

# 급변곡선수로에서 이차류에 의한 유속분포 변화 Evolution of Velocity Distribution due to Secondary Currents in Sharp Open Channel Bend

김태원 \*, 박재현 \*\*, 이길성\*\*\*, 임창화\*\*\*\*

Tae Won Kim, Jae Hyeon Park, Kil Seong Lee, Chang Hwa Lim

## 요지

중방향 유속의 연직분포 흐름 특성을 파악하기 위해서 중심각이 180°인 급변곡선수로에서 실험을 수행하였다. 3차원 유속장 측정은 side-looking ADV를 이용하였다. 실험결과, 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라서 최대 중방향 유속이 하상 근처에서 발생하였으며, 이차류에 의한 이송모멘텀의 분포 값이 바뀌는 단면에서 중방향 유속의 연직분포가 대수분포를 만족하지 않음을 파악하였다. 직선하천과는 달리 만곡부 내에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 중방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상과 관련된 메카니즘은 지형학적 원인에 의한 원심력 작용은 이차류를 발생시키며, 이로 인해 이송 모멘텀이 중방향 유속의 연직분포를 변형시킨다.

**핵심용어** : 중방향 유속의 연직분포, 이송 모멘텀, 급변곡선수로

## 1. 서론

유속은 크게 중방향, 횡방향, 연직방향, 그리고 이차류(secondary current)로 분류할 수 있다. 이차류의 크기는 최대 중방향 유속의 대략 4 % 정도이고(Tominaga와 Nezu, 1991), 사행하천 내에서 최대 중방향 유속에 대략 10-16 % 정도이며, 횡방향 유속은 대략 10 % 정도이다(Shino와 Muto, 1998). 이처럼 하천에서 가장 중요한 수리학적 변수는 중방향 유속분포이다.

기존연구자들(Rozovskii, 1957; Kikkawa 등, 1976; Zimmermann과 Kennedy, 1978; Odgaard, 1986)은 로그법칙(log-law) 또는 멱법칙(power law) 형태의 중방향 유속의 연직분포 식을 개발하여 개수로 흐름장에서 연직방향 전 구간에 대하여 적용하여왔다. 이들 식들의 특징은 중방향 유속의 연직분포 기울기는 항상  $\partial u/\partial z > 0$ 이며, 최대 유속 발생 지점은 항상 자유표면에서 존재한다. 여기서,  $u$ 는 중방향 유속,  $z$ 는 연직방향이다. 그러나 직선하천에서는 자유표면의 영향으로 인해 velocity dip 현상이 발생하며, 사행하천의 경우 최대 중방향 발생 지점이 하상 근처에서 발생한다고 제안되었다(Nezu와 Rodi, 1985; de Vriend, 1981; Blanckaert, 2002; Blanckaert와 de Vriend, 2003). 특히 사행하천의 경우 이차류에 의한 이송모멘텀은 중방향 유속의 연직분포 기울기를 변형시키며, 이차류와 중방향 유속 사이의 피드백 현상(feedback phenomenon)이 존재한다고 제안하였다. 피드백 현상이란 이차류에 의한 이송모멘텀 전달로 인해 중방향 유속의 연직분포 기울기가 대수분포에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 중방향 유속의 연직분포 기울기가 변형되는 현상이다. 즉 중방향 유속의 연직분포 기울기가  $\partial u/\partial z > 0$ 에서  $\partial u/\partial z < 0$ 가 되는 현상을 말한다.

\* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · E-mail: ktw@websolus.co.kr  
\*\* 정회원, 인제대학교 토목공학과 조교수 · E-mail: jh-park@inje.ac.kr  
\*\*\* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · E-mail: kilselee@snu.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원, 인제대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: lchsan@hanamil.net

피드백 현상으로 인한 종방향 유속의 연직분포 기울기가 변형되는 현상을 고려하지 않고 자유표면 유속 계를 이용하여 표면 유속 값을 취득하여 단면 평균유속으로 사용하였을 경우 큰 오차를 발생할 수 있다. 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. 또한 종방향 확산계수를 추정함에 있어서 종방향 유속을 로그분포로 가정하였다. 로그분포 또는 멱함수 형태의 식들을 하천에 적용할 경우 실제 종방향 유속의 연직분포 값과는 차이가 발생할 것이며, 특히 만곡부가 교호적으로 나타나는 사행하천에 적용하기에는 타당하지 않다고 사료된다.

본 연구에서는 중심각이 180°인 단일 만곡부 내에서 흐름이 하류로 진행함에 따라 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상과 관련된 수리학적 메카니즘을 파악하고자 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 조건

급변곡선수로에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포를 관측하기 위해서 실험을 수행하였다. 인공 순환수로는 40 × 40 cm의 직사각형 단면이며 아크릴로 제작되었다(그림 1). 곡률반경은 0.92 m이다. Side-looking ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 중심각이 180°단일 만곡부에서 30° 간격으로 수심 15 cm에서 *s*, *r*, *z* 방향의 순간 유속을 측정하였다. 여기서 *s*는 종방향, *r*은 횡방향이다. 유속계 샘플링 주파수는 50 Hz이며, 자료 취득시간은 160 초이다. 측정 격자는 수로 폭 방향으로 0.025 m, 수심방향으로 0.01 m 간격으로 순간유속을 측정하였다. 유속 측정은 완전히 발달된 흐름(fully developed flow) 조건하에서 수행되었다. 본 연구에서는 매끈한 수로와 지름 2 mm 여과사를 부착하여 조도의 영향을 고려한 고정상 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 고정상 모형수로에서 소요 조도계수를 결정하기 위해서 하상에서 평균 모래 입경,  $d_r$ 에 대한 식은 다음과 같다(Lee, 2003). 실험조건은 표 1과 같다.

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

$R_p$ 는 원형에서의 동수반경,  $R_m$ 는 실험실 모형에서의 동수반경,  $Y_r$ 은 수평방향 축척비이다.

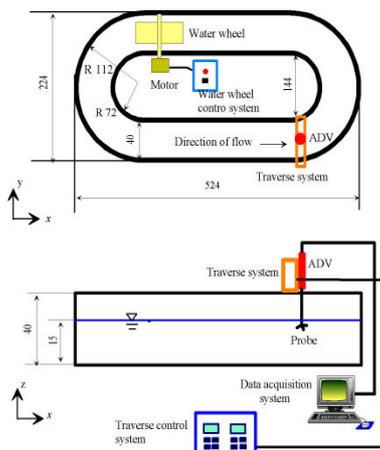


그림 1. 실험수로 모식도

표 1. 실험조건

Case	Depth (m)	$U$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	Re ( $\times 10^3$ )	Fr
1	0.15	0.363	0.017	95	0.299
2		0.459	0.023	120	0.379
3		0.376	0.055	93	0.296
4		0.486	0.073	116	0.370

\*  $U$ : 평균유속,  $u_*$ : 전단유속, Re: Reynolds 수, Fr: Froude 수

### 3. 결과분석

급변곡선수로에서 종방향 유속의 접선방향 유속분포를 조사하기 위해서 Case 3에 대하여 수심평균된 종방향 유속벡터를 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 실선은 최대 종방향 유속의 이동경로이다. Callander(1978)는 만곡부 유입부 안쪽벽 부근과 유출부 바깥쪽벽 부근에서 최대 종방향 유속이 발생한다고 제안하였다. 만곡부 유입부로부터 상류 50 cm 직선구간 내 관측단면(S1)에서 최대 종방향 유속벡터는 중앙부에 위치하였다가 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 최대 종방향 유속벡터가 만곡부 유입부 안쪽벽 부근에서 나타났으며 점차 바깥쪽벽 부근으로 이동됨을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 기존 연구결과와 잘 일치하고 있다. 그림 3은 관측된 단면에서 최대 종방향 유속 지점을 도시한 그림이다. 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 최대 종방향 유속지점이 하상근처에서 발생함을 보여주고 있다(단면 C5부터 단면 C8). 그림 4는 급변곡선수로 내 관측된 단면에서 종방향 유속의 연직분포를 도시한 그림이다. 그림 4에서 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 순간유속자료로부터 섭동유속을 소거한 평균유속 값들이다. 그림 4에서 기호  $\times$ 는 폭 평균된 종방향 유속이며, 기호  $\square$ 는 그림 2에서 최대 종방향 유속 벡터의 이동경로에 해당하는 지점에서 수심 평균된 종방향 유속으로 정규화된 종방향 유속의 연직분포도이다. 최대 종방향 유속 벡터의 이동경로에 해당하는 지점에서 종방향 유속의 연직분포와 폭 평균된 종방향 유속의 연직분포를 비교한 결과, 종방향 유속의 연직분포는 일치하는 경향을 보여주고 있다. 그림 3에서 단면 C3까지는 비교적 대수분포를 만족하지만 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포가 대수분포를 만족하지 못하고 있으며, 수체의 아래 부분에서 최대 종방향 유속이 발생하는 현상을 보이고 있다. 본 실험에서 관측된 종방향 유속의 연직분포는 기존 연구 결과(Rozovskii, 1957; de Vriend, 1981; Blanckaert, 2002)와 잘 일치함을 보여주고 있다. 기존 연구자들(de Vriend, 1981; Blanckaert, 2002)은 이차류는 모멘텀 전달에 영향을 미치며 모멘텀은 유속 및 전단응력을 재분포 시킨다고 제안하였다. 본 연구에서는 종방향 운동량 방정식 (2)에서 이차류에 의한 이송 모멘텀 항을 관측된 자료를 이용하여 각 단면에서 분석하였다.

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} = - \left[ \left( \frac{v_s}{r} \frac{\partial v_s}{\partial s} + U_r \frac{\partial v_s}{\partial r} + \frac{v_s U_r}{r} \right) + \left( v_r^* \frac{\partial v_s}{\partial s} + \frac{v_s v_r^*}{r} + v_z \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) \right] - \frac{g}{r} \frac{\partial z}{\partial s} - \left( \frac{\partial \overline{v_r' v_s'}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \overline{v_r'^2}}{\partial s} + \frac{\partial \overline{v_s' v_z'}}{\partial z} + \frac{2 \overline{v_r' v_s'}}{r} \right) \quad (2)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $U_r$ 은 수심평균된 횡방향 유속,  $v_r^*$ 은 이차류에 의한 횡방향 유속( $v_r - U_r$ ),  $g$ 는 중력가속도,  $\overline{v_s'}, \overline{v_r'}, \overline{v_z'}$ 는 각각 시간평균된 종방향, 횡방향, 연직방향 섭동유속이다.

Blanckaert(2002)는 종방향 운동량 방정식 (2)를 차수분석(order analysis)을 수행한 결과 단면 흐름에 의한 이송모멘텀 전달은 무시할 수 있다고 제안하였다. 그리고 이차류에 의한 이송모멘텀 전달 항,  $(v_r^* \partial v_s / \partial r + v_s v_r^* / r + v_z \partial v_s / \partial z)$  중에서  $v_z \partial v_s / \partial z$ 는 무시할 수 있다고 제안하였다. 그 이유는 이차류에 중요한 영향을 미치는 유속은 횡방향 유속이기 때문이다. 그림 5는 이차류에 의한 이송 모멘텀 전달을 항을 도시한 그림이다. 이차류에 의한 이송 모멘텀 전달을 분석한 결과, 단면 C3에서는 수체의 윗부분에서 양의 값을 나타내고 있으며 수체의 아래 부분에서는 음의 값을 나타내고 있다. 이송 모멘텀 값이 양의 의미는 유속이 빠르다는 것을 의미한다. 단면 C4의 안쪽벽 부근에서 이송 모멘텀 값의 부호가 단면 C3와 비교하여 변화되는 현상이 발생하였으며 그림 4에서 단면 C4에서 종방향 유속의 연직분포가 수체의 윗부분에서 편평해지는 현상이 발생하였다. 단면 C5에서는 단면 C3와 비교하여 영을 기준으로 수체의 윗부분과 아래 부분에서 이송 모멘텀 값이 바뀌는 현상이 발생하였으며, 그림 4에서 종방향 유속의 연직분포가 단면 C5에서 대수분포를 전혀 만족하지 못하고 수체의 아래 부분에서 유속이 빠르게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 Blanckaert(2002)의 결과와도 잘 일치한다.

S1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	S9
직선구간 상류 50 cm 지점	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	직선구간 하류 50 cm 지점

\* 그림에서 각 기호에 대한 단면

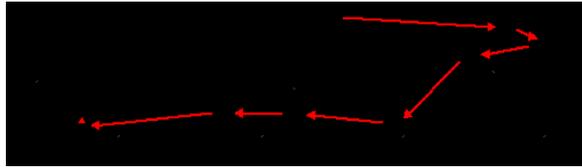
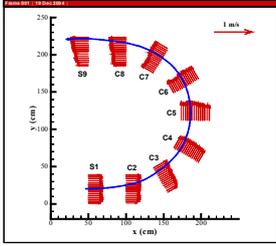


그림 2. 수심평균된 종방향 유속벡터도

그림 3. 최대 종방향 유속 발생 지점

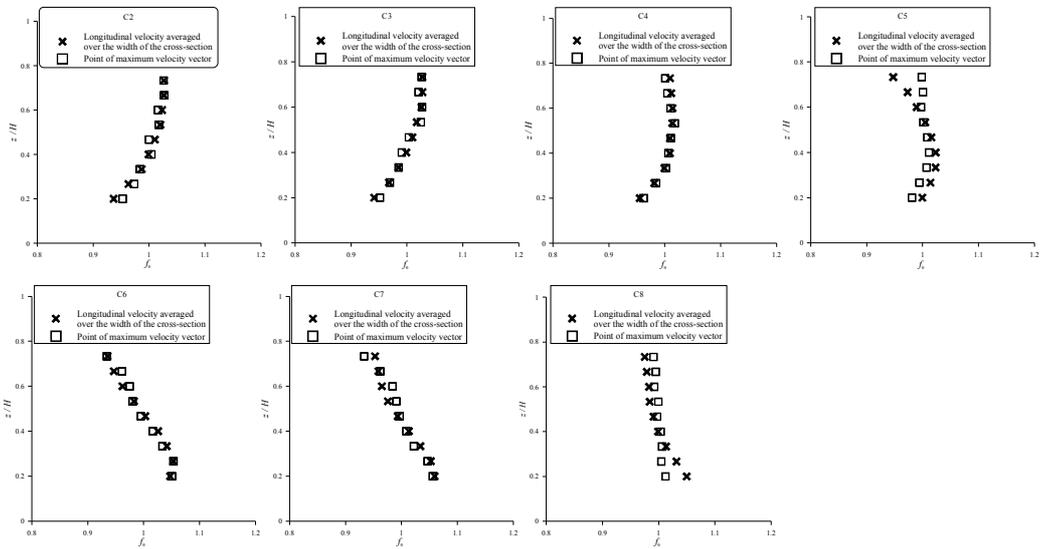


그림 4. 종방향 유속의 연직분포

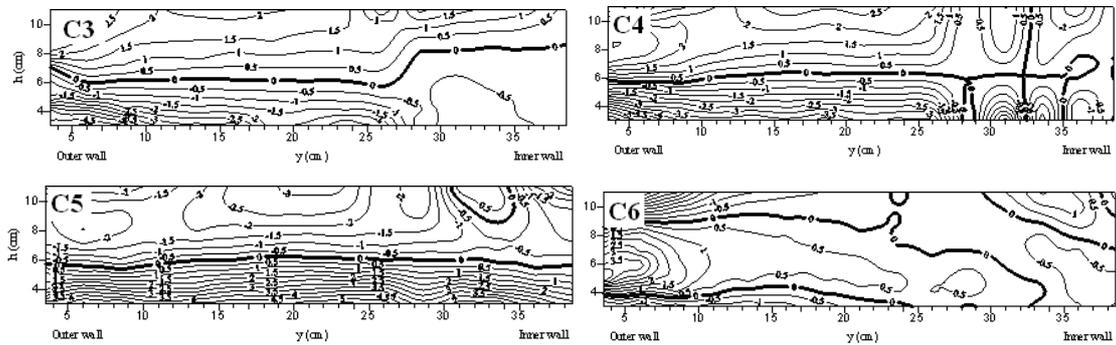


그림 5. 이송 모멘텀 등고선도

#### 4. 결론

본 연구에서는 날카로운 급변곡선수로 내에서 이차류에 의한 이송모멘텀과 종방향 유속의 연직분포 현상을 관측하였다.

수심 평균된 종방향 유속 벡터도의 경우 급변곡선수로 유입부 안쪽벽 부근에서 최대 유속이 발생하였으며, 유출부 바깥쪽벽 부근에서 최대 종방향 유속이 발생하는 현상을 확인하였다. 최대 종방향 유속은 급변곡선수로 유입부 안쪽벽 부근에서는 수체의 윗부근에서 발생하였으며 흐름이 하류 방향으로 진행함에 따라 나선형으로 이동하여 만곡부 유출부 바깥쪽벽 부근에서는 수체의 아래부근에서 발생하였다.

종방향 운동량 방정식에서 이차류에 의한 이송 모멘텀을 분석한 결과 이송 모멘텀 값이 급변 곡선수로 내 단면 C4까지는 수체의 윗부분에서 양의 값이 분포되어 있으며, 수체의 윗부분에서 종방향 유속이 빠르게 나타났다. C5 단면에서는 수체의 아래부분에서 양의 값이 분포되어 있으며, 수체의 아래 부근에서 종방향 유속이 빠르게 나타났다.

직선하천과는 달리 만곡부 내에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라서 종방향 유속의 연직분포가 변형되는 현상과 관련된 메커니즘은 지형학적 원인에 의한 이차류 발생으로 이송모멘텀 전달이 종방향 유속의 연직분포를 변형시키는 것으로 사료되며, 이와 같은 결과는 기존의 연구결과 잘 일치한다.

#### 참고문헌

- 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.
- Callander, R. A. (1978). "River meandering." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 129-158.
- 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.
- Lee, K. S. (2003). *Foundations of theoretical hydraulics*. 3<sup>rd</sup> Edition, SaeRon.
- 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.
- 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.
- Tominaga, A., and Nezu, I. (1991). "Turbulent structure in compound open channel flows." *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 117, pp. 21-41.
- 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.