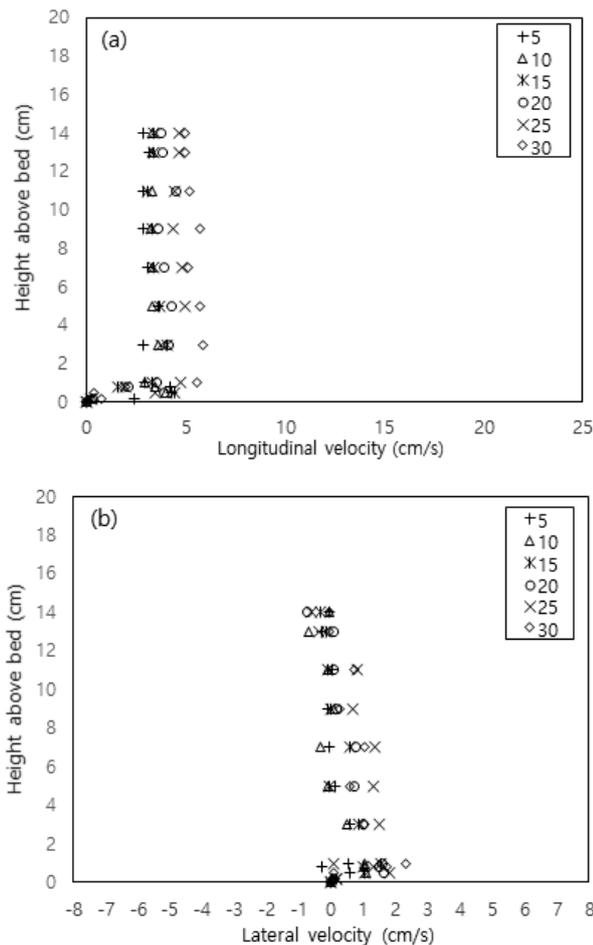


Fig. 4. (a) Longitudinal and (b) lateral velocities in the annular flume at $u_{ref} = 29.3$ cm/s. Distances from the outer cylinder (in cm) along the flume cross-section are given by the numbers in the legend.

Fig. 5는 기준속도(u_{ref}) 71.2 cm/s 조건과 외벽으로부터 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm 지점에서 종방향 유속과 횡방향 유속을 나타낸다. 증간된 종방향 유속은 내측 벽 실린더 마찰력에 영향을 받으며, 실린더 내측 벽에 가까울수록 그 영향이 증가하였다(Fig. 5(a)). Fig. 5(b)와 같이 환형수조 바닥의 횡방향 흐름이 외측 벽에서 내측 벽 실린더 회전체 방향으로 형성되었다가 수면으로 갈수록 방향이 바뀌는 경향을 나타낸다. 이와 같이 2차 순환류(secondary flow)가 형성됨을 볼 수 있다. 2차 순환류는 일반적으로 응집 침전물의 침강속도에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며, 침착성 유사체의 침식, 응집, 퇴적물의 이동역학에 대한 그 영향 정도에 관한 연구가 필요하다.

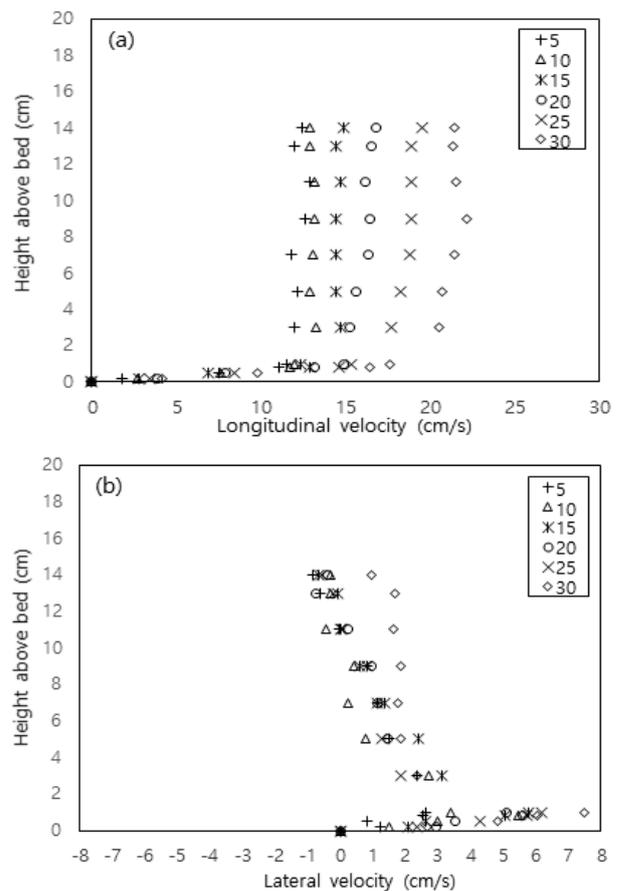


Fig. 5. (a) Longitudinal and (b) lateral velocities in the annular flume at $u_{ref} = 71.2$ cm/s. Distances from the outer cylinder (in cm) along the flume cross-section are given by the numbers in the legend.

4.2 유속분포 비교와 난류 운동에너지

Fig. 6은 바닥 마찰길이(y_0)를 고려한 대수분포 식 (2)와 멱함수에 따른 예측된 종방향 유속과 실제 종방향 유속을 비교한 그래프이다. 종방향 유속은 외측 벽으로부터 횡방향 15 cm와 17.5 cm 지점에서 측정하였다. 종방향 유속은 거친 벽(rough wall)의 등가조고(k_s)가 1 mm와 2.5 mm일 때와 매끄러운 벽(smooth wall) 조건에서 대수분포(로그법칙)를 사용하

여 산정하였다. 경계레이놀즈수($u_* \cdot k_s/\nu$)는 2 ~ 25 범위이며, 평균마찰속도를 사용하였다. 또한 종방향 유속은 α 와 β 의 값을 적용하여 멱함수로 산정하였다. 멱함수로 산정된 종방향 유속은 바닥 마찰길이를 고려한 대수법칙으로 예측한 값보다 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. α 와 β 값은 종방향 유속 5 cm/s 이하에서 각각 7과 0.13(이점쇄선), 5 ~ 20 cm/s 범위 내에서 각각 9와 0.14(일점쇄선), 20 cm/s 이상에서 각각 22와 0.04(굵은 점선) 조건일때 실측치와 잘 일치하였다(Fig. 6).

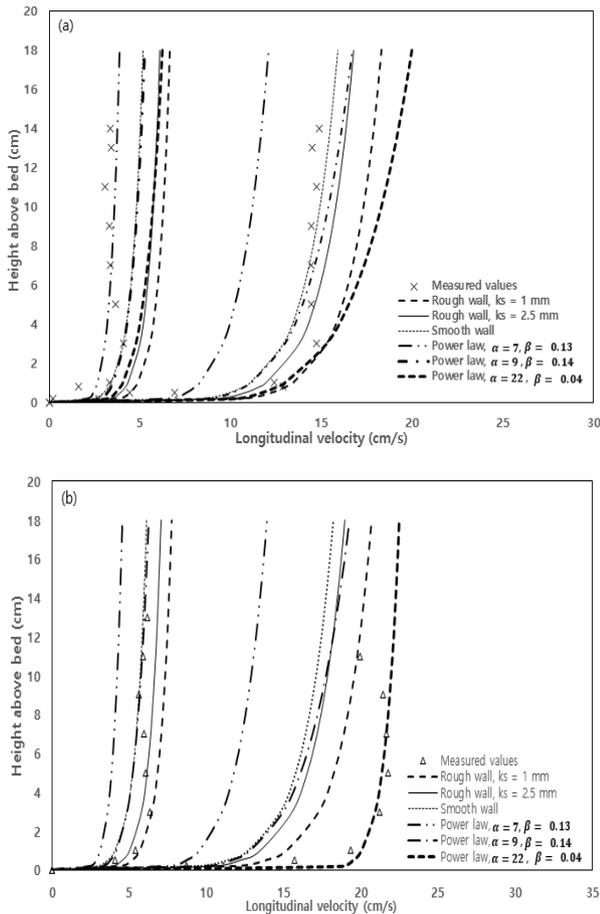


Fig. 6. Longitudinal velocities at (a) 15 cm and (b) 17.5 cm from the outer wall along the flume cross-section for different wall law formulations using the averaged friction velocity.

난류 운동에너지($TKE=0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$)는 유속변동(fluctuation of velocity)으로 산정하여 분석하였다. Fig. 7은 기준속도(u_{ref}) 변화와 수심비(z/h)에 따른 난류 운동에너지를 나타낸 것이다. 기준속도(u_{ref}) 29.3 cm/s 상황에서 난류 운동에너지는 바닥으로부터 5 mm 지점($z/h = 0.025$)에서 급격하게 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 기준속도(u_{ref}) 71.2 cm/s일 때 난류 운동에너지는 수심비(z/h) 0.25 지점에서 최대값이 발생하였다. 난류 운동에너지는 회전체의 기준속도가 증가함에 따라 증가하였으며 최대값 발생지점도 수심비(z/h) 0.025 지점으로 변화하는 경향을 보인다. 유속이 증가함에 따라 점성보다 관성이 흐름을 지배함을 알 수 있었다.

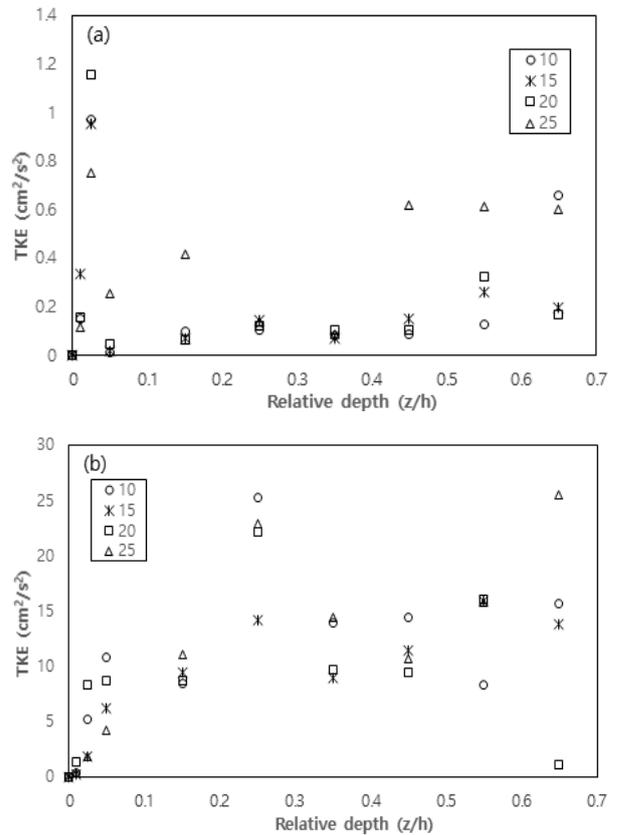


Fig. 7. Distribution of total turbulent kinetic energy along water depth in the annular flume at (a) $u_{ref} = 29.3$ cm/s and (b) $u_{ref} = 71.2$ cm/s. Distances from the outer cylinder(in cm) along the flume cross-section are given by the numbers in the legend.

4.3 마찰속도

마찰속도와 바닥전단응력은 외측 벽으로부터 횡방향(y축) 10 cm, 15 cm, 20 cm 지점에서 레이놀즈 전단응력, 로그법칙(log-law)인 식(1)과 멱법칙(power law)으로 산정하였다(Fig. 8). Fig. 8에 나타난 바와 같이 저유속(S1 ~ S6)에서 \overline{u}_{*r} , \overline{u}_{*l} 와 \overline{u}_{*p} 의 차이는 비교적 크지 않은 것을 확인할 수 있지만 유속이 증가된 S7, S8, S9에서 \overline{u}_{*r} 가 다른 두 개의 법칙으로 산정한 값보다 작게 나타남을 알 수 있다.

즉 로그법칙(log-law)과 멱법칙으로 산정한 마찰속도 값이 레이놀즈 전단응력 방법에 의해 산정한 값보다 높게 나타났다. 마찰속도는 환형수조 바닥에 인접한 구간에서 점성력으로 인해 급격히 감소하는 경향을 보인다. 바닥근처에서 마찰속도의 연직분포 양상이 복잡해지고 수면 측과 바닥 측의 경향이 상이하게 나타났다.

평균마찰속도와 평균바닥전단응력을 산정하여 비교한 결과는 Table 1과 같다. 레이놀즈 전단응력의 연직분포를 이용하여 산정한 평균마찰속도 값이 저유속(S1 ~ S6)에서 로그법칙과 멱법칙으로 산정한 값보다 크지 않았으며 대부분 비슷한 결과 값을 확인할 수 있다. 하지만 유속이 증가한 S7, S8, S9에서 로그법칙은 레이놀즈 전단응력 방법에 의해 계산된 값보다 20 ~ 41% 정도 크게 나타남을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 로그법칙이

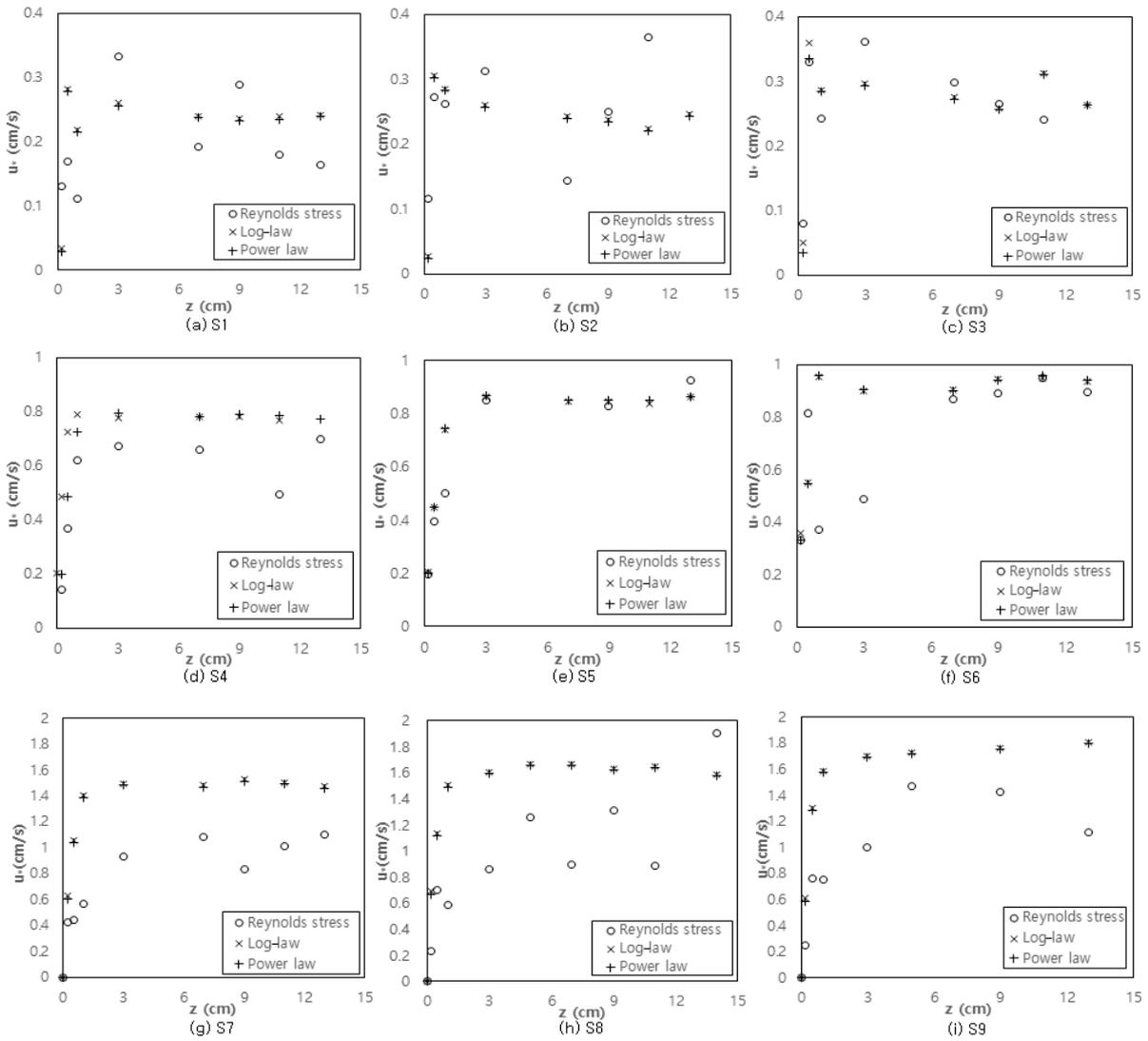


Fig. 8. Comparison of friction velocities evaluated by three methods.

Table 1. Averaged friction velocity estimated using the log-law, power law ($\alpha = 8.74, \beta = 0.14$) and Reynolds stress methods

Run No.	u_{ref} (cm/s)	y (cm)	Averaged friction velocity (cm/s)			Averaged bed shear stress (N/m ²)		
			Reynolds stress (\bar{u}_{*r})	Log-law (\bar{u}_{*l})	Power law (\bar{u}_{*p})	Reynolds stress	Log-law	Power law
S1	29.3	10	0.195	0.219	0.215	0.004	0.005	0.005
S2	29.3	15	0.267	0.229	0.226	0.008	0.005	0.005
S3	29.3	20	0.297	0.263	0.256	0.007	0.007	0.007
S4	71.2	10	0.610	0.663	0.667	0.052	0.054	0.054
S5	71.2	15	0.726	0.706	0.709	0.071	0.064	0.065
S6	71.2	20	0.701	0.812	0.810	0.049	0.080	0.080
S7	113	10	0.798	1.320	1.304	0.070	0.183	0.179
S8	113	15	0.953	1.307	1.295	0.125	0.242	0.238
S9	113	20	0.968	1.646	1.637	0.126	0.273	0.271

내부영역(inner region)과 외부영역(outer region)이 겹치는 중첩영역(overlap region)에서 적용되며, 벽에 가까운 점성층에서 성립이 되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 초음파 유속계

(ADV)의 소음은 난류 강도(turbulent intensity)를 증가시키는 경향이 있지만 레이놀즈 응력에 미치는 영향은 분명하지 않다. 더 자세한 조사가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 점착성 유사의 응집을 방해하지 않도록 설계해 제작한 환형수조 내에서 흐름특성을 측정해 분석하였다. 종방향 유속, 횡방향 유속, 연직방향 유속은 초음파 유속계(ADV)를 이용하여 관측하였으며 마찰속도, 바닥전단응력, 난류 운동에너지의 분포를 검토하였다. 종방향 유속은 등가조고 변화에 따른 대수분포식(로그법칙)과 지수와 계수에 따른 멱함수로 산정한 값과 비교하였다. 마찰속도와 바닥전단응력은 로그법칙, 멱법칙, 레이놀즈 전단응력방법을 이용하여 산정하였다.

따라서 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 회전체 실린더 영향은 환형수조 저면에서 기준속도가 증가함에도 불구하고 종방향 유속에 대해 크지 않았다. 하지만 수심비와 유속이 증가하면 내부 실린더 영향은 이동 경계 근처에서 가장 높았고 외측 벽쪽으로 감소했다. 즉 마찰력 영향은 수심비와 유속이 증가하게 되면 실린더 회전체 근처에서 증가하였다. 종방향 유속 결정시 실린더 근처 지점 값은 제외할 필요가 있을 것으로 판단된다.

(2) 횡방향 흐름이 환형수조 바닥에서 외측 벽으로부터 내측 벽 실린더 회전체 방향으로 형성되었다가 수면으로 갈수록 방향이 바뀌는 2차 순환류(secondary flow)가 형성됨을 볼 수 있다. 유속이 증가함에 따라 2차 순환류는 증가하였다. 이와 같은 2차 순환류가 점착성 유사의 침식, 응집, 퇴적물의 이동 역학에 미치는 영향 정도에 관한 연구가 요구된다.

(3) 난류 운동에너지는 저유속이면 바닥근처 지점에서 가장 크게 나타났지만 유속이 증가함에 따라 위쪽으로 이동하였다. α 와 β 값과 평균마찰속도를 고려하여 멱함수로 산정된 종방향 유속이 바닥 마찰길이를 고려한 로그법칙으로 예측한 값보다 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

(4) 평균마찰속도는 로그법칙, 멱법칙, 레이놀즈 응력 방법에 의해 분석하였으며, 레이놀즈 전단응력 방법으로 산정된 마찰속도 값은 저유속에서 부분적으로 작게 나타났지만 평균값은 비슷하게 산정되었다. 그러나 유속이 증가할 때 로그법칙은 레이놀즈 전단응력 방법에 의해 계산된 값보다 크게 나타남을 알 수 있었다.

따라서 본 연구는 기존의 환형수조 상부 링 대신 회전체 실린더에 의해 흐름을 발생시킬 수 있음을 증명하였다. 점착성 유사의 응집을 방해하지 않도록 제작된 환형수조는 자유수면이 제약받지 않기 때문에 수조 내 측정 장치를 설치할 수 있으며 유속결정시 실린더 근처 지점의 값을 제외한다면 점착성 유사의 퇴적거동, 침식, 침강, 이송, 확산 등의 분석에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

하지만 본 연구에서 제작된 환형수조는 점착성 유사의 거동 해석을 위해 수심변화에 따른 흐름특성(유속, 난류 운동에너지, 전단응력)과 부유 미립자에 영향을 줄 수 있는 2차 순환류 영향에 대한 연구가 이루어질 필요가 있다고 본다. 또한 하천과 항만 등의 하상변동과 준설, 수질오염 등에 영향을 주는 점착성 유사의 퇴적과 침식에 관한 정량적인 해석기법에 대해 지속적인 연구가 요구된다.

사 사

이 논문은 2019년 서일대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구함.

References

- Barenblatt, GI, Chorin, AJ and Prostokishin, VM (1997). Scaling laws for fully developed turbulent flow in pipes. *Appl. Mech. Rev.*, 50(7), pp. 413-429. DOI:10.1115/1.3101726
- Booij R (1994). *Measurements of the flow field in a rotating annular flume*. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering Report no. 94-2. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:431193bc-8cfb-46ce-81fd-5034941b0769>
- Choi, IH and Kim, JW (2014). Experimental study on erosional behaviour of fine-grained sediments. *J. of Korean Society Hazard Mitigation*, 14(3), pp. 863-872. [Korean Literature] <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.3.291>
- Choi, IH and Kim, JW (2017). Study of settling properties of cohesive sediments. *J. of Wetlands Research*. 19(3), pp. 303-310. [Korean Literature] DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.3.303>
- Choi, IH and Kim, JW (2018). Physical characteristics of floc density of suspended fine particles in accordance with the cohesiveness. *J. of Wetlands Research*. 20(3), pp. 227-234. [Korean Literature] DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2018.20.3.227>
- Duan, JG (2009). Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike. *J. of Hydraulic Engineering*, 131(12), pp. 1126-1135. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000077)
- Gharabaghi, B, Inkratas, C, Krishnappan, BG, Rudra, RP (2007). Flow characteristics in a rotating circular flume. *The Open Civil Engineering Journal*, 1, 30-36.
- Hillebrand, G (2008). *Transportverhalten kohäsiver Sedimente in turbulenten Stroemungen- Untersuchungen im offenen Kreisgerinne*. Dissertation, IWK, Universität Karlsruhe. [German Literature]
- Johansen, C (1998). *Dynamics of cohesive sediments*. Hydraulic & Coastal Engineering Laboratory Department of Civil Engineering Aalborg University.
- Krishnappan, BG (1993). Rotating circular flume. *J. of Hydraulic Engineering*, 119(6), 758-767. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:6\(758\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:6(758))
- Krishnappan, BG and Engel, P (2004). Distribution of bed shear stress in rotating circular flume. *J. of Hydraulic Engineering*, 130(4), 324-331. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:4\(324\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:4(324))

- Krishnappan, BG (2004). Erosion behavior of fine sediment deposits. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(5), pp. 759–766. DOI: [10.1139/104-054](https://doi.org/10.1139/104-054)
- Mohrig, D (2004). Conservation of Mass and Momentum (PDF). 12.110: *Sedimentary Geology*, Fall 2004. MIT OCW.
- Neumeier, U, Lucas, CH and Collins, M (2006). Erodibility and erosion patterns of mudflat sediments investigated using an annular flume. *Aquatic Ecology* 40 pp.543–554. DOI [10.1007/s10452-004-0189-8](https://doi.org/10.1007/s10452-004-0189-8)
- Parchure, TM and Mehta, AJ (1985). Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits. *J. of Hydraulic Engineering*, 111(10), pp. 1308–1326. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:10\(1308\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:10(1308))
- Schlichting, H and Gersten, K (2000). *Boundary-Layer Theory*. Springer, 8th edition. <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-85829-1>
- Skulovich, O, Ganal, C, NüBer, LK, Cofalla, C, Schuettrumpf, H, Hollert, H, Seiler, TB and Ostfeld, A (2018). Prediction of erosional rates for cohesive sediments in annular flume experiments using artificial neural networks. *H₂Open Journal* 1 (2): pp. 99–111. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2018.107>
- Spork, V (1997). *Erosionsverhalten feiner Sedimente und ihre biogene Stabilisierung*. Band 114 der Reihe Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts fuer Wasserwirtschaft der RWTH Aachen. [German Literature]
- Van Leussen, W (1994). *Estuarine Macroflocs and their Role in Fine-grained Sediment Transport*. Ph.D. Thesis, University Utrecht.
- Von Kármán, T (1930). Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, Fachgruppe 1(Mathematik), 5, pp. 58–76. [German Literature]
- Whipple, K (2004). *Hydraulic Roughness* (PDF). Surface processes and landscape evolution. MIT OCW.