

## 2차류의 연직 및 흐름방향 분포식

### Equation on Vertical and Streamwise Profile of Secondary Flow

백경오\*, 서일원\*\*

Kyong Oh Baek, Il Won Seo

#### 요 지

사행수로에서 만곡양상에 따라 변화하는 2차류의 연직 및 흐름방향 분포를 이론적으로 예측하기 위해 Odgaard (1986) 및 Chang (1988)의 제안을 바탕으로 새로운 이론식을 유도하였다. 개발된 이론식은 2차류의 횡방향 유속을 주 흐름 및 연직방향의 함수로 표현한다. 이를 검증하기 위해 실험실에 사행도가 각기 다른 두 개의 사행수로를 제작하여 수리실험을 수행하였다. 수리실험결과를 제안된 이론식 및 기존 식과 비교해 보면, 제안된 식은 실측치에 잘 일치하는 반면 기존 식은 과대 산정하는 경향이 있었다. 제안된 이론식을 통해 수리량이 변화하는 경우 2차류가 어떻게 변하는지를 확인해 본 결과, 사행도, 조도, 하폭 대 수심비가 클수록 2차류는 증가하였다. 또한 조도 및 하폭 대 수심비의 변화에 따라 2차류의 흐름방향 분포가 민감하게 반응하였다.

**핵심용어:** 사행수로, 2차류, 이론식, 사행도, 조도, 하폭대 수심비

#### 1. 서론

사행하천에서 발생하는 2차류는 주흐름에 비해 그 크기는 상대적으로 작지만 유사 이동, 하상과 제방의 침식 및 퇴적, 그리고 하천 지형 변형 등에 지대한 영향을 미친다. 일반적으로 2차류 연구에 있어서 연직방향 유속은 그 크기가 작아 무시되며, 횡방향 유속만을 고려인자로 삼는다. 특히 횡방향 유속의 연직분포에 관한 연구는 그 동안 다수의 연구자들에 의해 수행된 바 있다 (Rozovskii, 1957; Engelund, 1974; Kikkawa 등, 1976; Vriend, 1977; Odgaard, 1986; Blanckaert 과 Vriend, 2004; 등). 2차류의 연직분포가 일정할지라도 교호하는 만곡부로 구성된 수로에서는, 2차류의 크기와 회전방향이 흐름방향을 따라 변화하므로 이에 대한 연구도 반드시 수행되어야 한다. 하지만 연직분포에 관한 연구에 비해 흐름방향에 따른 2차류의 변화 양상을 분석한 연구는 그다지 많지 않다. 본 연구에서는 만곡수로에서 주흐름 방향에 따라 변화하는 2차류의 양상을 이론적으로 예측하기 위해 Odgaard (1986)와 Chang (1988)의 제안을 바탕으로 새로운 방정식을 개발하였다. 개발된 방정식을 검증하기 위해 실험실에 사행도가 서로 다른 두개의 만곡수로를 제작하여 수리실험을 수행하였다. 실험을 통해 2차류의 거동 특성을 파악하고, 이를 이론식과 비교, 분석하였다.

#### 2. 이론 연구

원통좌표(cylindrical coordinate)에서 횡방향( $r$ -direction)의 운동 방정식을 유도하여 간략화 시

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 박사후 과정 · E-mail : kopaek1@kict.re.kr

\*\* 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

키면 다음과 같다(Rozovskii, 1957; Chang, 1988).

$$u \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{u^2}{r} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (1)$$

여기서  $u$ 는 흐름방향 유속,  $v$ 는 횡방향 유속,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 밀도,  $S_r$ 은 횡방향 수면경사,  $\tau_r$ 은 횡방향 전단력이다. 식(1)을 보면 만곡수로에서 2차류가 발생하는 원인이 원심력, 수면 횡경사, 및 난류의 상호작용임을 확인할 수 있다. Chang (1988)은 식(1)을 지배방정식으로 하여 표면 횡방향 유속을 흐름방향 거리에 따른 함수로 제안한 바 있다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 횡방향 유속의 흐름방향 변화양상에 관한 식을 새롭게 제안한다. 먼저 수로의 중심선을 따라 수표면에 식(1)을 적용하면 다음과 같다.

$$u_s \frac{\partial v_s}{\partial s} = \frac{u_s^2}{r_c} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad (2)$$

(I)      (II)    (III)    (IV)

여기서  $u_s$  및  $v_s$ 는 각각 수표면에서의 흐름 및 횡방향유속,  $r_c$ 는 사행반경,  $h$ 는 수심이다. 이때 식(2)의 (III)항에 있는 수면 횡경사는 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$S_r = \frac{\bar{u}^2}{gr_c} \quad (3)$$

여기서  $\bar{u}$ 는 수심평균 흐름방향유속이다. 난류가 등방성(isotropic)을 갖는다는 가정하에 (IV)항의 난류 전단력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_r = \epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4)$$

여기서  $\epsilon$ 은 와점성계수로서 다음과 같이 연직방향으로 포물선형의 분포를 갖는다.

$$\epsilon = \kappa u_* z (1 - \eta) \quad (5)$$

여기서  $\kappa$ 는 von Karman 상수,  $u_*$ 는 마찰유속,  $\eta = z/h$ 이다. 식(3) ~ 식(5)를 식(2)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial v_s}{\partial s} = \frac{\bar{u}}{r_c} \left( \frac{u_s}{\bar{u}} - \frac{\bar{u}}{u_s} \right) - \frac{2\kappa u_*}{h u_s} v_s \quad (6)$$

만곡부의 수표면에서 주흐름방향 유속( $u_s$ )값은 다음과 같이 표현할 수 있다(Rozovskii, 1957).

$$\frac{u_s}{u} = 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} = 1 + \frac{1}{m} \quad (7)$$

여기서  $C$ 는 Chezy계수,  $m$ 은 마찰항으로서 정상류인 경우 다음의 식이 성립한다(Henderson, 1966).

$$m = \frac{\kappa C}{\sqrt{g}} = \frac{\kappa R_h^{1/6}}{n \sqrt{g}} = \kappa \frac{\bar{u}}{u_*} \quad (8)$$

여기서  $R_h$ 는 동수반경,  $n$ 은 Manning의 조도계수이다. 식(7)과 식(8)을 식(6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial v_s}{\partial s} + A_2 v_s = A_1 \quad (9)$$

여기서  $A_1$ 과  $A_2$ 는 각각 다음과 같다.

$$A_1 = \frac{2m+1}{m(m+1)} \frac{\bar{u}}{r_c} \quad A_2 = \frac{2k^2}{m+1} \frac{1}{h} \quad (10)$$

식(9)는  $s$ 를 독립변수로 하는 1차 상미분방정식이므로,  $v_s$ 의 해석해를 구하면 다음과 같다.

$$v_s(s) = \left( \exp \left[ - \int A_2 ds \right] \right) \left( \int \exp \left[ \int A_2 ds \right] A_1 ds + C_1 \right) \quad (11)$$

여기서  $C_1$ 은 적분상수이다. 직사각형 단면을 갖고 사행반경이 일정한 만곡수로의 경우,  $A_1$ 과  $A_2$ 가 흐름방향에 따라 변화가 미미하므로, 이를 상수로 가정하면 식(11)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$v_s(s) = \frac{A_1}{A_2} (1 - \exp[-A_2 s]) + v_s^i \exp[-A_2 s] \quad (12)$$

여기서  $v_s^i$ 는 초기에 존재하는 2차류이다. Odgaard(1986)은 횡방향 유속의 연직분포를 수표면 유속과 결부하여 가장 간단한 형태인 선형식으로, 다음과 같이 나타낸 바 있다.

$$v = v_s(2\eta - 1) \quad (13)$$

최종적으로 식(12)를 식(13)에 대입하면 흐름방향 및 연직방향에 따른 횡방향 유속은 다음과 같다.

$$v(s, \eta) = \left\{ \frac{A_1}{A_2} (1 - \exp[-A_2 s]) + v_s^i \exp[-A_2 s] \right\} (2\eta - 1) \quad (14)$$

### 3. 이론식의 적용 및 분석

교호하는 만곡부로 구성된 수로에서 2차류의 거동 특성을 관찰 및 분석하기 위해 실험실에 사행도(sinuosity)가 다른 두개의 S자형 사행수로 제작하여 수리실험을 수행하였다. 수리실험이 수행된 두개의 수로 중 하나의 사행도는 1.52이며(M1 수로), 다른 하나의 사행도는 1.32이다(M2 수로). 두개의 수로에 대한 개략적인 평면도를 그림 1에 도시하였다. 실험을 통해 취득된 2차류 자료를 바탕으로 이론적으로 도출된 횡방향 유속의 분포식을 적용해 보았다. 먼저 횡방향 유속의 연직분포를 살펴보면 그림2에 도시하였듯이 여타 복잡한 분포식에 비해 Odgaard(1986)가 제시한 식(13)이 실험치에 잘 일치한다. 따라서 선형식을 횡방향 유속의 연직분포로 이용하는 것이 타당하다고 판단된다. 다음으로 표면 횡방향 유속의 흐름방향 분포를 살펴보기 위해 이론식과 실측치간의 비교 결과 중 대표적인 경우를 그림 3에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 새로 제안된 식이 실측치와 전체적으로 잘 일치하고 있는 반면, Rozovskii (1957)의 제안식은 표면 유속을 과대 산정하고 있다. 특히 Rozovskii (1957)의 식은 교호부를 지나면서 기존 회전셀이 급격히 사라지고 새로운 셀이 빠르게 생성되는 것처럼 묘사하고 있으나, 실제 실험결과는 셀의 생성 및 소멸이 완만히 진행된다. 새로 제안된 이론식은 이러한 과정을 비교적 잘 재현하고 있다. 사행도에 따른 2차류를 보면, 동일한 흐름 조건에서 사행도가 큰 M1 수로에서 M2 수로에 비해 더 큰 2차류가 발생한다.

본 연구에서 새로 제안된 이론식(식 12)를 바탕으로 수리량의 변화에 따른 2차류의 거동 특성을 파악하였다. 여기서 식(12)에 포함되어 있는 수리량은 평균유속, 사행반경, 수심, 조도이다. 사행반경이 작아질수록 2차류가 커진다는 사실은 이미 확인되었으므로, 일정한 유량조건하에 조도 및 하폭 대 수심비에 따른 2차류의 변화 양상을 분석하였다. 먼저 M1 수로에 조도만 변화시킨 결과를 그림 4a)에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 조도가 커질수록 2차류의 크기도 증가하고 있다. 또한 조도가 작은 경우( $n=0.01$ ), 2차류가 만곡이 끝나는 지점(S6, S11)까지 꾸준히 증가하고 있는 반면, 조도가 큰 경우( $n=0.04$ )에는 만곡의 정점부(S4, S9)에서 이미 최대치에 가까운 2차류가 형성된다. 이는 수리실험과 일치하는 결과로써 조도가 작은 경우 첫번째 만곡부에서 생성된 회전셀이 두 번째 만곡부까지 지속되면서 새로운 회전셀의 생성을 더디게 하기 때문이다. 조도가 큰 경우는 회전셀의 생성과 소멸이 더욱 신속히 진행되면서 만곡의 정점부에서부터 최대치의 2차류가 발생한다. 다음으로 M1 수로에 조도와 유량이 일정한 조건하에서 평균수심을 변화시킨 경우, 2차류의 거동 특성을 그림 4b)에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 하폭 대 수심비가 증가할수록 2차류의 크기도 증가하고 있다. 이러한 현상은 Blanckaert (2001) 및 서일원 등 (2004)의 실험 연구를 이론적으로 뒷받침하는 결과이다. 또한 하폭 대 수심비가 증가할수록 만곡의 정점부에서부터 강한 2차류가 형성됨을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 다중 만곡부로 구성된 수로에서 주흐름 방향에 따른 2차류의 거동 특성을 이론 및 실험 연구를 통해 분석하였다. 수리실험결과와 개발된 이론식 및 기존의 식을 비교해 보면, 개발된 식은 실측치에 잘 일치하는 반면 기존 식은 과대 산정하는 경향이 있었다. 개발된 이론식을 통해 수리량이 변화하는 경우, 2차류가 어떻게 변하는지를 확인해 본 결과, 조도가 크고 하폭 대 수심비가 클수록 2차류는 증가하였다. 또한 조도 및 하폭 대 수심비의 변화에 따라 2차류의 흐름 방향 분포가 민감하게 반응하였다.

## 참고문헌

1. 서일원, 성기훈, 백경오, 정성진 (2004). "사행수로에서 흐름특성에 관한 실험적 연구." 한국수자원학회 논문집, 37(7), 527-540.
2. Blanckaert, K. (2001). "A model for flow in strongly curved channel bends." *Proc. 29th IAHR Congress*, Beijing, China.
3. Blanckaert, K., and Vriend, H. J. (2004). "Secondary flow in sharp open-channel bends." *J. Fluid Mech.*, 498, 353-380.
4. Chang, H. H. (1988). *Fluvial processes in river engineering*. John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
5. Engelund, F. (1974). "Flow and bed topography in channel bends." *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 100(11), 1631-1648.
6. Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., N.Y.
7. Kikkawa, H., Ikeda, S., and Kitagawa, A. (1976). "Flow and bend topography in curved open channels." *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 102(9), 1327-1342.
8. Odgaard, A. J. (1986). "Meander-flow model I: development." *J. Hydraul. Eng.*, 112(12), 1117-1136.
9. Rozovskii, I. L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*. Academy of Science of Ukrainian SSR, Russia.
10. Vriend, H. J. (1977). "A mathematical model of steady flow in curved shallow channels." *J. Hydraul. Res.*, 15(1), 37-54.

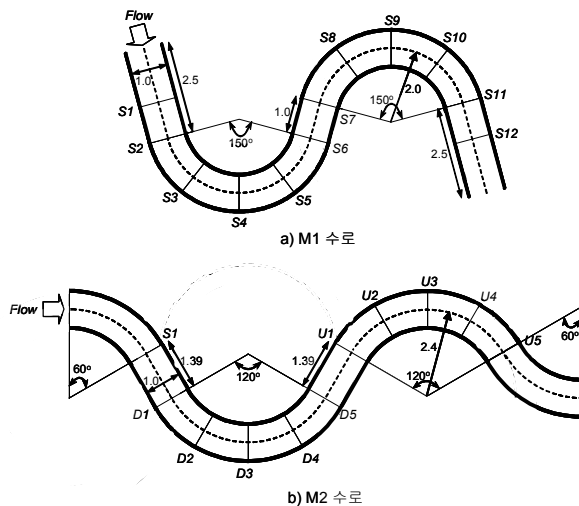


그림 1. 실험실 사행수로의 평면도

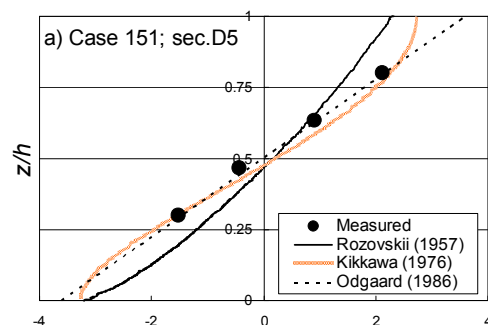


그림 2. 횡방향유속의 연직분포

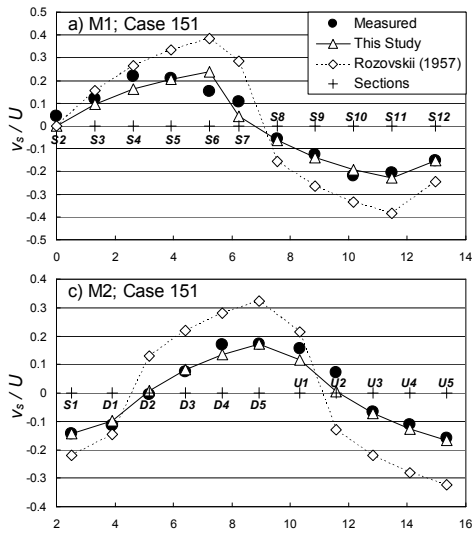


그림 3. 표면 횡방향 유속의 흐름방향 분포

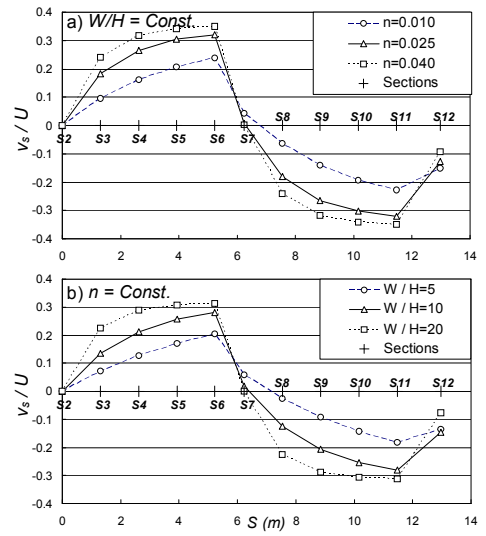


그림 4. 수리량 변화에 따른 흐름방향분포