

만곡수로에서의 편수위 상승 산정모형에 관한 연구

A Study of Superelevation Models in Curved Channels

○ 김윤태* 김지호** 박영진** 송재우***

1. 서론

자연하천의 형태학적 특성에는 여러가지가 있으나 가장 대표적인 것이 사행현상이며, 이러한 하천의 사행성향은 홍수시 하도의 불안정, 취수구의 유지관리 및 기능저하, 제방의 파괴, 그리고 수공구조물의 국부세굴에 따른 하천제해와 밀접한 관계가 있다.

사행하천의 흐름특성과 만곡부에서의 종·횡방향 수면경사 및 하상경사는 원심력으로 인한 유로의 비선형 유선, 양안의 수면차, 이차흐름, 하상변형 등의 복합적인 영향을 받게되므로 상호종속적인 관계를 갖게 된다.

만곡부 흐름에 대한 이론을 체계화한 Rozovskii¹¹⁾는 2차원 유속측정을 포함한 만곡유로에서의 동역학적 흐름에 관한 실험을 실시하였으며, 이동하상과 고정하상을 갖는 90° 단일만곡부에 대한 실험으로 만곡부의 출구에서 많은 침식이 일어나고, 유로하상의 변형은 횡방향 흐름작용과 외측안을 향한 최대유속 발생위치의 이동에 기인한다는 것을 보여주었다.

A. Shucky¹²⁾, Knapp⁹⁾ 등은 수위, 유속, 마찰계수와 나선운동의 강도 등에 관한 연구를 하였으며, Iowa 대학의 수리연구실에서 수행된 90° 만곡을 이룬 균등한 사다리꼴 단면에 대한 연구를 한 바 있는 Yen¹⁵⁾은 유속과 경계전단응력분포, 양안의 수면차와 나선운동에 관한 연구에 필요한 자료를 제시하였다. A.M. Falcon과 J.F. Kennedy⁷⁾는 운동량 모멘트와 힘의 평형해석으로 유속특성과 저면마찰의 영향을 분석하였다. 국내의 연구로서 고재웅¹⁾, 송재우²⁾, 윤세의³⁾ 등이 유로만곡부의 흐름변화 및 하상변동에 관한 연구를 발표한 바 있으나 만곡수로의 흐름특성에 관한 연구는 부분적으로 이루어지고 있을 뿐 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구는 수리모형실험을 통해 얻어진 실측값과 기존의 좌우수면차를 예측할 수 있는 산정모형들을 비교분석하여 만곡수로에 적합한 모형을 제시하고, 양안의 수면차를 산정하는데 그 목적이 있다.

2. 만곡부의 흐름특성과 횡방향 수면경사

유로만곡부에 대한 유속과 수심분포가 그림 1에 정의 되었다. s 축은 유로중심을 따라서 흐름방향으로 +인 축이며, n 축은 s 축에 직각이고 외측계방쪽으로 +인 축이며 또한, z 축은 흐름하상에서 수면방향으로 수직인 축이다. s, n, z 방향의 유속성분은 각각 u, v, w 이다.

또한, 그림 2와 같은 만곡부의 유체요소에 대한 힘의 평형조건은 다음과 같다

$$R_s - \Delta p + T = 0 \tag{2.1}$$

여기서, R_s : 원심력, Δp : 내외측의 압력차, T : 하상의 횡방향 마찰력

Rozovskii¹¹⁾는 만곡부의 1차원 흐름해석에서 원심력을 다음과 같이 표현하였다.

$$R_s = \alpha \frac{U^2}{r} \rho dr r d\theta h \tag{2.2}$$

여기서, α : 평균계수(averaging factor)로서 $\alpha = 1 + \frac{g}{\kappa^2 C^2}$

* 홍익대학교 토목공학과 대학원
 ** 홍익대학교 토목공학과 박사과정
 *** 홍익대학교 토목공학과 교수

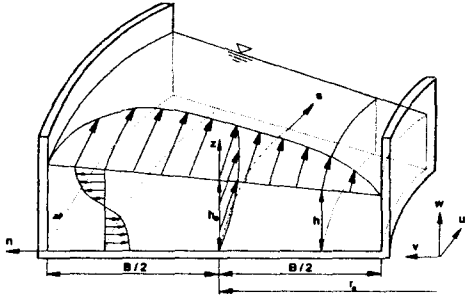


그림 1. 유로만곡부의 횡단면 정의도

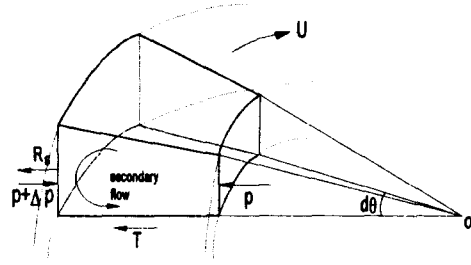


그림 2. 유체요소애 작용하는 힘의 성분

내외측의 압력차 Δp 는 다음식으로 표현되며

$$\Delta p = \frac{d}{dr} \left(\gamma g \frac{h^2}{2} \right) r d\theta dr = r d\theta dr \rho g h \frac{dh}{dr} \quad (2.3)$$

하상의 횡방향 마찰력 T 는 다음과 같다.

$$T = \tau_{bs} r d\theta dr \quad (2.4)$$

여기서 τ_{bs} : s방향 바닥마찰응력

$\tau_{bs} \approx 0$ 일 때 횡방향으로 평형조건에 적용하면 횡방향 수면경사인 dh/dr 은 다음과 같이 산정된다.

$$\frac{dh}{dr} = I_r = a \frac{U^2}{gr} \quad (2.5)$$

Shukry¹²⁾의 실험결과에 의하면 수로의 곡선부에서 최대유속이 되는 점을 연결한 선은 만곡부로 부터 상류측 단면에서의 정상적인 경로로 부터 편기됨을 알 수 있다. $U = c/r$ 인 비회전류의 경우에 내측과 외측의 수면경사는 다음과 같다.

$$I_r = \frac{c^2}{2Bg r_0^2 r_i^2} (r_0^2 - r_i^2) \quad (2.6)$$

Ippen⁸⁾은 흐름을 1차원으로 가정한 경우, 유속분포를 자유와와 강제와로 가정하여 횡방향 수면경사를 다음과 같이 구하였다.

$$I_r = \frac{U^2}{2g} \frac{2}{r_c} \left(\frac{1}{1 - B^2/4r_c^2} \right); \text{자유와}, I_r = \frac{U^2}{2g} \frac{2}{r_c} \left(\frac{1}{1 - B^2/12r_c^2} \right); \text{강제와} \quad (2.7)$$

Grashof¹³⁾는 Newton의 제2법칙을 각각의 유선에 적용한 후 그 식을 전수두단면에 관하여 적분함으로써 수면형이 대수곡선으로 표시되는 다음식과 같은 수면경사식을 제시하였다.

$$I_r = 2.30 \frac{U^2}{Bg} \log \frac{r_o}{r_i} \quad (2.8)$$

Woodward¹⁴⁾는 유속이 양안에서는 0, 중심부에서 유속을 포물선 변화로 가정하고 수면경사를 다음과 같이 제시하였다.

$$I_r = \frac{U^2}{g} \left[\frac{20}{3} \frac{r_c}{B} - 16 \frac{r_c^3}{B^3} + \left(\frac{4r_c^2}{B^2} - 1 \right)^2 \ln \frac{2r_c + B}{2r_c - B} \right] \quad (2.10)$$

3. 비교 및 검토

3.1 수리모형 제원 및 실험방법

수리모형 실험장치는 유로의 폭 B 가 0.5m이고, 만곡부 유입 직유로부와 180° 만곡부 그리고 만곡부 유출 직유로부로 이루어져 있고, 만곡부의 유로중심선을 따른 곡률반경 r_c 는 2.25m이다.

수리모형실험은 3가지 유량조건(5 l/sec, 10 l/sec, 15 l/sec)에서 이루어졌으며 유량측정은 고수조의 구형위어에서 측정하였으며, 유속은 180° 만곡부에서 만곡이 시작되는 유입부(No. 8)에서부터 유출부(No. 12)까지 흐름방향으로 15° 간격으로 측정점을 설정하고 각 측정점에서 횡방향으로 5cm씩 분할하여 각각 9지점, 총 117개 측정점에서 측정하였고 수심은 횡방향으로 내측안($r/r_c = 0.91$), 외측안($r/r_c = 1.09$)의 2지점을 측정하였다.

3.2 수리모형실험 결과분석

일반적인 수리모형실험에서 횡방향의 유속분포는 곡률반경 및 하폭과 같은 실험제원과 중심각의 변화 및 저면 마찰조건에 따라 많은 영향을 받게된다. 또한, 만곡유입부에서 흐름은 내측안 부근에서 가속작용이 발생하고 외측안 부근에서는 감속작용이 발생하여, 내측안으로부터 외측안으로 이동되는 운동량 이송현상이 발생되므로 나선운동이 발달되면서 횡방향 수면경사는 다시 감소되는 현상을 나타낸다.

De Vriend⁶⁾의 실험에 의하면 180° 만곡수로에서의 유속 재분포구간은 45° ~ 135° 로 추정되었으며, 모형실험을 통하여 비교적 일치되는 결과를 나타내었다.

흐름방향 유속분포는 유량의 증가에 따라 유속은 측정별로 증가하는 비례관계를 가지며, 유속분포 또한 유량이 증가할 수록 변동폭이 증가하는 경향을 보였다. 그림 3에 보이는 것과 같이 비회전류인 직유로부의 유속이 만곡의 유입부에서는 내측안 부근에서 최대유속을 나타내었으며, 30° 지점을 지나면서 최대유속이 외측안으로 편기되었다. 그후 만곡 정점부를 지나 충분히 발달된 흐름특성을 보이는 105° 지점에서 최대유속이 외측안($r/r_c = 1.09$)에 발생되었으며 135° 를 지나면서 만곡유출부에 이르기까지 점차 최대유속이 중심부로 변화하는 경향을 보이고 있다.

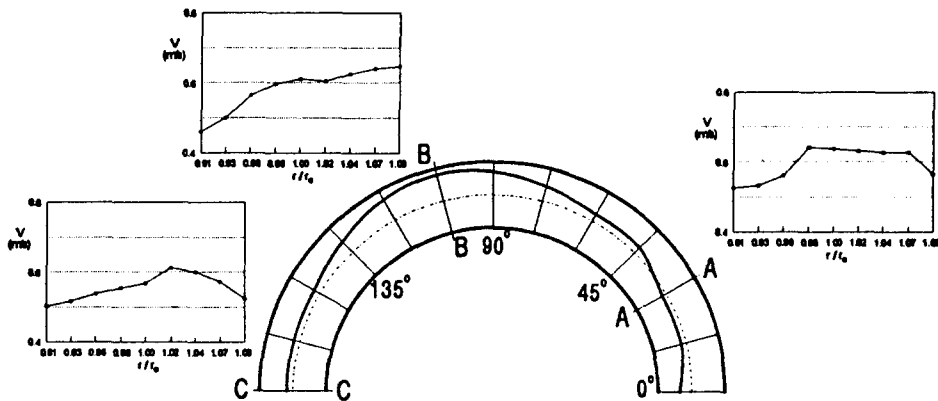


그림 3 만곡각도에 따른 최대유속 분포도 (15 l/sec)

그림 4에는 측정별 양안수면차를 나타내었다. 수리모형실험결과 그림 4에서와 같이 만곡 유입부에서부터 양안의 수면차가 증가하기 시작하여, 최대유속이 발생하는 105° 지점에서 가장 크게 나타났으며, 45° ~ 90° 구간에서 수면차가 작아지는 것은 벽면의 영향을 받은 것으로 사료된다.

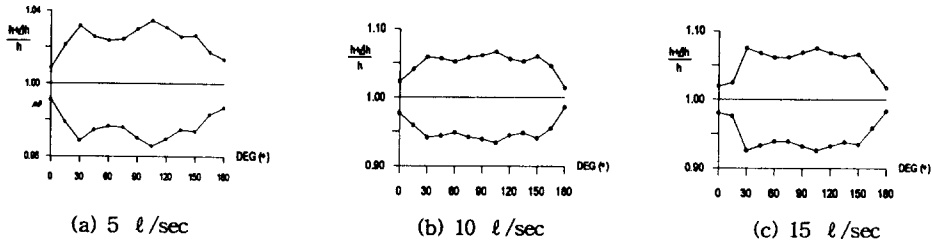


그림 4. 측정별 양안수면차

r/r_c	• : 1.09 , ° : 0.91
---------	---------------------

3.3 횡방향 수면경사 산정모형의 비교 및 검토

만곡부에서 횡방향수면경사 산정모형을 비교해 본 결과, ROZ모형은 Chezy계수와 곡률반경, SHU모형은 곡률반경, 그 외의 모형은 곡률반경과 하폭에 의해 양안의 수면차가 결정됨을 알 수 있었다.

실제 자연하천 만곡부의 경우 불규칙한 사행성향과 횡단면 형상으로 인해 유로중심선 곡률반경, 내측안 곡률반경, 그리고 외측안 곡률반경이 달라지므로 유속과 함께 양안 수면차에 직접적인 영향을 미치지만 일정한 곡률반경과 횡단면 형상을 갖는 실험수로의 경우 단면 평균유속이 양안수면차에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

실측된 횡방향 수면경사와 ROZ, SHU, GRA, WOO, IPP1, IPP2모형에 의한 예측값을 실측 수면경사와 비교한 결과는 그림 5에 나타내었다.

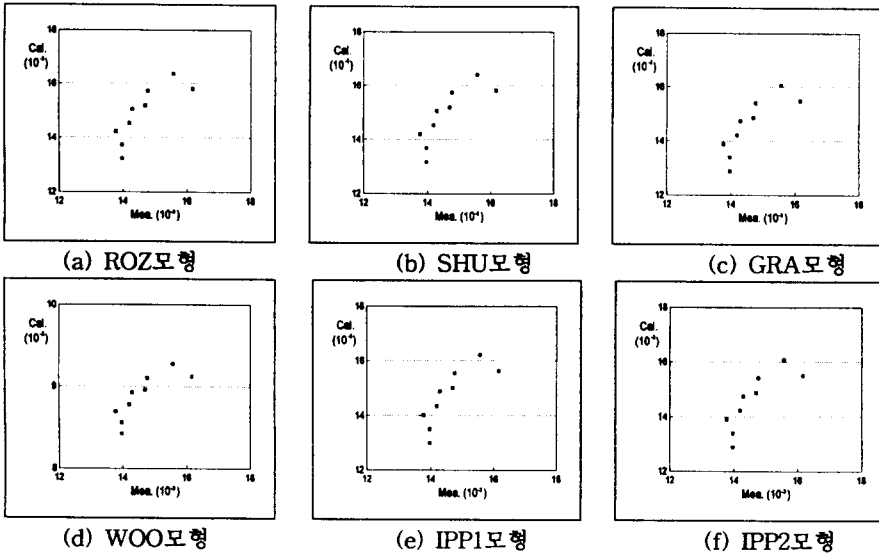


그림 5. 실측값과 예측값의 상관도 (15 l/sec)

산정된 모형들의 횡방향 수면경사는 유량조건이 서로 다른(5 l, 10 l, 15 l) 경우의 실험에서 모든 모형 값이 실측값보다 과소추정되는 경향을 나타내었으며, ROZ모형이 비교적 횡방향 수면경사를 잘 예측하는 경향을 보였으며 WOO모형이 가장 작은 예측값을 나타냈다.

또한, 유량이 변화함에도 이러한 경향은 동일하였으며 유량이 증가할 수록 산정되는 횡방향 수면경사의 각 모형별 차이가 증가함을 알 수 있다. 이는 유량에 따른 흐름방향 유속의 증가 뿐만 아니라 만곡부에서 이차류의 발달로 인한 영향 때문일 것으로 사료된다.

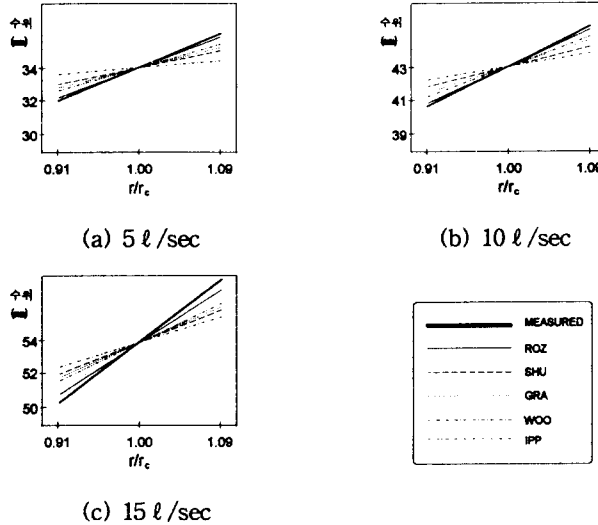


그림 6. 유로만곡부 최대횡방향 수면경사 ($\theta=105^\circ$)

그림 6과 같이 횡방향 수면경사는 만곡점정부를 지나면서 105° 지점에서 최대 횡방향 수면경사를 보인 후 점차 감소하였으며, 이는 최대유속선의 분포와 일치함을 알 수 있었다.

유량의 변화에 대한 횡방향 수면경사의 변화를 최대 횡방향수면경사가 발생되는 105° 지점의 경우에 대하여 비교한 결과, 그림 7과 같이 유량이 2배로 증가할 때 2.4배, 유량이 3배로 증가할 때 3.5배로 증가하여 횡방향 수면경사가 유량의 변화에 대해 약 1.2배로 증가함을 관측할 수 있었다.

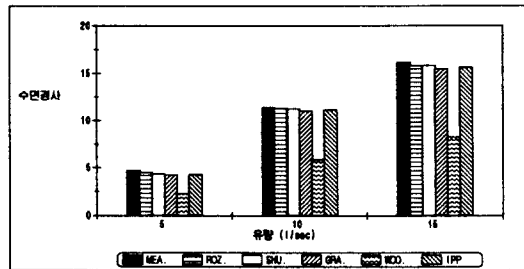


그림 7. 유량변화에 따른 수면경사의 변화도 ($\theta=105^\circ$)

본 연구에서는 유로만곡부의 정량적인 해석을 위하여 유동특성에 의한 만곡부 횡방향 수면경사를 예측하기 위하여 기존의 산정모형들을 고정상 수리모형실험에 적용하여 보았으나, 실제하천은 이동상 하상을 갖

고 있으며 특히 홍수시 파농도 흐름에 따른 마찰력의 증가 및 와류의 발달등이 고려된 횡방향 수면경사 산정모형의 개발이 필요할 것이다.

4. 결 론

유로만곡부에서의 횡방향수면경사와 산정모형들을 수리모형실험에 적용, 분석해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 3가지 유량조건(5, 10, 15 l/sec)의 수리모형실험을 한 결과 최대유속선은 모든 유량조건에 대해서 만곡 진입부 내측안을 따라 발생하다 외측안으로 편기되는 경향을 보였고, 만곡정점부를 지나면서 105° 지점에서 최대유속이 발생하였으며, 이 지점에서 최대 횡방향 수면경사와 양안수면차가 발생하였다.

2. 유량의 변화에 대한 횡방향 수면경사의 변화는 105° 지점의 경우, 유량의 변화에 대해 약 1.2배로 증가함을 관측할 수 있었다.

3. 수리모형실험에서 전체적으로 모형의 산정값은 ROZ모형이 관측값을 가장 잘 예측하였고, SHU, GRA, IPP1 그리고 IPP2모형은 유사한 결과를 보였으며, WOO모형은 상대적으로 낮은 예측값을 보임으로서 본 실험조건에는 적합하지 않은 모형으로 판명되었다.

5. 참고문헌

- 1) 고재용(1975). "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연구." 한국수문학회지, 제8권 제2호, pp.75~80.
- 2) 송재우(1980). "우리나라 하천의 사형특성에 관한 연구." 박사학위논문, 연세대학교 대학원.
- 3) 윤세의(1986). "수심이 얇은 고정상 만곡수로에서의 흐름특성 해석." 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
- 4) 이종태, 윤세의(1987). "개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름특성", 대한토목학회논문집, 제7권, 제3호, 1987, pp.195~202.
- 5) Chow, V.T.(1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, pp.439~486.
- 6) De Vriend and Geldof, H.J.(1983). "Main Flow Velocity in Short River Bends." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.109, No.7, pp.991~1011.
- 7) Falcon, A.M. and Kennedy, J.F.(1983). "Flow in Alluvial-River Curves." *J. of Fluid Mechanics*, Vol.133, pp.1~16.
- 8) Ippen, A.T. and Drinker, P.A.(1962). "Boundary Shear Stresses in Curved Trapezoidal Channels." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.88, No.5, pp.289~302.
- 9) Knapp, R.T.(1951). "Design of Channel Curves for Supercritical Flow." *Trans.*, ASCE, Vol. 116, pp.296~325.
- 10) Leschziner, M.A. and Wolfgang Rodi.(1979). "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.105, No. HY10, pp.1297~1314.
- 11) Rozovskii, I.L.(1957). *Flow of Water in Bends of Open Channels*. Academy of the Ukrainian SSR Institute of Hydrology and Hydraulic Eng.
- 12) Shukry, A.(1950). "Flow Around Bends in an Open Flume." *Trans.*, ASCE, Vol.115, 1950, pp.751~779.
- 13) Steffler, P.M. and Peterson, A.W.(1985). "Water Surface at Change of Channel Curvature." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.111, No.5, pp.866~870.
- 14) Woodward, S.M. and Posey, C.J.(1941). *Hydraulics of Steady Flow in Open Channels*. John Wiley and Sons, New York, p.112.
- 15) Yen, C.L. and Yen, B.C.(1971). "Water Surface Configuration in Channel Bends." *J. of Hydraulics Div.*, Vol. 97, No. HY2, pp.303~321.