

홍수터를 가진 사행하천에서의 부정류해석

Unsteady Flow Analysis in Meandering Rivers with Floodplains

한 건 연*, 박 재 홍**, 이 종 석***
HAN Kun Yeun, PARK Jae Hong, LEE Jong Seok

1. 서 론

그림 1과 같은 홍수터를 가진 사행하천에서의 부정류 해석은 수리특성치들이 하도의 기하학적 형상에 따라 급격하게 변화함으로 인하여 수치 불안정을 일으키게 된다. 사행하천에서 홍수파가 주하도를 범람하며 홍수터를 통하여 유하하는 경우에는 하도의 유하거리가 현저하게 감소할 수 있고 하폭은 크게 증가하게 된다. 이때 흐름경로의 단축현상이 발생하고 이러한 특성은 홍수터의 하도 경사가 커질수록 더욱 현저하게 나타난다. 본 연구에서는 사행성을 가진 복합단면 하도에 대하여 확장된 Saint-Venant 식에 의한 사행도 모형을 개발하였고, 기존 모형의 문제점을 분석하였다. 다양한 사행성과 홍수터의 물리, 기하학적 특성을 고려하여 사행하도에서의 홍수전달특성을 해석하였다.

2. 사행도 모형의 기본 방정식

사행도를 가진 복합하도단면에 대한 1차원 부정류의 기본 방정식은 (1), (2)식과 같은 연속 방정식과 운동량 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} - q(s) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial s} + gA\left(\frac{\partial v}{\partial s} + S_f(s)\right) = 0 \quad (2)$$

(1), (2)식의 적용에 있어서는 흐름은 1 차원적이고, 유선의 만곡도와 연직가속도는 무시할만하

* 경북대학교 토목공학과 부교수

** 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 경북대학교 대학원 토목공학과 석사과정

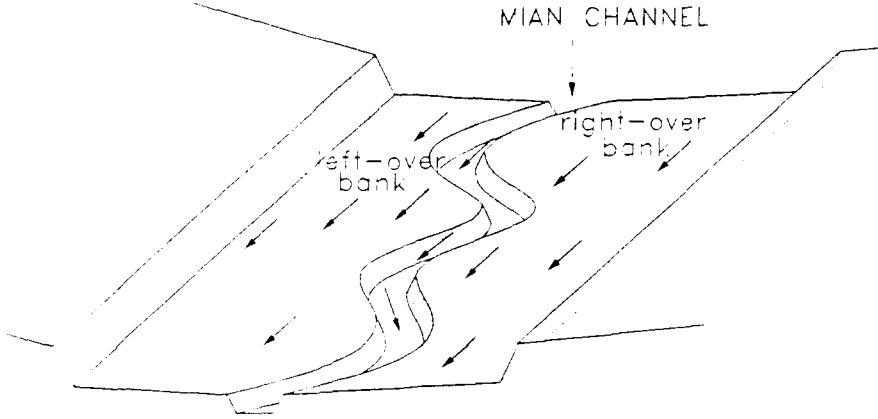


그림 1. 홍수터를 가진 사행하천

며, 난류와 마찰의 효과는 정상상태에 제시된 저항법칙에 의하여 적절히 기술될 수 있는 것으로 고려하였으며 하도경사는 충분히 완만한 경우 등의 기본가정에 의하여 기술되었다.

(1), (2)식을 s-t 좌표계내에서 수표면에 대해 적분하면 (3), (4)식과 같은 적분형 방정식이 유도된다.

$$\iint \left(\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial s} - q(s) \right) ds dt = 0 \quad (3)$$

$$\iint \left(\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial s} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial s} + S_f(s) \right) \right) ds dt = 0 \quad (4)$$

(3), (4)식에 Green의 정리를 적용하고, 수로거리 Δs 가 시간에 따라 변화하는 s-t 좌표계로 부터 기준거리 Δx 가 시간에 독립적인 x-t 좌표계로 변환시키기 위하여 $ds = M dx$ 가 성립하는 거리환산계수 M 을 도입하면 (5), (6)식과 같이 정리된다.

$$-\oint A M dx + \oint Q dt - \iint q(x) dx dt = 0 \quad (5)$$

$$-\oint Q M dx + \oint \frac{Q^2}{A} dt + \iint gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} + S_f(x) \right) dx dt = 0 \quad (6)$$

이제, x 좌표가 홍수터 거리이고 s 좌표가 최심선의 위치에 놓여 있다고 하면 M은 사행도로 고려될 수 있다. (5), (6)에 대해 Green의 정리를 다시 적용하여 적분형 방정식을 얻은후 x 와 t에 대해 미분하면 (7), (8)식과 같은 사행도를 고려한 연속방정식과 운동량 방정식이 유도될 수 있다.

$$\frac{\partial(AM_a)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q(x) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(QM_q)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_A + \frac{\partial y}{\partial A} \Big|_x \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (8)$$

이제 (7), (8)식은 기존의 Preissmann 기법에 의하여 차분화하고 Newton-Raphson 방법에 의해 그 해를 구할수 있었다.

3. 기존해석 모형의 문제점

홍수터를 가진 사행하는 하도구간에 대해서는 (1), (2)식을 변형하여 홍수터와 주수로로 분리하여 사행도에 따라 유하거리를 각각 달리하여 계산하고 유량과 통수면적을 (9), (10)식과 같이 전체 수로에 대해 합산하는 방법이 지금까지 널리 사용되어 왔다.

$$\frac{\partial A_C}{\partial t} + \frac{\partial A_L}{\partial t} + \frac{\partial A_R}{\partial t} + \frac{\partial Q_L}{\partial x_L} + \frac{\partial Q_R}{\partial x_R} + \frac{\partial Q_C}{\partial x_C} - q(x) = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_C}{\partial t} + \frac{\partial Q_L}{\partial t} + \frac{\partial Q_R}{\partial t} + \frac{\partial(Q_L^2/A_L)}{\partial x_L} + \frac{\partial(Q_R^2/A_R)}{\partial x_L} + \frac{\partial(Q_C^2/A_C)}{\partial x_C} \\ & + gA_L \left(\frac{\partial y_L}{\partial x_L} + S_{fL} \right) + gA_R \left(\frac{\partial y_R}{\partial x_R} + S_{fR} \right) + gA_C \left(\frac{\partial y_C}{\partial x_C} + S_{fC} \right) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 첨자 L, R, C는 왼편 홍수터, 오른편 홍수터, 주수로로 각각 의미한다.

각각의 하도길이가 시간에 대한 상수로 가정하고 측방유입량을 무시하면 연속방정식은 (11)식

과 같다.

$$\sum_i \frac{1}{m_i} \left(m_i \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} \right) = 0 \quad (11)$$

이제, (7)식을 주수로부와 좌,우 홍수터를 분리하여 나타내면 (12)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_i \left(m_i \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} \right) = 0 \quad (12)$$

(11)식과 (12)식을 정리하면 (13)식을 얻게 된다.

$$\sum_i \left(\frac{1}{m_i} - 1 \right) \left(m_i \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} \right) = 0 \quad (13)$$

일반적으로 (13)식은 0 이 되지 않음을 쉽게 알 수 있고 따라서 (11)식은 질량보존이 되지 못하고 있다. (11)식과 (12)식은 흐름이 정상류 상태이고 $m_L = m_R = m_C$ 이거나 사행도가 없을 경우에는 동일하다. 그러므로 (13)식이 0 이 되지 않는 경우에는 (11)식은 질량을 보존하지 못한다. 마찬가지로 유사한 과정이 운동량방정식에도 적용될 수가 있는데 기존의 분리하도 모형에 적용된

식으로는 역시 운동량도 보존되지 못한다. 따라서 분리하도 모형에 의하여 주수로 및 좌우 홍수터 수로에 대하여 독립적 기술한 미분 방정식은 주수로와 홍수터 수로의 거리가 상이한 경우에는 질량 및 운동량 보존이 되지 않음을 수식을 통하여 알 수 있었다.

4. 적용 및 비교검토

사행도 모형을 기존의 분리하도 모형과 비교하기 위해 구형 단면을 갖는 사행하는 복합하도에 대하여 수치실험을 실시하였다. 사행도가 1.0, 1.5, 2.0, 주수로와 좌,우 홍수터의 조도계수를 0.035 및 0.07, 하폭을 각각 100 m, 298.5 m, 주수로부의 수심을 3 m 로 설정하였으며 하천의 제방에서 주수로 방향의 홍수터 경사는 0.0016, 하도구간의 길이는 80 Km 이고 측방유입은 고려하지 않았다.

기존의 방법중 널리 쓰이는 분리하도 모형의 특성을 사행도 모형과 비교하기 위하여 상류단의 임의의 유입수문곡선에 대한 하류단에서의 유출수문곡선을 도시하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 사행도가 1.0 인 경우에는 앞절에서 기술된대로 하류단에서 두 모형이 잘 일치하고 있었으나 사행도가 커질수록 첨두유량과 첨두도달시간에 대한 편차가 커짐을 발견할 수 있었다.

두 모형에 대한 질량보존을 검정하기 위하여 두 모형의 하류단에서 첨두유량에 이를때 까지 유입유량으로부터 유출유량을 제하여 그 값이 하도내의 저류된 유량과 비교되었다. 이 과정은 많은 계산량을 필요로 하기는 하나 모형자체의 정확성을 판단하기 위한 합리적인 방법이다. 계산결과 사행도 모형은 사행의 정도에 관계없이 1.5 - 1.8 % 정도의 오차로 비교적 잘 질량이 보존되고

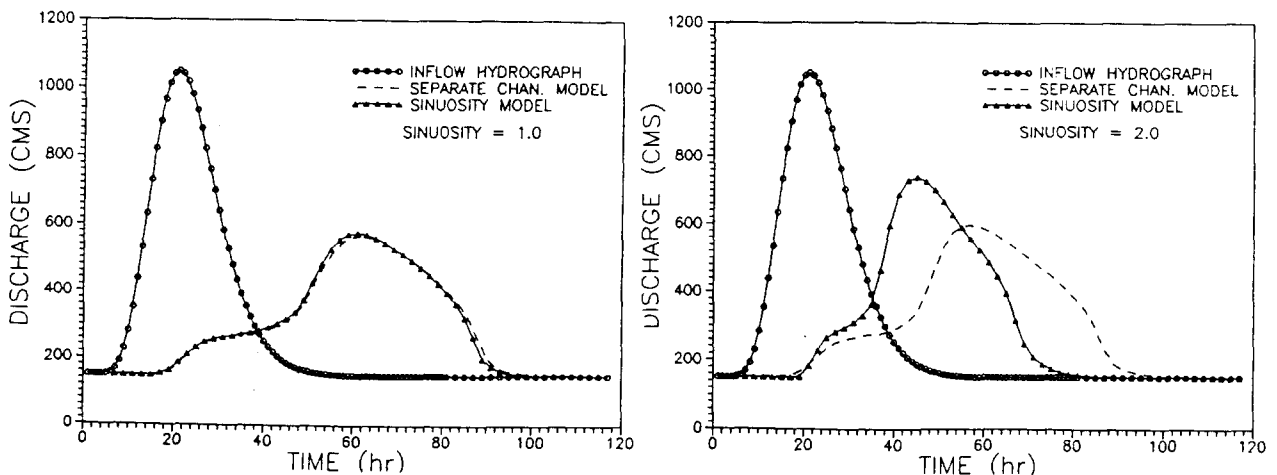


그림 2. 사행도 모형의 유출수문곡선

있었는데 이 오차량은 수로내의 저류된 유량의 계산과정에서 발생한 절단오차와 이산화 과정에 의한 오차로서 비교적 작은 양으로 사료되었다. 분리하도 모형은 사행도가 1.0 인 경우에는 질량 오차로서 잘 보존하였으나 사행도가 1.5, 2.0 인 경우에 각각 질량보존 오차가 9.1 %, 27.4 % 로서 매우 크게 나타났다. 이는 (13)식에서 유도된 바와 같이 방정식 자체가 내포하고 있는 수식화 과정에서의 오류가 실제 적용에 있어서도 그대로 증명해 보인 결과로서 기존의 관련서적에 널리 기술된 바 있는 분리하도 모형이 사행하는 하도구간에 대하여는 적용될 수 없음을 확인하였다.

사행도를 가진 하천의 홍수 전달특성을 파악하기 위해서 사행도 모형과 기존의 모형과 비교검토 하였다. 사행도 모형, 저류 모형 및 합성단면 모형에 대한 감쇠 특성을 그림 3 에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 저류모형은 두 다른 모형에 비하여 홍수량의 커다란 감쇠를 발생하였다. 유량이 크고 사행도가 없는 경우 합성단면 모형은 사행도 모형과 유사하게 나타났고 사행도가 증가할수록 합성단면 모형의 결과가 사행도 모형에 의한 계산결과와 벗어나고 있었다. 홍수도 달시간의 특성은 그림 4에 나타나 있다. 저류모형의 경우 도달 시간이 크게 나타나 다른 두 모형 보다 큰 차이가 있었고 합성단면 모형은 사행도와 침투 유량이 증가함에 따라 사행도 모형과의 큰 차이를 나타내고 있었으며 사행도의 감소에 따라 사행도 모형과 합성단면모형의 결과는 근접하게 나타났다. 합성단면 모형은 넓은 홍수터 위를 흐름이 확산될때 하폭의 급격한 증가로 인해 계산의 어려움이 발생하는 문제를 가지고는 있으나, 주수로와 홍수터의 조도계수 차이의 감소, 사행도의 감소 및 홍수터 하폭의 감소에 따라 합성단면의 결과는 사행도 모형의 결과에 접근함을 알 수 있었다.

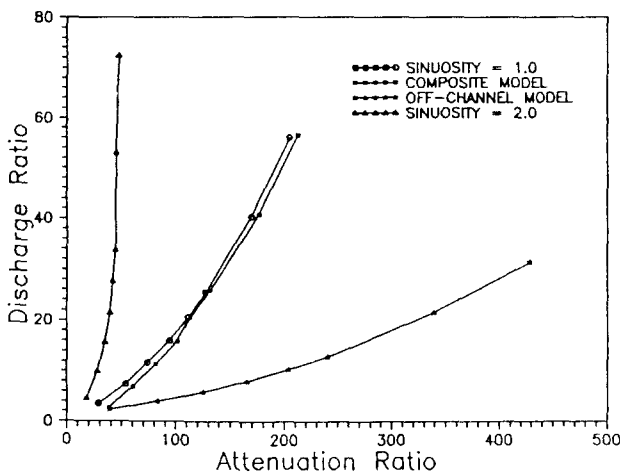


그림 3. 사행도 모형의 감쇠특성

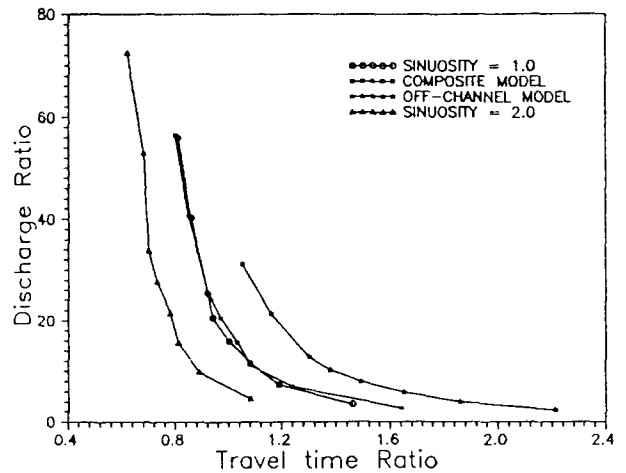


그림 4. 사행도 모형의 유하시간 특성

5. 결 론

- (1) 홍수터를 가진 사행하천에서의 부정류해석에 있어 기존의 분리하도 모형이 가지고 있던 질량, 운동량의 비보존성 문제를 극복하고 질량과 운동량을 보존할 수 있는 사행도 모형을 개발하였다.
- (2) 본 연구에서의 사행도 모형은 홍수터의 영향을 고려하는 기존의 저류 모형, 합성단면 모형 및 분리하도 모형과 비교 검토하였다. 사행도 모형에 대한 질량보존의 오차는 1% 내외로 나타났으나 기존의 분리하도 모형의 경우는 1.5 - 2.0의 사행도에서 9 - 27%에 달하는 큰 오차가 발생하였다.
- (3) 사행도 모형에 대한 수치실험 결과, 사행도가 감소할수록 감쇠비와 도달시간비는 증가하였다. 본 모형은 넓은 홍수터를 가지며 사행하는 국내 하천에서의 부정류 해석에 적용성이 클 것으로 판단되었다.

< 참고 문헌 >

- (1) Abida, H. and Townsend, R. D.(1994), "A model for routing unsteady flows in compound channels ", J. of Int. Assoc. Hydraulic Research. Vol. 32, No. 1, 145-153.
- (2) Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W.,(1988), "Applied hydrology ", McGraw-Hill, 326-330
- (3) DeLong, L. L.(1988), "Mass conservation : 1-D open channel flow equations ", J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 115, No. 2, 263-269.
- (4) Fread, D. L.(1988), "DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model", NWS Report, Office of Hydrology, NWS.
- (5) French, R. H.(1985), "Open-channel hydraulics", McGraw-Hill, 572-574.
- (6) Froehlich, D. C.(1989), "Discussion of mass conservation : 1-D open channel flow equations", J. of Hyd. Eng., ASCE, 1078-1082.