

## 급변만곡부에서 종방향 유속의 연직분포

### The Vertical Distribution of Longitudinal Velocity in Sharp Open Channel Bends

이 길 성\* / 김 태 원\*\* / 박 재 현\*\*\*

Lee, Kil Seong / Kim, Tae Won / Park, Jae Hyeon

#### Abstract

The characteristics of the longitudinal velocity in a 180° constant-radius, recirculating laboratory channel were investigated. Three-dimensional velocity fields were measured using a side-looking ADV. The shortcomings of existing equations for longitudinal velocity are discussed. An eddy viscosity model is adopted in the downstream momentum equation. A mathematical equation was developed to describe the vertical distribution of longitudinal velocity. The comparisons of the longitudinal velocity show generally good agreement. It is found that the curvature change in the curved channel affects the vertical location of maximum velocity and the vertical profile of longitudinal velocity.

**keywords** : vertical distribution of longitudinal velocity, maximum velocity, sharp open channel bends

#### 요 지

종방향 유속의 특성을 파악하기 위해서 중심각이 180° 인 순환수로에서 실험을 수행하였으며, 3차원 유속장 측정은 측방 음파 도플러 유속계를 이용하였다. 기존의 종방향 유속식들의 단점들을 검토하였다. 종방향 운동 방정식에 와 점성 개념을 도입하여 새로운 종방향 유속의 연직분포 식을 개발하였다. 종방향 유속의 연직분포들을 비교한 결과 잘 일치함을 보여주고 있으며, 곡선수로에서 곡률의 변화는 종방향 유속의 연직분포 변화 및 최대 유속 발생 지점에 영향을 미치는 것을 발견하였다.

**핵심용어** : 종방향 유속의 연직분포, 최대유속, 급변만곡부

#### 1. 서 론

하천에서 유량자료는 수문분석 또는 하천을 설계하는데 이용되어 왔다. 일반적으로 유량측정 방법으로는 유속계를 이용하여 유속을 측정하는 방법으로, 유속은

종방향, 횡방향, 연직방향 유속으로 분류된다. 횡방향, 연직방향 유속은 종방향 유속과 비교하여 유속값이 상당히 작다. 개수로 흐름에서 지배적인 인자들 중 하나가 종방향 유속이다.

일찍이 Prandtl(1942)에 의해 제안된 대수 유속분포

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

Grad. Stud., School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea  
(e-mail: ktw@websolus.co.kr)

\*\*\* 인제대학교 토목공학과 조교수

Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Inje University, Obang-dong, Gimhae, Gyeongnam, 621-749, Korea

식은 경계층 이론에 기초를 둔 것으로, 하천 경계층 흐름에 널리 적용되고 있다. Keulegan(1938)은 Prandtl-Kármán의 경계층 이론을 개수로 하천에 그대로 적용하여 하상에서 수면까지 전체를 하나의 경계층으로 보았다. 그러나 개수로 하천에서 대수식으로 표현된 유속 분포는 경계면 근처에서는 측정치와 잘 일치하나, 경계면에서 멀어질 수록 잘 일치하지 않는다. 이를 보완하기 위해 Coleman(1981)은 수심 전체의 유속 분포식으로 Coles(1956)의 후류함수식의 이용을 제안하였다. 이처럼 기존 연구자들(Rozovskii, 1957; Kikkawa et al., 1976; Zimmermann and Kennedy, 1978; Odgaard, 1986)은 종방향 유속의 연직분포를 예측하기 위해 식들을 개발하여 왔다. 기존 연구자들이 제안한 식들은 다음과 같은 특징들이 있다.

- 1) 대수법칙(log-law) 또는 멱법칙(power-law) 형태의 식들은 하상으로부터 자유수면으로 향할수록 종방향 유속의 연직분포 기울기는 증가한다. 즉  $\partial u/\partial z > 0$ . 여기서  $u$ 는 종방향 유속,  $z$ 는 하상으로부터 연직방향 거리이다.
- 2) 자유표면에서 항상 최대유속이 발생한다.
- 3) 지형학적 원인에 상관없이 종방향 유속의 연직분포는 공간적으로 항상 일정하다.

Chiu and Tung(2002)은 개수로 흐름의 규칙성 중에 최대 유속의 발생위치는 하천단면 수심방향에서 흐름이 하류로 진행함에 따라서 같은 위치에서 발생하려는 특성을 보여주고 있으며, 이와 같은 특징은 고정경계(rigid boundary) 직선, 균일 하천(prismatic channel)에서 발생한다고 제안하였다. 이와 같은 경우 기존에 제안된 식들을 적용할 수 있다. 그러나 자연하천의 경우 만곡부(bend)가 교호적으로 나타나는 사행하천(meandering channel)으로 형성되어 있어 종방향 유속 분포는 공간적으로 다르게 나타난다. 많은 연구자들(Francis, 1878; Stearns, 1983; Tominaga and Nezu, 1991; Chiu and Tung, 2002)은 최대 유속이 자유수면 아래에서 발생하는 것을 발견하였으며, 그 이유에 대하여 연구들을 수행하여 왔다. Chow(1959)는 자유수면으로부터 대략 5에서 25 % 지점에서 최대유속이 발생한다고 제안하였으며, Gordon(1992)은 Mississippi 강에서 유속을 측정된 결과 자유수면 아래 수심의 1/3 지점에서 최대유속이 발생한다고 제안하였다. Leopold et al. (1995)은 미국 내 하천에서 유속을 측정하여 평균유속과 최대유속을 비교 분석한 결과 최대유속은 평균유속보다 25~50 % 큰 값을 보여주고 있다고 제안하였다. de Vriend(1981)은 곡선수로에서 이차류(secondary flows)는 종방향 유속의 연직분포를 변형시킨다고 제안

하였으며, 흐름이 하류로 진행함에 따라서 최대유속 발생 위치가 변화한다고 제안하였다. Chiu and Tung (2002)은 확률과 엔트로피 개념을 도입하여 종방향 유속의 연직분포를 표현하였다. 만곡부에서 종방향 유속의 분포 형태는 Fig. 1과 같다고 할 수 있다.

Fig. 1과 같이 흐름이 하류로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포는 공간적으로 다르며, 최대유속 발생 위치도 다르게 나타난다. 하천환경적인 측면에서 혼합과정의 마지막 단계는 종방향 이송확산(dispersion)에 의한 종방향 경사를 유도하는 것이다. 그러나 기존의 멱법칙 또는 로그법칙 형태로 구성된 식들은 종방향 유속의 연직분포를 정확히 표현할 수 없다. 종방향 이송확산을 분석하기 위해서 연구자가 하천에서 종방향 유속을 측정하거나, 만약 측정할 수 없을 경우 로그분포나 멱함수 형태로 구성된 식들을 적용하여 종방향 이송확산을 예측할 수 있다. 로그분포나 멱함수 형태로 구성된 식들을 적용하면 정확히 종방향 이송확산을 예측할 수 없을 것으로 사료된다.

본 연구에서 급변만곡부에서 종방향 유속의 연직분포의 변화 형태를 알아보기 위해서 수리실험을 수행하였다. 또한 종방향 유속의 연직분포를 예측하기 위해서 수학적인 식을 제안하였다.

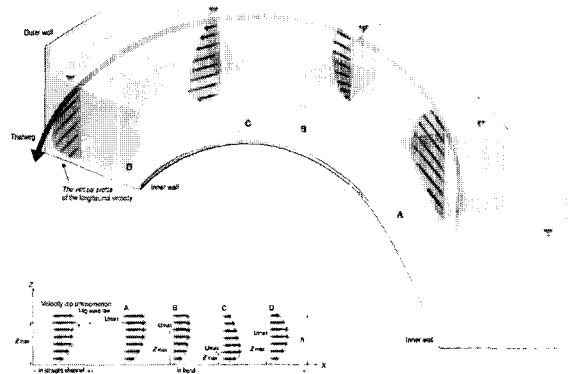


Fig. 1. Evolution of longitudinal velocity distribution in bend

## 2. 실험장치 및 조건

본 연구의 실험수로는 급변곡선의 순환수로로  $40 \times 40$  cm의 직사각형 단면이며 아크릴로 제작되었다(Fig. 2). 곡률반경은 0.92 m이며,  $180^\circ$ 의 곡선수로이다.  $R_c/B < 2 \sim 3$  사이의 비를 갖는 수로는 급변곡선수로이다(Rozovskii, 1957; Blanckaert, 2002). 여기서  $R_c$ 는 곡률반경,  $B$ 는 폭이다. 측방 음파 도플러 유속계(side-looking Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)를

이용하여 중심각이 180° 단일 만곡부에서 30° 간격으로 수심 15 cm에서  $\theta$ ,  $r$ ,  $z$  방향의 순간 유속을 측정하였다. 여기서  $\theta$ 는 종방향,  $r$ 은 횡방향,  $z$ 는 연직방향이다. 유속계 샘플링 주파수는 50 Hz이며, 자료 취득시간은 160 초이다. 측정 격자 간격은 폭 방향으로 0.025 m, 수심방향으로 0.01 m 간격으로 순간유속을 측정하였다. 유속 측정은 완전히 발달된 흐름(fully developed flow) 조건하에서 수행되었다. 이론적으로 정상상태의 등류 조건은  $\partial/\partial t=0$ ,  $\partial/\partial \theta=0$ 이다.  $t$ 는 시간이다. 그러나 지형학적 원인으로 인해 사행하천이나 만곡부에서는 정상상태의 등류 조건을 만족할 수 없다. 만약 수심 변화율이 2% 이내라면 유사한 완전히 발달된 흐름 조건이라고 가정할 수 있다(Shiono and Muto, 1998). 본 실험에서 수심 변화율의 오차 범위는  $\pm 2\%$  이내로 완전히 발달된 흐름조건을 만족하였다. 따라서 완전히 발달된 흐름 조건이라고 가정하였다.

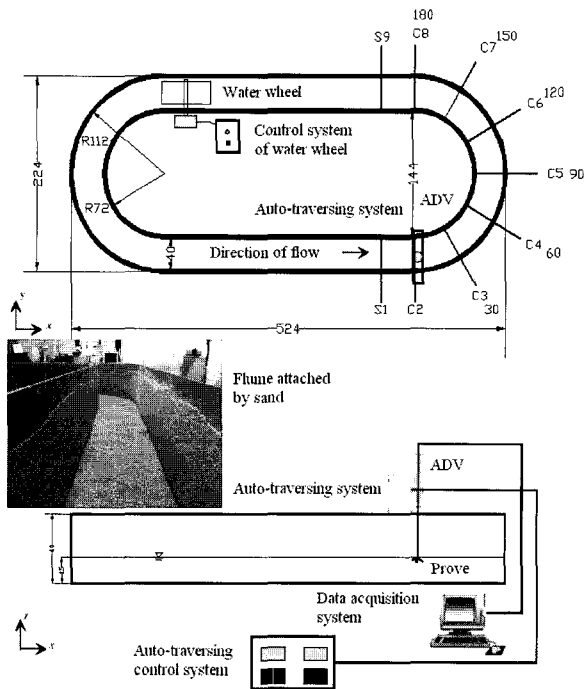


Fig. 2. Experimental flume (unit: cm)

본 연구에서는 고정상 모형수로에서 소요 조도계수를 결정하기 위해서 하상에서 평균 모래 입경,  $d_r$ 에 대한 식을 적용하였다(Lee, 2003).

$$d_r^{1/6} = \frac{R_r^{2/3}}{Y_r^{1/2}} = \frac{(R_p/R_m)^{2/3}}{Y_r^{1/2}} \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 동수반경,  $Y_r$ 은 수평축척비, 아래첨자  $p$ 는 원형,  $m$ 은 모형이다. Baek(2004)은 국내 하천에서 관측한 결과를 토대로 수심 대 폭 비를 1:90으로 가정하였다. 실제 자연하천 단면을 직사각형 단면이라고 가정하였을 경우 원형에서의 동수반경,  $R_p$ 는 0.9783 m이고 실험실 모형에서 수심이 15 cm인 경우 동수반경  $R_m$ 은 0.0857 m이다. Eq. (1)로부터 계산된 평균 모래입경은  $d_r \approx 0.0015$  m이다. 따라서 본 연구에서는 평균 모래입경을 2 mm로 결정하였다. 수로 내에 평균 여과사 입경 2 mm( $d_{20} \approx 2$  mm)를 부착하여 조도의 영향을 고려한 고정상 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

### 3. 실험결과 분석

본 연구에서 실측된 종방향 유속자료에 대하여 수심 평균된 종방향 유속 벡터도는 Fig. 3과 같다. 기존연구자들(Kikkawa et al., 1976; de Vriend, 1981; Odgaard, 1986; Shiono and Muto, 1998)은 만곡부 유입부 안쪽부근에서 유속이 빠르며, 흐름이 하류로 진행함에 따라서 최대유속은 바깥쪽으로 이동한다고 제안하였다. Fig. 3에서 실선은 최대유속 발생 경로를 도시한 선으로 기존 연구 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

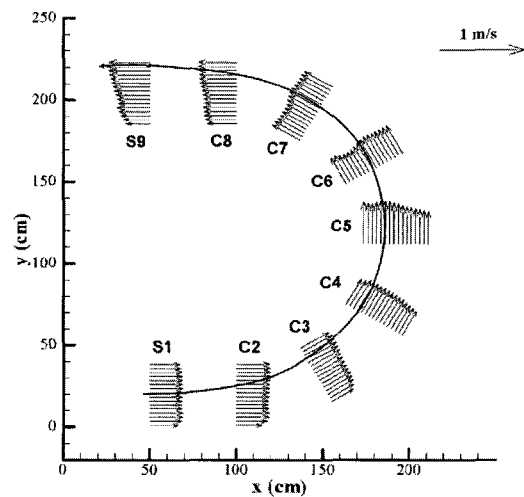


Fig. 3. Depth-averaged longitudinal velocity vectors (measured data)

Table 1. Hydraulic condition

Boundary properties	Depth (m)	$U$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	Re ( $\times 10^3$ )	Fr	$f$	$R_c/B$	$B/h$	$h/R_c$
Rough	0.15	0.358	0.055	93	0.296	0.188	2.3	2.67	0.16

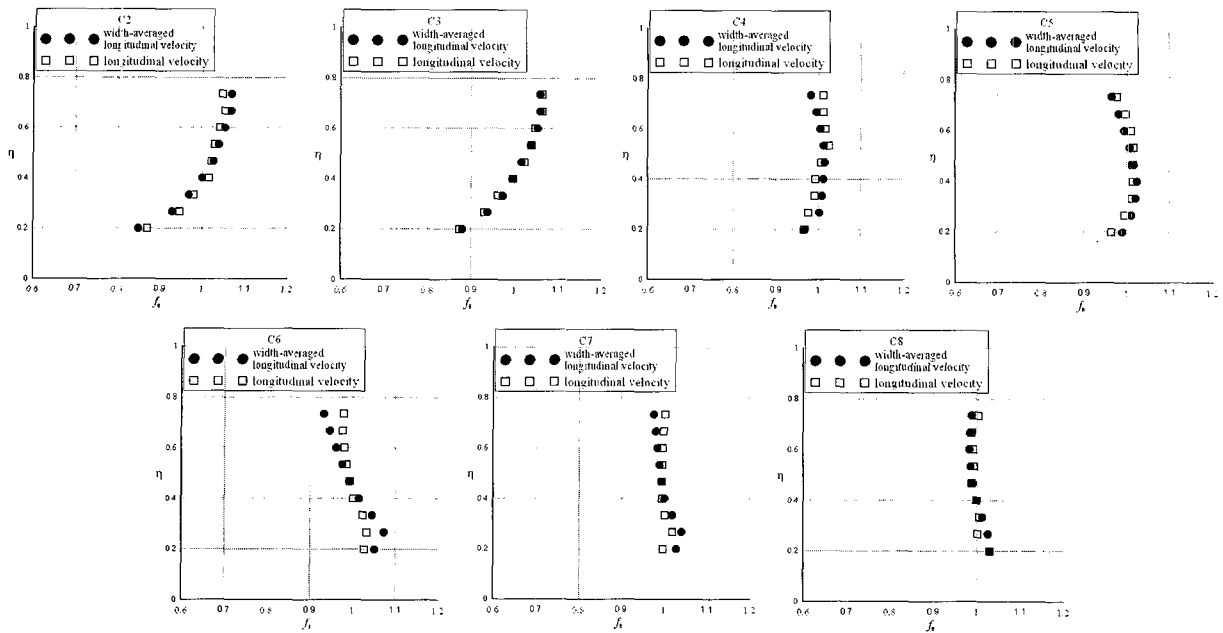


Fig. 4. Vertical profiles of longitudinal velocity

Fig. 4는 급변곡선 수로에서 종방향 유속의 연직분포를 도시한 그림이다. Fig. 4에서 가로축 좌표  $f_\theta$ 는  $u/U$ , 세로축 좌표  $\eta$ 는  $z/h$ 이다.  $U$ 는 단면평균 유속,  $h$ 는 수심이다. Fig. 4에서 기호 ●는 폭 평균된 종방향 유속이고, 기호 □는 Fig. 3에서 최대유속이 발생한 지점에서 종방향 유속이다. 최대 종방향 유속 벡터의 이동경로에 해당하는 지점에서 종방향 유속의 연직분포와 폭 평균된 종방향 유속의 연직분포를 비교한 결과, 종방향 유속의 연직분포는 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과로부터 폭 평균된 종방향 유속은 하천 중앙에서 측정된 유속이라고 가정할 수 있다. 하천 중앙에서 유속을 측정할 경우에도 만곡부 하천에서 종방향 유속의 특징(최대 유속 발생 위치 또는 종방향 유속의 연직분포 변화 현상)들을 잘 재현할 수 있을 것으로 예측된다. Fig. 4에서 30° 단면까지는 대수분포를 만족하지만 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포가 대수분포를 만족하지 못하고 있으며, 수체의 아래 부분에서 최대 종방향 유속이 발생하는 현상을 보이고 있다. 기존 연구자들은(de Vriend, 1981; Blanckaert, 2002; Blanckaert and de Vriend, 2003) 만곡부 내에서 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포 기울기가 변형되고, 최대 종방향 유속 발생 지점이 바다 근처에서 발생한다고 제안하였다. 본 실험에서 관측된 종방향 유속의 연직분포는 기존 연구 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

Fig. 5는 급변만곡부 내 관측된 단면에서 유속등고선도 및 최대 종방향 유속이 관측된 지점들을 도시한 그림들이다. 유속등고선도에서 최대 종방향 유속은 기

호 ×로 표시되어 있으며, Fig. 5(b)에서는 기호 ●로 표시하였다. 만곡부 내에서 흐름이 하류로 진행함에 따라서 최대 종방향 유속 위치가 시계방향으로 진행됨을 알 수 있으며, 하상 근처에서 발생함을 보여주고 있다. 곡선수로에서 곡률의 변화는 종방향 유속의 연직분포 변화 및 최대 유속 발생 지점에 영향을 미치는 것을 발견하였다. 이와 같은 관측결과들로부터 기존에 제안된 종방향 유속의 연직분포 식을 적용하는 것은 타당하지 않는 것으로 사료되어, 본 연구에서 급변만곡부에서 종방향 유속의 연직분포 현상을 예측할 수 있는 식을 제안하였다.

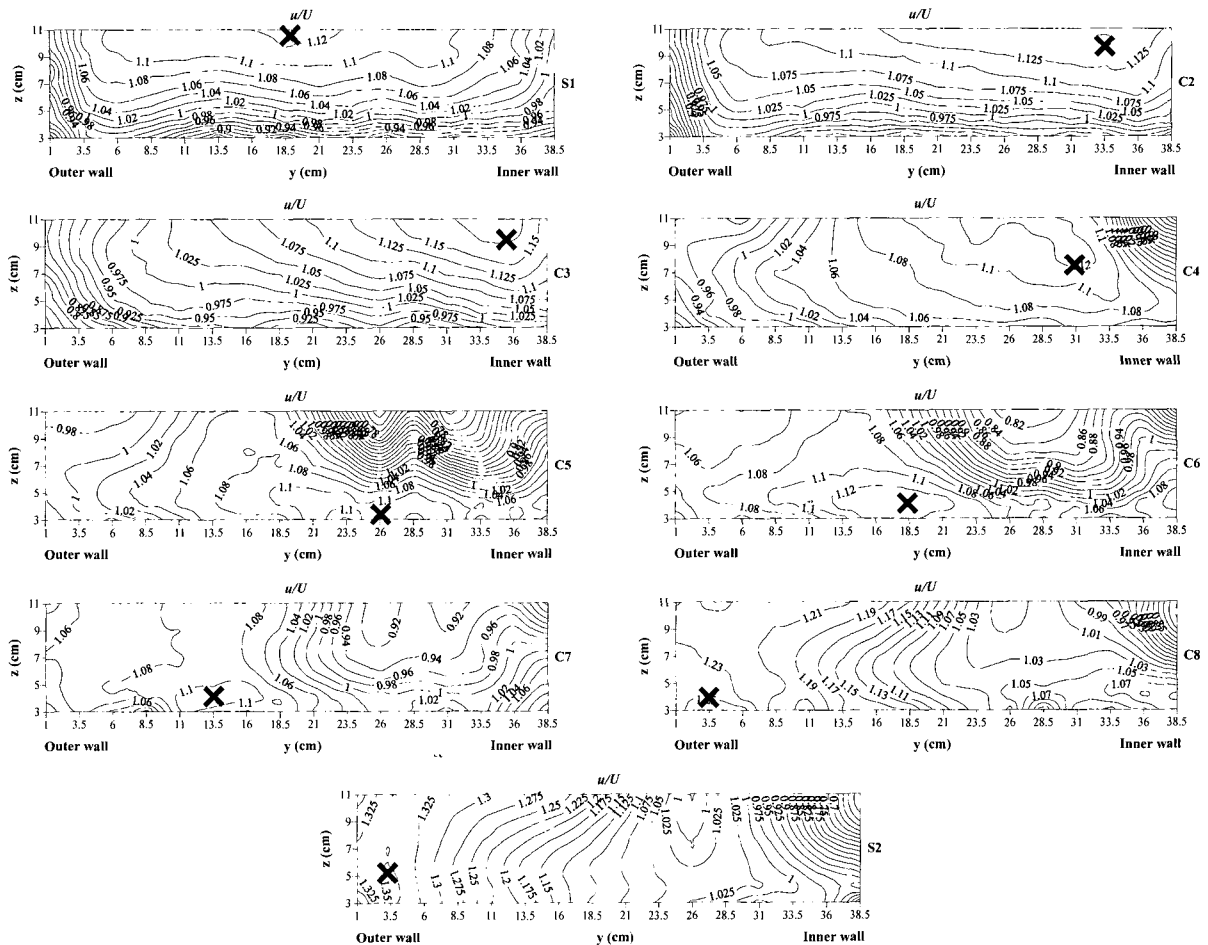
#### 4. 종방향 유속의 연직분포 식

기존에 제안된 멱법칙 또는 로그법칙 형태의 종방향 유속 식들 중에서 Rozovskii(1957)가 제안한 식은 다음과 같다.

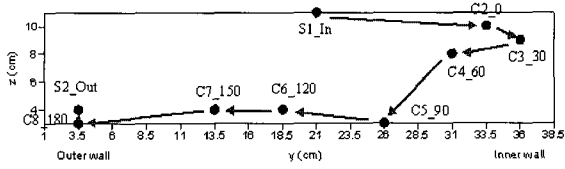
$$v_\theta = U \left[ 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \right] \quad (2)$$

여기서,  $\kappa$ 는 von Karman 상수,  $C$ 는 Chezy 조도 계수,  $g$ 는 중력가속도이다.

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



(a) Velocity contours



(b) Location of maximum velocity in bend

Fig. 5. Downstream velocity in cross-section

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_\theta v_r}{r} \quad (3)$$

$$= -g \frac{\partial z}{r \partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)$$

여기서,  $\nu_t$ 는 와점성계수이다. Rozovskii(1957)는 직사각형 단면의 광폭수로에서 (i) 직사각형 단면을 가진 수로에서 면적법칙을 적용.  $v_s r = \text{const.}$ , (ii) 종방향 / 연직방향 유속을 도입하여 종방향 운동 방정식으로부터 종방향 유속의 연직분포에 대한 이론식을 제안하였다 [Eq. (4)의 자세한 유도 과정은 Rozovskii(1957), pp. 112-115 참조].

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

Eq. (4)의 특징은 직선수로에서  $\Delta \theta = 0$ 이므로, Eq. (4)는  $v_\theta = U \left[ 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \right]$ 이고, 만곡부 내 자유표면에서  $\eta = 1$ 이므로,  $v_\theta = U \left[ 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right]$ 이 된다.

본 연구에서는 Rozovskii(1957)의 식을 개선하여 새로운 식을 개발하였다. 완전히 전개된 흐름이라는 가정하에 와점성 개념을 도입하였다. 국부적인 하상 전단은

수로 내 단면에서 평균 경계전단과는 벗어나 있다. 그러나 개수로에서 단면의 구석 부분을 제외하고 이차류는 하상 전단을 일정하게 분포시키려는 경향을 가지고 있다. 따라서 연직방향으로 하상전단은 평균 경계전단으로 가정할 수 있다(Odgaard, 1986; Chiu and Tung, 2002). 마찰 경사와 평균 경계전단은 단면에서 평균 유속과 Darcy-Weisbach 방정식에 의한 마찰 계수와 관련이 있다. 이를 표현하면  $U/u_* = \sqrt{8/f} = C/\sqrt{g}$ 이다.  $v_\theta$ 에 대한 로그분포와  $r$ 에 대하여 선형전단응력분포라고 가정하면

$$v_t = \kappa u_* z (1 - \eta)$$

그리고  $\partial v_\theta / \partial z = u_* / \kappa z$  (5)

Eq. (5)를 Eq. (3)에 대입하고,  $z = h$ 와  $r = r_c$ 를 대입하고, 편수위 상승의 영향을 무시하고 중심 곡률에서 종방향 기울기의 영향은  $\partial z_\theta / \partial \theta \approx 0$ 을 적용시키면 (Odgaard, 1986), Eq. (3)은 다음과 같다.

$$v_{r_c} \frac{\partial v_\theta}{\partial r_c} + \frac{v_\theta}{r_c} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_\theta v_{r_c}}{r_c} = - \frac{u_*^2}{h} \quad (6)$$

여기서, 아래첨자  $c$ 는 수로 내 중심선상의 곡률이다. 이후의 유도과정은 Rozovskii(1957)의 유도과정과 같다. 본 연구에서 개발된 식은 다음과 같다.

$$v_\theta = \sqrt{\left\{ U \left[ 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \right] \right\}^2 + \left[ \frac{3}{\kappa^3} \frac{\sqrt{g}}{C} \left( \frac{U^2}{r_c} \right) h (1 - \eta) - \frac{2u_*^2 r_c}{h} \right] \Delta \theta} \quad (7)$$

### 5. 이론식의 적용성

본 연구에서 관측된 자료와 Eqs. (2), (4) and (7)의 계산값들을 비교하였다(Fig. 6). 본 연구에서 개발된 Eq. (7)에 적용된 변수들에 대한 값은  $R_c = 0.92 \text{ m}$ ,  $h = 0.15 \text{ m}$ , 지름 2 mm 여과사를 이용하여 수로에 부착했기 때문에 Strickler(1923)의 Chezy 계수를 적용하였다. 이론식에 적용한 수리학적 변수들은 다음과 같다.  $C = 21.1 (R_h/d_{20})^{1/6} \approx 39 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ,  $R_h = 0.085 \text{ m}$  그리고 von Karman 상수 값은  $\kappa = 0.45$ 이다. 30° 단면까지는 관측자료 및 계산된 값들이 로그분포를 만족하고 있으나, 60° 단면부터는 관측자료는 로그분포를 만족하지 않고 있다. Eq. (2)는 급변곡선 수로에서 종방향 유속의 연직분포는 항상 일정하며, Eq. (4)의 계산값은 자유표면에서 항상 일정하고 곡률반경을 따라서 수체의 하단 부분에서 그 값들이 증가되고 있으며, 관측값과 일치되지 않고 있다. 그러나 Eq. (7)의 계산값은 관측값과 잘 일치하는 경향을 보여주고 있으며, 곡률반경을 따라서 최대 유속 발생 위치도 잘 일치하고 있다.

본 연구에서 종방향 유속의 연직분포 변화를 규명하기 위해서 설치된 실험수로는 수심에 비하여 폭이 작은 경향이 있다. 이와 같은 수로는 실제로 자연하천에는 볼 수 없다. 그러나 산지하천이나 인위적으로 조성할 수 있는 하천이다(Blanckaert, 2002). 본 연구의 실험조건과 비교하여 수심에 비하여 폭이 넓은 실험수로에서

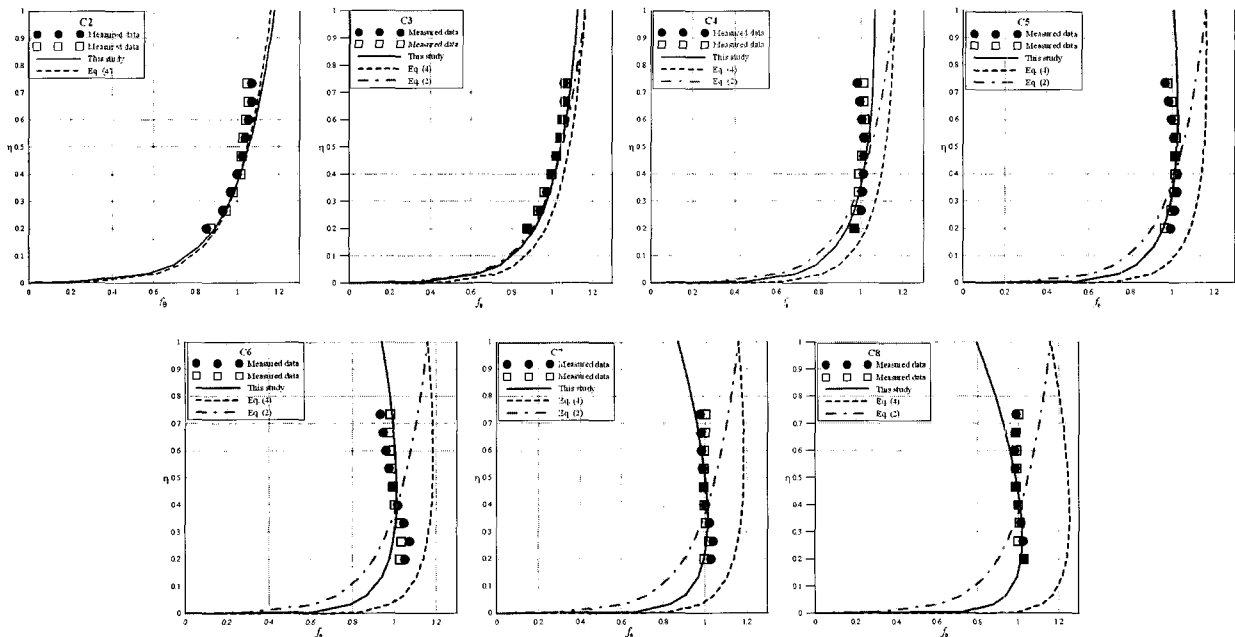


Fig. 6. Comparison of vertical  $f(\eta)$  profiles

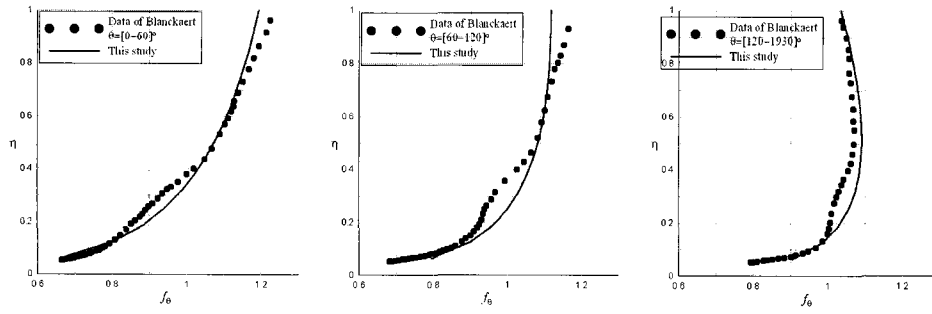


Fig. 7. Comparison of the measured and the calculated data

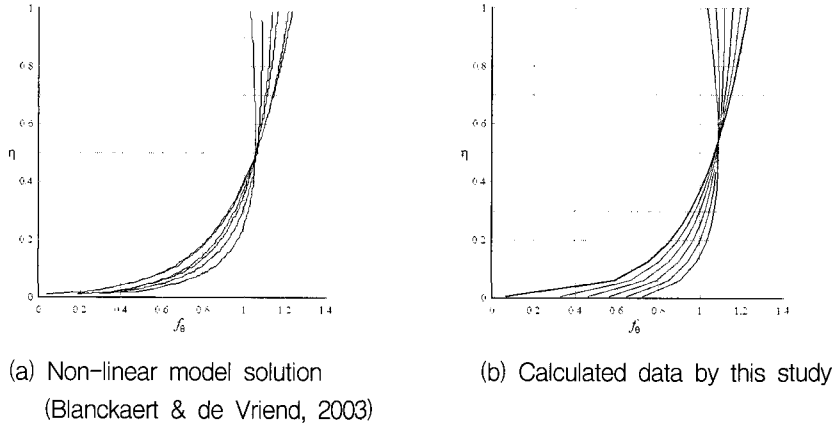


Fig. 8. Evolution of vertical profiles of longitudinal velocity

관측된 Blanckaert(2002)의 종방향 유속분포 값들을 취득하여 Eq. (7)의 계산값과 비교하였다(Fig. 7). Blanckaert(2002)의 실험수로는 9 m의 직선구간과 연결된 곡률반경  $R_c = 1.7$  m, 수로폭  $B = 1.3$  m, 수심  $h = 0.159$  m, 193°의 곡선수로이며, 유입 유량조건  $0.089$  m<sup>3</sup>/s에서 만곡부 내 15° 간격으로 중심선 상에서 종방향 유속의 연직분포를 관측하였다. Fig. 7에서 관측된 연직방향의  $f(\eta)$  분포는 0°-60°, 60°-120°, 120°-193°에서 관측된 자료들을 각각 평균한 값들이다. 본 연구에서 계산된 값과 Blanckaert의 관측자료는 잘 일치함을 보여주고 있다.

Blanckaert and de Vriend(2003)는 만곡부에서 이차류와 유속 분포를 예측하기 위해서 비선형모형을 개발하였다. 본 연구에서는 Blanckaert and de Vriend(2003)가 개발한 비선형모형으로부터 모의된 종방향 유속값[Fig. 8(a)]과 Eq. (7)의 계산값[Fig. 8(b)]을 비교하였다. 모형에서 채택한 수리학적 변수들  $U = 0.43$  m/s,  $u_* = 0.04$  m/s,

$C = 34$  m<sup>1/2</sup>/s, 그리고  $\kappa = 0.4$ 의 값을 Eq. (7)에 적용하였다. Fig. 8(a)에서 연직방향의  $f(\eta)$  분포는  $\eta \approx 0.5$ 와  $f_\theta \approx 1.1$ 에서 방향 전환 지점이고, 종방향 유속의 연직분포 기울기가 변화되는 구간은  $f_\theta$ 의 값이 1에서 1.2이다. Fig. 8(b)의 계산값도 비선형모형으로부터 모의된 결과값과 잘 일치함을 보여주고 있다.

## 6. 결론

사행하천에서 종방향 유속의 연직분포 및 최대유속 발생지점에 대한 정보는 하천에서 관측자료 측정 및 사행하천의 흐름 특성 및 혼합과정 이해에 도움을 줄 것으로 예상된다.

본 연구에서는 종방향 유속의 특성을 파악하기 위해서 중심각이 180° 순환수로에서 실험을 수행하였다. 3차원 유속장 측정은 측방 음파 도플러 유속계를 이용하였다. 역법칙 또는 로그법칙 형태로 구성된 기존의 종방향 유속식들은 지형학적 원인에 상관없이 종방향 유속의 연직분포 기울기는 항상 증가하며,  $\partial u / \partial z > 0$ , 최대 유속은 항상 자유표면에서 발생한다. 그러나 급변 만곡부에서 종방향 유속을 관측한 결과 만곡부 유입부 부근에서는 로그분포를 만족하나, 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포 기울기는 점점 평평해지면서, 수체의 아래부근에서 최대 유속이 발생하는 것을 관측하였다. 실험결과 곡선수로에서 곡률 변화는 종방향 유속의 연직분포 변화 및 최대 유속 발생 지점에 영향을 미치는 것을 발견하였다.

만곡부에서 종방향 유속의 연직분포가 변화되는 현상을 예측하기 위해서 종방향 운동방정식에 와점성 개념을 도입하여, Rozovskii(1957)의 식을 개선한 새로운 식을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 식은 관측자료와

잘 일치하며, 곡률 변화에 따른 종방향 유속의 연직분포 변화 현상을 잘 예측하고 있다. 또한 식의 적용성을 검토하기 위해서 본 연구에서 실험한 수로보다 수심에 비하여 수로 폭이 넓은 수로에서 관측된 Blanckaert (2002)의 관측자료와 비교 검토한 결과, 본 실험수로에서 관측된 종방향 유속의 연직분포와 유사한 현상을 보여주고 있으며, 개발된 식의 계산값도 잘 일치하고 있다. 만곡부에서 이차류와 유속 분포를 예측하기 위해서 Blanckaert and de Vriend(2003)에 의해 개발된 비선형 모형으로부터 모의된 종방향 유속값과 비교한 결과, 개발된 식의 계산값과도 잘 일치하고 있다.

본 연구에서 관측된 자료 및 개발된 식은 사행하천에서 흐름 특성을 관측하고자 하는 관측자들에게 도움을 줄 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- Baek, K. O. (2004). *Transverse mixing in meandering channels with unsteady pollutant source*. Ph.D. Thesis, Seoul National Univ., Korea.
- Blanckaert K. (2002). *Flow and turbulence in sharp open channel bends*. Ph.D. Thesis, Ecole Polytech. Fd. Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- 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.
- Chiu, C. L. and Tung, N. C. (2002). "Maximum velocity and regularities in open-channel flow." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 390-398.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
- Coleman, N. (1981). "Velocity profiles with suspended sediment." *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 19, No. 3, pp. 211-229.
- Coles, D. (1956). "The law of the wake in the turbulent boundary layer." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 191-226.
- 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.
- Francis, J. B. (1878). "On the cause of the maximum velocity of water flowing in open channels being below the surface." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, May
- Gordon, L. (1992). *Mississippi river discharge*. RD Instruments, San Diego, Calif.
- Keulegan, G. H. (1938). "Laws of the turbulent flow in open channels." *J. of Research, National Bureau of Standards*, Vol. 21, No. 12, pp. 707-741.
- 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.
- Lee, K. S. (2003). *Foundations of theoretical hydraulics*. 3rd Edition, SaeRon.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. and Miller, J. P. (1995). *Fluvial processes in geomorphology*. Dover, New York.
- Odgaard, A. J. (1986). "Meander flow model. I: Development." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1136.
- Prandtl, L. (1942). *Führer durch die Stömungslehre*. Vieweg, Braunschweig.
- Rozovskii, I. L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*. Ac. Sc. Ukr. SSR, Isr. Progr. Sc. Transl., Jerusalem.
- Shiono, K. and Muto, Y. (1998). "Complex mechanisms in compound meandering channel with overbank flow." *J. Fluid Mech.*, Vol. 326, pp. 221-261.
- Stearns, F. P. (1983). "A reason why the maximum velocity of water flowing in open channels is below the surface." *Transactions of ASCE*, Vol. 7, pp. 331-338.
- Stricker, A. (1923). *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformeln*. Rep. No. 16, Amt. f. Wassertschaft, Bern, Switzerland.
- Tominaga, A. and Nezu, I. (1991). "Turbulent structure in compound open channel flows." *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 117, pp. 21-41.
- 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.

(논문번호:06-89/접수:2006.08.22/심사완료:2006.11.07)