

급변곡선수로에서 종방향 유속의 연직분포식 개발

Development of the Formula for the Vertical Profile of the Longitudinal Velocity in Sharp Open Channel Bend

김태원*, 이길성**, 박재현***, 이상호****

Tae Won Kim, Kil Seong Lee, Jae Hyeon Park, Sang Ho Lee

요지

종방향 유속의 연직분포 흐름 특성을 파악하기 위해서 중심각이 180°인 단일 만곡부에서 실험을 수행하였다. 실험결과를 분석한 후 종방향 유속의 연직분포 흐름특성을 재현하기 위해서 원주형 종방향 운동 방정식에 와점성 개념을 도입하였다. Rozovskii의 종방향 그리고 연직방향 유속식들을 도입하여 이론식을 개발하였다. 이론식의 수리학적 변수들은 원심력 항, Chezy 계수, 그리고 전단유속 항들로 구성되어 있다. 이론식은 곡률반경을 따라 변화하는 만곡부 내에서 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상을 재현하고 있다. 이론식은 본 연구에서 실험을 통해 취득한 관측자료와 비교한 결과 잘 일치함을 보여주고 있다.

핵심용어 : 종방향 유속의 연직분포, Chezy 계수, 급변곡선수로

1. 서론

개수로에서 연직방향 종방향 유속장은 크게 내부영역(inner region)과 외부영역(outer region)으로 나눌 수 있다. 내부영역은 유체의 점성이 지배적인 인자로서 점성저층구간(viscous sub layer), 완충구간(buffer layer), 중복지역(overlap)의 세부영역으로 구분할 수 있으며, 자유수면을 갖는 개수로의 경우 내부영역 위로 부터 자유수면까지는 난류는 감소하고 흐름의 관성이 지배적인 외부영역이 형성되어 중복지역과 후류구간(wake layer)으로 구분된다. 개수로 흐름에서 연직방향의 흐름장을 정량적으로 구분하면 자유표면영역(free surface region)은 $0.6 \leq z/h \leq 1$, 중간영역(intermediate region) 또는 중복지역(overlap layer)은 $(0.15 \sim 0.2) \leq z/h \leq 0.6$, 벽면영역(wall region)은 $z/h \leq (0.15 \sim 0.2)$ 로 구분된다(노영신, 2004). 여기서, z 는 하상으로부터 자유표면까지 거리, h 는 수심이다. Schlichting(1979)은 점성저층 구간은 경계면의 영향으로 인해 난류가 감소하고 유체의 점성이 지배적인 층으로, 이 영역에서는 벽법칙(law of wall; $u^+ = y^+$)을 적용할 수 있으며 적용범위는 $y^+ < 5$ 이다. 여기서, $u^+ (= u/u_*)$ 는 무차원화된 종방향 유속, u_* 는 전단유속, $y^+ (= yu_*/\nu)$ 는 무차원화된 높이, ν 는 동점성계수이다. 중복지역에는 로그법칙(log-law) 또는 대수법칙(power-law)을 적용할 수 있으며, 외부영역에는 속도결손법칙(velocity defect law) 또는 로그후류법칙(log-wake law)을 적용하여 연직방향에 대한 각 구간에 대하여 흐름장을 해석하였다. 이처럼 개수로에서 연직방향 유속분포를 단순한 하나의 경험식 또는 해석해를 적용하여 종방향 유속의 연직분포를 표현할 수 없다. 그러나 기존의 연구자들(Prandtl, 1949; Rozovskii, 1957; Kikkawa 등, 1976; Zimmermann과 Kennedy, 1978; Odgaard, 1986)은 로그분포, 멱함수 형태 또는 속도 결손법칙을 이용하여 개발된 식들을 개수로 전 구간에 걸쳐서 적용해 온 실정이다. 기존의 연구자들이 개발한 종방향 유속의 연직분포 식들은 표 1과 같다.

* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · E-mail: ktw@websolus.co.kr
** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · E-mail: kilselee@snu.ac.kr
*** 정회원, 인제대학교 토목공학과 조교수 · E-mail: jh-park@inje.ac.kr
**** 정회원, 부경대학교 건설공학부 부교수 · E-mail: peterlee@pknu.ac.kr

또한 기존 연구자들(Odgaard, 1986; Yeh과 Kenndy, 1993)은 유사이동 모형 또는 오염물 이송확산 모형과 결합된 2차원 수심 적분 모형을 개발함에 있어서 종방향 유속에 대하여 기존에 개발된 대수분포 또는 멱법칙 형태의 종방향 유속의 연직분포 식들을 가정하였다. 로그분포 또는 대수분포 형태 식의 특징은 하상으로부터 자유수면으로 향할수록 종방향 유속은 증가하며, 최대 유속 지점은 항상 자유표면에서 발생한다. 직선하천의 경우 연직방향에 대한 종방향 유속분포는 velocity dip 현상이 발생하며, 만곡부가 교호적으로 나타나는 사행하천의 경우 지형학적 원인에 의해 원심력 때문에 이차류가 발생하며, 이차류에 의한 이송모넨텀 전달은 연직방향의 종방향 유속분포를 변형시키는 피드백현상(feedback phenomenon)으로 인해 연직방향에 대한 최대 종방향 유속 지점은 하상근처에서도 발생한다고 제안하였다(Nezu와 Rodi, 1985; de Vriend, 1981; Blanckaert, 2002; Blanckaert와 de Vriend, 2003). 2차원 수심 적분 모형은 이차류 및 흐름이 하류 방향으로 전개되면서 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상을 모의할 수 없다. 이처럼 로그분포 또는 대수분포 형태의 식으로 종방향 유속의 연직분포를 예측한다면 실제 종방향 유속의 연직분포에 대한 값과는 차이를 보일 것으로 예상된다. 따라서 2차원 수심적분 모형에 적용된 기존의 종방향 유속 식들에 대한 분석과 이에 대한 보완이 필요하다. 또한 실제 하천에서 피드백 현상으로 인한 종방향 유속의 연직분포 기울기가 변형되는 현상을 고려하지 않고 자유표면 유속계를 이용하여 표면 유속 값을 취득하여 단면 평균유속으로 사용하였을 경우 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 급변 곡선수로에서 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상을 모의할 수 있는 종방향 유속의 연직분포 식을 제안하고자 한다.

표 1. 연직방향에 대한 종방향 유속분포

Literature	Longitudinal velocity formula
Prandtl (1949)	$v_s = v_{\max} + \frac{1}{\kappa} u_* \ln \eta$
Rozovskii (1957)	$v_s = U \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \right]$
Kikkawa et al. (1976)	$\frac{v_s}{u_*} = \left(\frac{v_s}{U} \right) \left[\frac{U}{u_*} + \frac{1}{\kappa} (\ln \eta + 1) \right]$
Zimmermann & Kennedy (1978)	$\frac{v_s}{U} = \frac{m+1}{m} \eta^{(1/m)}$
Odgaard (1986)	$\frac{v_s}{U} = \frac{m+1}{m} \left[\left(\frac{2h-z}{h} \right) \eta \right]^{(1/m)}$

v_{\max} : max. longitudinal velocity, $v_{\max} = 1.11 [C/(C-1)]U$,
 $C(=R_h^{1/6}/n)$: Chezy coefficient, R_h : hydraulic radius,
 n : roughness coefficient, U : Mean bulk velocity,
 κ (≈ 0.4 or 0.5): von Karman constant, $u_* (= \sqrt{gR_h I_s})$: shear velocity,
 g : gravity acceleration, I_s : bottom slope, $\eta = z/h$, h : depth,
 $m(= \kappa C / \sqrt{g})$: friction parameter

2. 종방향 유속의 연직분포 식

본 연구에서는 김태원 등(2005)이 관측한 자료들을 이용하여 표 1의 식들과 비교하여 그림 1에 도시하였다. 그림 1에서 가로축 좌표의 f_s 는 $v_s/U (U = \sqrt{v_s^2 + v_r^2 + v_z^2})$ 이다. 관측된 유속값들(v_s, v_r, v_z : 각각 종방향, 횡방향, 연직방향의 평균유속)은 만곡부 유입부 단면에서 ADV를 이용하여 160초 동안 취득된 순간유속자

료로부터 섭동유속을 소거한 평균유속 값들이다. 그림 1은 각각 0°, 30°, 60° 단면에서 관측자료와 표 1의 식들을 비교한 결과이다. 기존 식들의 분포 형태는 바닥에서 자유수면으로 종방향 유속의 연직분포 기울기가 $\partial f_s / \partial z > 0$ 이고 최대 유속 지점은 항상 자유수면이다. 기존 식들 중에서 Rozovskii 그리고 Zimmermann과 Kennedy가 제안한 식이 각각 0°, 30° 단면에서 본 연구에서 취득한 관측 자료와 가장 잘 일치함을 보여 주고 있다. 그러나 60° 단면에서 관측값은 수체의 윗 부분에서 종방향 유속의 연직분포 기울기가 편평해지는데 기존의 식들은 전혀 예측을 못하고 있다.

Rozovskii(1957)는 만곡부 내에서 종방향 유속의 연직분포 현상을 예측하기 위해서 흐름은 정상상태, 비압축 유체로 가정하여 운동 방정식을 종방향에 대하여 직교 좌표계를 원주형 좌표계로 기술한 다음 종방향 유속의 연직분포 식을 개발하였다. 종방향 유속의 연직분포를 예측하기 위해서 운동 방정식은 다음과 같다.

$$v_r \frac{\partial v_s}{\partial r} + \frac{v_s}{r} \frac{\partial v_s}{\partial s} + v_z \frac{\partial v_s}{\partial z} + \frac{v_s v_r}{r} = -g \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서, r 은 횡방향이다. Rozovskii는 직사각형 단면의 광폭수로에서 (i) 직사각형 단면을 가진 수로에서 면적법칙($v_s r = \text{const.}$)을 적용. (ii) 종방향 / 연직방향 유속을 도입하여 종방향 운동 방정식으로부터 종방향 유속의 연직분포에 대한 이론식을 제안하였다.

$$v_s = \sqrt{\left\{ U \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \right] \right\}^2 + \left[\frac{3}{\kappa^3} \frac{\sqrt{g}}{C} \left(\frac{U^2}{r} \right) h (1 - \eta) \right] \Delta s} \quad (2)$$

여기서, s 는 호(arc), 그리고 κ 는 0.5이다. 본 연구에서는 만곡부 내에서 흐름이 하류로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상을 예측하기 위해서 식 (1)에서 Odgaard(1984)가 제안한 만곡부 내에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 곡률반경에서 종방향 수면 기울기의 변화율은 무시할 수 있다는 가정과 다음 아래 식 (3)의 Odgaard(1984)와 Blanckaert(2004)가 적용한 포물선형 좌점성 개념을 도입하여 식 (4)를 유도하였다.

$$v = \kappa u_*' (1 - \eta) \quad \text{그리고} \quad \partial v_s / \partial z = u_*' / (\kappa z) \quad (3)$$

$$v_s = \sqrt{\left\{ U \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \right] \right\}^2 + \left[\frac{3}{\kappa^3} \frac{\sqrt{g}}{C} \left(\frac{U^2}{r} \right) h (1 - \eta) - \frac{2u_*'^2 r}{h} \right] \Delta s} \quad (4)$$

본 연구에서 개발한 식 (4)는 Rozovskii가 제안한 식 (2)와 비교하여 $-2u_*'^2 r / h$ 항이 추가되었다.

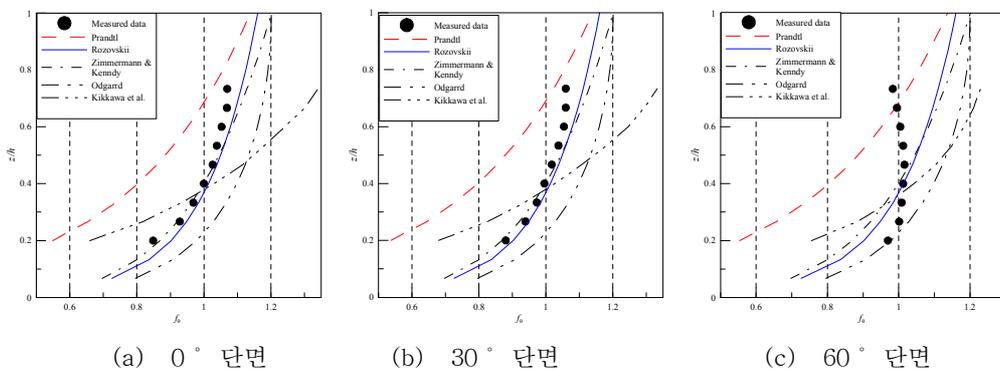


그림 1. 표 1에서 제안된 식들과 관측값의 비교

3. 결과분석

그림 2는 본 연구에서 개발한 식 (4)와 김태원 등(2005)의 실험자료들 중 “표 1. 실험조건” 중 Case 3과 Rozovskii가 제안한 식들과 각각 비교한 그림이다. 그림 2에서 실선은 본 연구에서 개발된 식 (4), 점선은 Rozovskii가 제안한 식 (2)이고 일점쇄선은 표 1에서 Rozovskii가 제안한 식이다. 본 연구에서 개발된 이론식에 적용된 변수들에 대한 값은 $R_c=0.92$ m, $h=0.15$ m, 지름 2 mm 여과사를 이용하여 수로에 부착했기 때문에 Strickler (1923)의 Chezy 계수를 적용하였다. 이론식에 적용한 수리학적 변수들은 다음과 같다. $C=21.1(R_H/d_{20})^{1/6} \approx 39$ m^{1/2}/s, $R_b=0.085$ m 그리고 von Karman 상수 값은 $\kappa=0.45$ 이다.

Rozovskii가 제안한 식 (2)는 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라서 수체의 아래 부근에서 종방향 유속 값이 증가됨을 보여주고 있다. 이와 같은 이유는 식 (2)의 우변 항 중에서 η 값이 자유표면에서 1이므로 $\left[\frac{3}{\kappa^3} \frac{\sqrt{g}}{C} \left(\frac{U^2}{r} \right) h(1-\eta) \right] = 0$ 이다. 따라서 자유표면에서는 유속값의 변화는 없고, 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 Δs 값은 증가되며 하상근처에서 η 값은 1보다 작아지기 때문에 종방향 유속값이 커진다. 또한 표 1에서 Rozovskii가 개발한 종방향 유속의 연직분포 식은 만곡부 내에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상을 전혀 모의하지 못하고 있다. 그림 2(a)는 0° 단면으로 만곡부 유입부 단면이다. 식 (4)와 Rozovskii 식이 잘 일치함을 보여주고 있다. 두 식을 비교한 결과 자유표면으로 향할수록 차이가 발생하는 이유는 본 연구에서는 $\kappa=0.45$ 를 적용하였으며, Rozovskii 식에는 0.5를 적용하였기 때문이다. 그림 2(b)는 30° 단면에서 관측값과 두 식을 비교한 그림이다. 30° 단면까지는 본 연구에서 개발한 식 (4)와 표 1에서 Rozovskii가 개발한 식이 관측자료와 잘 일치하는 현상을 보이고 있으며, 식 (2)는 관측자료보다 과대산정하는 경향을 보여주고 있다. 그림 2(c)는 60° 단면에서 자유표면으로 향할수록 관측된 종방향 유속의 연직분포 기울기가 $\partial f_y / \partial \eta < 0$ 을 보여주고 있다. 30° 단면과 비교하여 수체의 윗부분에서 종방향 유속의 연직분포 기울기가 편평해 짐을 보여주고 있다. Rozovskii가 개발한 식들은 관측값과 비교하여 잘 일치하지 않음을 보여주고 있다. 반면 본 연구에서 개발한 이론식은 관측값과 잘 일치함을 보여주고 있다. 90° 단면에서 180° 단면까지 본 연구에서 개발된 이론식은 흐름이 하류 방향으로 진행할수록 종방향 유속의 연직분포가 변형됨을 잘 보여주고 있으며, 관측값과 잘 일치하는 현상을 보여주고 있다.

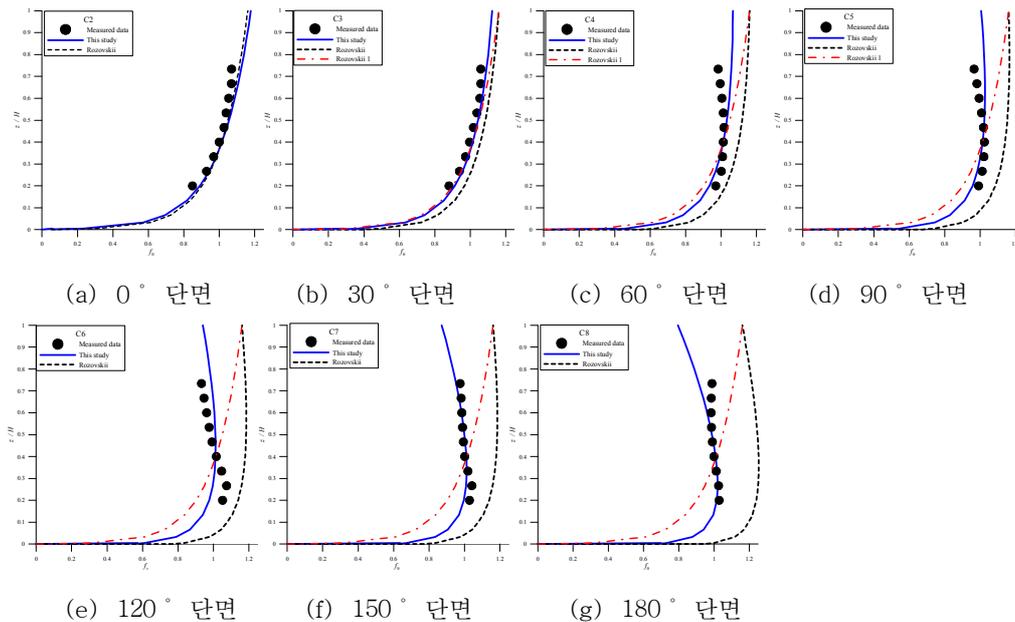


그림 2. 관측자료와 종방향 유속의 연직분포 식들의 비교

4. 결론

본 연구에서는 기존에 제안된 종방향 유속분포 식들과 취득한 관측자료와 비교한 결과 Rozovskii와 Zimmermann과 Kennedy가 제안한 식이 잘 일치함을 보여주고 있다. 그러나 기존에 제안된 식들을 만족부가 교호적으로 나타나는 사행하천에 적용하기에는 부적합하다. 그 이유로는 기존에 제안된 식들은 종방향 유속의 연직분포가 $\partial f_s/\partial z > 0$ 에서 $\partial f_s/\partial z < 0$ 로 변화되는 현상을 전혀 모의하지 못하고 있다. 그리고 최대유속은 항상 자유표면에서 발생한다. 따라서 유사이동 모형 또는 오염물 이송확산 모형과 결합하여 수심적분 모형을 사용할 경우, 종방향 유속에 대하여 기존의 종방향 유속식들로 가정하여 적용하면 정확한 해를 구할 수 없다. 그러나 본 연구에서 개발된 이론식은 관측값과 잘 일치하고 있으며, 종방향 유속의 연직분포 기울기가 $\partial f_s/\partial z > 0$ 에서 $\partial f_s/\partial z < 0$ 으로 변화되는 현상을 잘 재현하고 있다.

참고문헌

- 김태원, 박재현, 이길성, 임창화 (2005). "급변곡선수로에서 이차류에 의한 유속분포 변화." **수자원학회 학술발표논문**.
- 노영신 (2004). **영상해석 기술을 이용한 하천 유량측정 기법 개발**. 명지대학교 공학박사 학위논문.
- Blanckaert, K., and de Vriend, H. J. (2003). "Nonlinear modeling of mean flow redistribution in curved open channels." *Water Resource Research*, Vol. 39, No. 12, pp. 1-14.
- Blanckaert, K. (2002). *Flow and turbulence in sharp open channel bends*. Ph.D. Thesis, Ecole Polytech. Fd. Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- de Vriend, H. J. (1981). "Flow measurements in a curved rectangular channel II: Rough bottom" *Rep. No.5-81*, Lab. Fluid Mech., Dept. of Civ. Engrg., Delft University of Technology, The Netherlands.
- Kikkawa, H., Ikeda, S., and Kitagawa, A. (1976). "Flow and bed topography in curved open channels." *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 102, No. 9, pp. 1327-1342.
- Nezu, I., and Rodi, W. (1985). "Experimental study on secondary currents in open channel flow." *Proc. of 21st IAHR Congress*, Melbourne, Vol. 2, pp. 115-119.
- Odgaard, A. J. (1986). "Meander flow model I: Development." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1136.
- Prandtl, L. (1949). "Gidroaeromekhanika." *Hydro-aero-mechanics*, III.
- Rozovskii, I. L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*. Ac. Sc. Ukr. SSR, Isr. Progr. Sc. Transl., Jerusalem.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill.
- Strickler, A. (1923). "Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformeln." *Rep. No. 16*, Amt. f. Wasserwirtschaft, Bern, Switzerland.
- Yeh, K. C., and Kennedy, J. F. (1993). "Moment model of nonuniform channel-bend flow I: Fixed beds." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 119, No. 7, pp. 776-795.
- Zimmermann, C., and Kennedy, J. F. (1978). "Transverse bed slope in curved alluvial streams." *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 119, No. 1, pp. 33-48.