

# 일차원 상류이송형모형의 자연하도에 대한 적용

## Application of a One-Dimensional Upwind Model for Natural Rivers

김 원\* / 한 건 연\*\* / 우 효 섭\*\*\*  
Kim, Won / Han, Kun Yeun / Woo, Hyo seop

### Abstract

The upwind model is well known to simulate shockwaves, but it is rarely applied to natural rivers because of problems caused by the source terms. Although several methods have been developed to deal with the source terms, none of them has been applied to natural rivers. This paper deals with application of the upwind model to the natural river. An implicit upwind model is applied to a hypothetical irregular channel and a natural river with highly irregular bed, width, and hydraulic structures. Different types of the flows including steady-state flow, flood wave, dam-break wave, and bore are simulated to test accuracy and applicability of the implicit upwind model. It is proved that the model can simulate various types of flows in natural rivers with high accuracy and robustness.

**keywords** : one-dimensional upwind model, natural river, discontinuous flow, source term, Han River

### 요 지

상류이송기법은 충격파 모의에 많이 사용되고 있으나 생성항의 처리 한계로 인해 자연하도에 적용된 사례는 매우 드문 상황이다. 생성항 처리를 위한 기법들이 개발되기는 하였으나 자연하도에 직접 적용될 수 있는 효과적인 기법은 없는 상황이기 때문이다. 본 논문에서는 상류이송형 일차원 음해 수치모형을 자연하도에 적용하였다. 상류이송모형은 하상과 하폭이 심하게 변화하는 가상하도와 하천구조물이 있는 실제 자연하천에 적용되었다. 또한 본 연구에서는 이 모형을 정상류, 부정류, 댐붕괴류, 보어의 전파 등 여러 가지 흐름에 적용하여 정확성과 적용성을 검증하였다. 검증결과 본 연구에서 개발된 모형은 자연하천에서 발생하는 여러 가지 형태의 흐름을 높은 정확도로 안정성있게 모의할 수 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 1차원 상류이송 모형, 상류이송, 자연하도, 불연속 흐름, 생성항, 한강

## 1. 서 론

상류이송기법(upwind scheme)은 매우 강한 충격파나 상류/사류 등이 혼재하여 발생하는 천이류 등의 해석을 위해서 사용되는 충격파 해석기법으로 수면과의 이동속도나 크기를 정확하게 계산할 수 있는 특징이

있다. 상류이송기법에서는 흐름의 상하류 방향 전파특성을 지배방정식의 고유값에 의해 공간차분에 반영할 수 있기 때문에 흐름 특성선의 실제 변화와 유한 차분에서의 공간차분이 일관성을 지니게 된다. 이와 같은 특성으로 인해 상류이송기법은 댐붕괴 흐름 또는 상류와 사류가 동시에 발생하는 천이류 등의 불연속 흐름

\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원  
Research Fellow, Water Resources Research Div., KICT, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang-si, Gyunggi-do, Korea  
(e-mail: wonkim@kict.re.kr)

\*\* 경북대학교 토목공학과 교수  
Professor, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National University, 1370, Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구위원  
Senior Research Fellow, Water Resources Research Div., KICT, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang-si, Gyunggi-do, Korea

에 많이 사용되어 왔다. Fennema와 Chaudhry (1986), Jha 등(1996)은 중앙차분기법으로 개발된 음해형 Beam and Warming 기법을 개략 Jacobian을 이용하여 상류 이송형태로 전환하여 댐붕괴 흐름 등에 적용한 바 있다. Garcia-Navarro 등(1992)은 대표적인 양해형 중앙차분기법인 McCormack 기법에서 발생하는 수치진동 문제의 해결을 위해 고정확도 기법인 TVD (Total Variation Diminishing)를 도입하여 TVD-McCormack 기법을 개발한 바 있다. Yang 등(1993)은 정규 Jacobian을 사용한 고정확도 기법인 ENO (Essentially Non-Oscillatory) 기법을 하천흐름에 적용한 바 있다. 이와 같은 기법들은 개발 초기에 하상경사, 마찰경사, 단면변화 등의 생성항이 없는 이상적인 댐붕괴과에 적용하여 기법의 정확도나 적용성을 검증한 바 있다. 또한 생성항이 있는 경우라고 하더라도 대부분 가상적인 하도 또는 소규모 댐붕괴 실험 결과에만 적용하여 모형의 정확도를 비교하였다. Jin과 Fread (1997)는 특성선에 기초한 양해 상류이송기법을 자연하도에 적용한 바 있는데 생성항과 하폭 변화 항을 기존의 방법에 의하여 처리하여 복잡한 자연하천에 적용하기에는 한계가 있었다. Garcia-Navarro 등(1999)은 세가지 종류의 상류이송기법을 자연하도에서 발생하는 부정류에 적용한 바 있는데 이 기법도 생성항과 하폭 변화항의 처리에 한계를 나타낸 바 있다. 국내에서는 김원과 한건연(2000a, 2000b)이 고정확도 상류이송기법인 음해형 ENO 모형을 개발하고 여러 가지 형태의 흐름에 적용한 바 있고, Choi와 Paik (2001)은 여러 가지 상류이송기법에 대한 정확도를 비교한 바 있다. 또한 강민구와 박승우(2003)는 ENO 기법에 의한 2차원 유한체적기법으로 댐붕괴과를 해석한 바 있으며, 전정숙 등(2003)은 TVD 기법을 이용하여 천이류를 해석한 바 있다. 이정규와 김태관(2003)은 1차원 댐붕괴 흐름 모의시 발생하는 수치진동의 감쇄를 위해 TVD-McCormack 기법을 사용한 바 있다.

이와 같이 지금까지 상류이송기법이 자연하천에 적용되지 못한 주된 이유는 하상경사, 마찰경사, 하폭의 종단방향변화, 지류 유입 등의 생성항을 처리할 수 있는 기법이 일반화되지 못했기 때문이다. Bermudez와 Vazquez (1994)는 생성항의 처리를 위해 상류이송의 형태로 생성항을 차분하는 기법을 소개한 바 있다. Vazquez Cendon (1999)은 유사한 개념을 정상류 상태를 포함하는 보다 폭넓은 범위의 흐름에 적용한 바 있다. Garcia-Navarro와 Vazquez Cendon (2000)은 생성항의 처리를 위해 Roe 기법을 사용한 바 있으며, Hubbard와 Garcia-Navarro (2000)는 유한체적법에서

흐름항과 생성항의 균형을 고려하는 방법을 제시한 바 있다. Zhou 등(2001)은 생성항의 처리를 위해 수면경사를 변수로 사용하는 SGM (Surface gradient method)을 제시한 바 있다. 김원 등(2005)은 생성항의 차분을 위해 흐름항의 차분을 위해서 사용되는 정규 Jacobian을 사용하는 새로운 방법을 소개한 바 있다.

불연속 흐름은 댐붕괴과, 댐 여수로 흐름, 보어 등에서만 나타나는 특이한 흐름은 아니며, 보 월류 흐름, 갈수사 소와 여울로 반복해서 나타나는 일반적인 하천흐름으로 이와 같은 흐름의 수치해석을 위해서는 상류이송기법이 필요하다. 더불어 상류이송기법은 이와 같은 불연속 흐름뿐만 아니라 연속적인 흐름의 해석도 모두 가능하기 때문에 수치모형의 일반화를 위해서도 필요한 기법이라고 할 수 있다. 하지만 아직까지 국내외에서 상류이송기법은 균일하도, 생성항이 작은 하도, 단면이 일정한 불균일 하도 등 가상하도나 실험하도에만 적용되었으며 하폭의 흐름방향 및 수심방향 변화, 하상경사 변화, 마찰경사 변화, 지류 유입 등이 극심한 자연하도의 경우에 적용된 적이 거의 없는 상황이다. 본 연구에서는 김원 등(2005)이 개발한 생성항 처리 기법을 기반으로 자연하도의 단면과 하상경사 변화를 처리할 수 있는 기법을 추가하여 자연하도에 적용가능한 모형을 구축하였으며 매우 복잡한 형태의 자연하도에서 발생하는 정상류, 비정상류, 댐붕괴과, 보어 등에 적용하여 검증하였다.

## 2. 일차원 상류이송모형

### 2.1. 지배방정식

1차원 하천흐름의 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S = 0 \quad (1)$$

여기서

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} -q \\ -gI_2 - gA(S_o - S_f) \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 A = 단면적, Q = 유량, g = 중력가속도이며, I<sub>1</sub>은 단면에 작용하는 정수압력을 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

$$I_1 = \int_0^{h(x,t)} \{h(x,t) - \eta\} \beta(x, \eta) d\eta \quad (3)$$

여기서  $h$ 는 수심이며,  $\beta$ 는 수심  $\eta$ 에서의 수면폭으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta(x, \eta) = \frac{\partial A(x, t)}{\partial \eta} \quad (4)$$

식 (2)에서  $q$ 는 지류 횡유입량을 나타내며,  $I_2$ 는 하도 단면의 축소 또는 확대에 의해 발생하는 힘을 나타내는 것으로 다음 식으로 정의된다.

$$I_2 = \int_0^{h(x,t)} \{h(x,t) - \eta\} \frac{\partial \beta(x, \eta)}{\partial x} d\eta \quad (5)$$

또한  $S_o$ 는 하상바닥경사이며  $S_f$ 는 마찰경사로서 Manning 식에 의해서 정의될 수 있다.

## 2.2 상류이송모형

김원과 한건연(2000a, 2000b)은 다음과 같은 음해 상류이송기법을 제안한 바 있다.

$$\left[ I + \Delta t \alpha \left( \frac{\partial J^+}{\partial x} + \frac{\partial J^-}{\partial x} + G \right) \right] \Delta U^{n+1} = -\Delta t \left\{ (\hat{J}^+ + \hat{J}^-) \frac{\partial F}{\partial x} + S \right\}^n \quad (6)$$

여기서  $\Delta t$ 는 시간간격이며  $\alpha$ 는 가중치이다. 식 (6)에서의 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$J^\pm = T \text{diag}(\lambda_i^\pm) T^{-1} \quad (7)$$

$$\lambda_i^\pm = \frac{1}{2} (\lambda_i \pm |\lambda_i|) \quad (8)$$

$$\lambda_1 = u + c; \text{ and } \lambda_2 = u - c \quad (9)$$

$$\hat{J}^\pm = T \text{diag}(\hat{\lambda}_i^\pm) T^{-1} \quad (10)$$

$$\hat{\lambda}_i^\pm = \frac{1}{2} (1 \pm \text{sgn} \lambda_i) \quad (11)$$

여기서  $J$ 는 흐름의 Jacobian,  $T$ 는 유사전환행렬,  $T^{-1}$ 는  $T$ 의 역행렬,  $\text{diag}$ 는 대각행렬,  $\lambda_i^\pm$ 는 고유값,  $u$ 는 유속,  $c$ 는 파속,  $\hat{\lambda}_i^\pm$ 는 정규화된 고유값, 그리고  $\hat{J}^\pm$ 는 정규 Jacobian,  $\text{sgn}$ 은 sign함수이다. 식 (6)에서  $G$ 항은 생성항의 Jacobian( $G = \partial S / \partial U$ )으로 자연하천의 경우 다음 식으로 나타낼 수 있다(Delis 등, 2000).

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ g(S_o + \frac{7}{3}S_f + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{A}{B^2}) & -\frac{2gA}{Q}S_f \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서  $B$ 는 수면폭이다.

식 (6)으로 나타나는 상류이송기법의 경우 엔트로피 조건을 만족하지 못하여 불연속점 부근에서 비물리적인 결과를 나타내는데 Harten과 Hyman (1983)은 다음과 같은 엔트로피 교정 방정식을 제시하였다.

$$|\lambda_i|_{j+1/2} = \begin{cases} |\lambda_i|_{j+1/2} & \text{if } |\lambda_i|_{j+1/2} \geq \delta \\ \frac{(\lambda_i)_{j+1/2}^2 + \delta^2}{2\delta} & \text{if } |\lambda_i|_{j+1/2} < \delta \end{cases} \quad (13)$$

여기서  $\delta$ 는 경험적인 변수로 조건에 따라 변화하는 값이다. 이와 같은  $\delta$ 값의 결정을 위해서 Harten과 Hyman (1983)이 제시한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\delta_{i+1/2} = \max[0, \lambda(U_i, U_{i+1}) - \lambda(U_i), \lambda(U_{i+1}) - \lambda(U_i, U_{i+1})] \quad (14)$$

$$\delta_{i-1/2} = \max[0, \lambda(U_{i-1}, U_i) - \lambda(U_{i-1}), \lambda(U_i) - \lambda(U_{i-1}, U_i)] \quad (15)$$

상류이송기법을 자연하도에 적용하는 경우 생성항의 처리는 매우 중요하다. 생성항의 처리가 적절하지 못할 경우 큰 오차의 원인이 되며 생성항이 지배적인 자연하천의 경우 수렴 자체가 불가능하게 되기 때문이다. Roe(1986)는 생성항은 흐름항과 동일한 형태로 차분되어야 함을 증명한 바 있고, 이 조건을 만족시키기 위해 김원 등(2005)은 식 (16)과 같이 생성항을 상류이송의 형태로 차분한 바 있다. 이와 같은 생성항의 처리는 흐름항과 동일한 형태이기 때문에 생성항으로 인해 발생하는 오차를 없앨 수 있는 것으로 검증된 바 있다.

$$\begin{aligned} S &= (\hat{J}^+ + \hat{J}^-)S \\ &= \hat{J}^+ S^+ + \hat{J}^- S^- \\ &= \hat{J}_{i-1/2}^+ S_{i-1/2}^+ + \hat{J}_{i+1/2}^- S_{i+1/2}^- \end{aligned} \quad (16)$$

$$S_{i-1/2}^+ = \begin{pmatrix} -q_i \\ -g(I_2)_{i-1/2} - gA_{i-1/2}(S_{o_{i-1/2}} - S_{f_{i-1/2}}) \end{pmatrix} \quad (17)$$

상류이송기법의 자연하천 적용시 발생하는 또 다른 문제는 식 (2)에서 나타나는  $I_2$  항의 처리 문제이다. 이 항은 단면의 종단방향 변화로 인해 발생하는 힘을 반영하는 항으로 자연하천에서는 단면의 종단방향 변화가 매우 심하기 때문에 이 항의 처리가 계산에 결정적 영향을 미치게 된다. 하지만 식 (5)에서와 같이 이 항은 종단방향의 하폭을 적분형태로 고려해야 하기 때문에 단면이 정형화되어 있지 않은 실제 하천에서는 계산에 정확하게 반영하기가 어렵다. 적분 형태의 식을 계산에서 그대로 사용할 수도 있으나 단면의 변화가 심한 경우 이 항의 계산만을 위해서 상당한 시간이 소요되기 때문에 실제 사용하기는 거의 불가능하다고 할 수 있다. 이의 해결을 위해 몇가지 방법을 본 연구에서 적용해 본 결과 Burguete과 Garcia-Navarro (2001)가 제시한 다음과 같은 방법이 가장 적절한 것으로 나타났다.

$$\frac{dI_1}{dx} = \frac{\partial I_1}{\partial x} + \frac{\partial I_1}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x} = I_2 + A \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{B} \frac{\partial A}{\partial x} = I_2 + A \frac{dh}{dx} \quad (18)$$

이에 따라 식 (17)의 변수들은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$(I_2)_{i-1/2} = \left( \frac{(I_1)_i - (I_1)_{i-1}}{\Delta x_{i-1/2}} - \frac{(A_i + A_{i-1})}{2} \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x_{i-1/2}} \right) \quad (19)$$

$$g_{A_i-1/2}(S_{0_i-1/2} - S_{f_i-1/2}) = \frac{g}{2} (A_i + A_{i-1}) \left( \frac{(z_i - z_{i-1})}{\Delta x_{i-1/2}} - \frac{1}{2} \left( \frac{|Q_i|}{K_i^2} + \frac{|Q_{i-1}|}{K_{i-1}^2} \right) \right) \quad (20)$$

여기서  $z$ 는 하상바닥 표고,  $K$ 는 통수능( $AR^{2/3}/n$ ),  $R$ 은 경심( $A/P$ ),  $P$ 는 윤변,  $n$ 은 Manning의 조도계수, 그리고  $\Delta x_{i-1/2}$ 는 지점  $i$ 와  $i-1$  사이의 거리간격이다. 위 식에서  $I_1$ ,  $A$ ,  $B$ , 그리고  $R$ 은 하상표고와 하폭의 관계에서 결정되는 값이다.

최종적으로 상류이송형 1차원 음해 수치모형은 다음 식으로 나타나게 된다.

$$\left[ I + \Delta t \alpha \left( \frac{\partial \mathcal{J}^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{J}^n}{\partial x} + G^n \right) \right] \Delta U^{n+1} = -\Delta t \left\{ \hat{\mathcal{J}}^+ + \hat{\mathcal{J}}^- \frac{\partial \mathcal{F}^n}{\partial x} + \hat{\rho}^+ + \hat{\rho}^- \mathcal{S} \right\}^n \quad (21)$$

본 논문에서는 이와 같은 상류이송형 차분 기법을 이용하여 자연하도에 직접 적용될 수 있는 수치모형을 구축하였다. 단순화된 가상하도와는 달리 수치모형의 자연하도에 대한 적용을 위해서는 불규칙한 자연하도

단면을 수치모형에 반영할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 불규칙한 자연단면에서 수심별 하폭, 단면적,  $I_1$ ,  $I_2$ , 윤변 등을 효과적으로 계산할 수 있는 모듈을 구축하였으며, 계산된 단면적을 수위로 환산하는 모듈도 구축하여 일반 자연하천에 적용할 수 있는 모형을 구축하였다. 또한 부정류를 모의하기 위해서 필요한 상류단 및 하류단의 경계조건을 계산하기 위해 특성선 방법을 이용하였다.

### 3. 자연하도에 대한 적용

#### 3.1 해석해를 가진 불규칙 하도

본 연구에서 개발된 상류이송형 수치모형을 검증하기 위해 댐붕괴파 모의 워크샵 (Goutal과 Maurel, 1997)에서 제시된 바 있는 불규칙 하도에서 발생하는 조석흐름에 적용하였는데, Vazquez Cendon (1999)은 이 불규칙 하도의 흐름에 대한 해석해를 제시한 바 있다. 하상바닥과 하폭은 그림 1과 같은 형태를 지니고 있다. 초기조건과 경계조건은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$h(x,0) = H(x) \quad (22)$$

$$u(x,0) = 0 \quad (23)$$

$$h(0,t) = H(0) + 4 + 4 \sin \left( \pi \left( \frac{4t}{86,400} - \frac{1}{2} \right) \right) \quad (24)$$

$$u(L,t) = 0 \quad (25)$$

$$H(0) = 16m, \quad L = 1500m, \quad H(x) = H(0) - z(x) \quad (26)$$

그림 2는 그림 1의 하도에서  $t=10,800$ 초일 때의 단위폭당 계산 유량과 해석해를 비교한 것으로 모든 지점에서 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이 경우 수위의 해석해는 전 구간에서 16.0m인데 계산된 수위도 그림 4에서와 같이 잘 일치하고 있다. 표 1은 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 값의 변화에 따른 정확도를 비교한 것이며 그림 3과 그림 4는 각각 CFL 값의 변화에 따른 단위폭당 유량과 수위를 나타내고 있다. 표와 그림에서 알 수 있는 바와 같이 CFL 값이 10까지 커지더라도 계산의 수렴에는 문제가 발생하지 않는 반면, CFL 값이 커짐에 따라 유량의 경우 조금씩 오차가 커지고 있다. 수위의 경우에는 CFL 값이 커지더라도 정확도에 거의 영향이 나타나지 않고 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 모형은 CFL 값이 매우 큰 경우에도 안정적으로

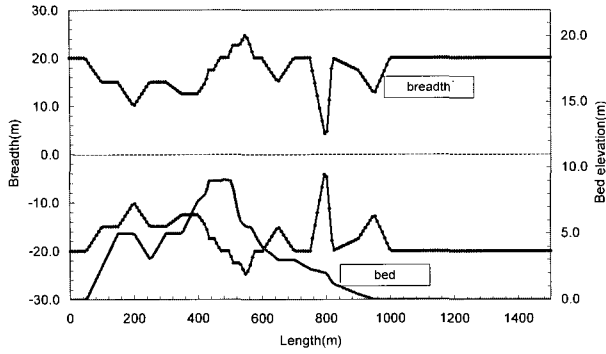


그림 1. 하상과 하폭의 변화

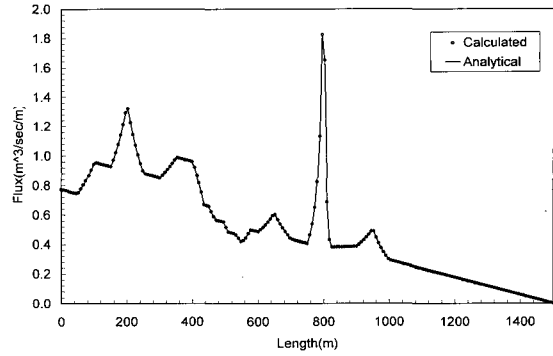


그림 2. 단위폭당 유량의 비교

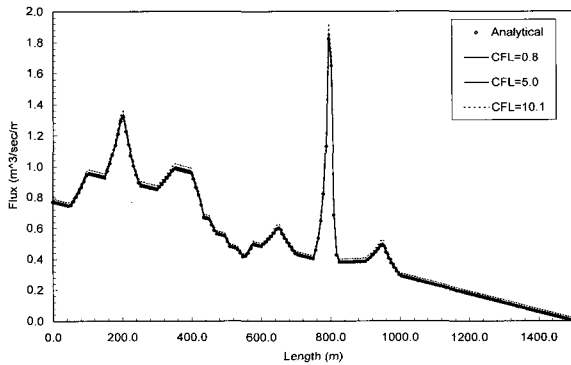


그림 3. CFL 값 변화에 따른 단위폭당 유량의 변화

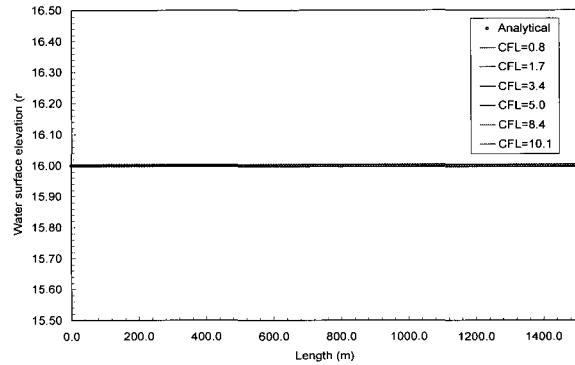


그림 4. CFL 값 변화에 따른 수위의 변화

표 1. CFL 값에 따른 정확도의 변화

$\Delta t$ (sec)	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
CFL number	0.8	1.7	3.4	5.0	6.7	8.4	10.1
rms error in flux(m³/s/m)	0.001	0.003	0.007	0.012	0.017	0.021	0.026
rms error in stage(m)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002

계산을 수행할 수 있기 때문에 모형의 실행시간과 필요한 정확도의 수준에 따라 적절히 계산 시간간격을 조정하는 것이 가능하다.

### 3.2 자연하도

본 연구에서 개발된 모형을 하상과 하폭의 변화가 매우 심한 한강 본류구간(팔당댐-전류 수위관측소)에 적용하였다. 그림 5와 6은 2000년에 측량된 하상자료를 나타낸 것으로 이 구간의 하상표고의 변화는 극심하며 하폭의 변화도 심한 편이다. 또한 잠실수중보와 신곡수중보는 하상표고의 변화를 더욱 크게 함과 동시에 저유량시에 흐름을 불연속으로 만드는 역할을 하고 있다. 신곡수중보의 경우에는 서해안 조석의 영향으로 역류가 발생하는데 이에 따라 이 지점에서는 하류 방향의 불연속 흐름뿐만 아니라 상류방향의 불연속 흐름도 발생하

는 특이한 지점이다.

이 구간의 흐름을 계산하기 위해 214개의 횡단측량 자료를 모두 사용하였으며 잠실수중보와 신곡수중보의

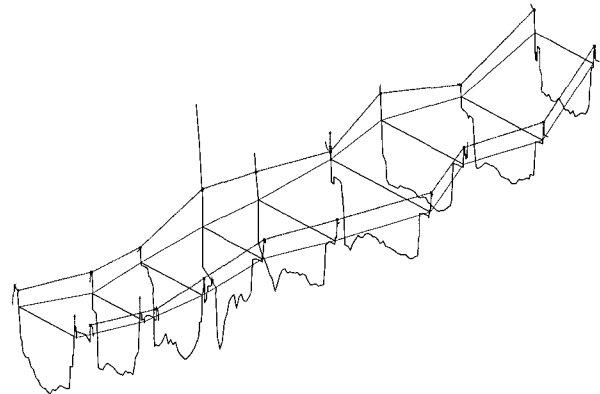


그림 5. 자연하도 단면의 예 (우로부터 9.37km와 13.16km 사이 구간)

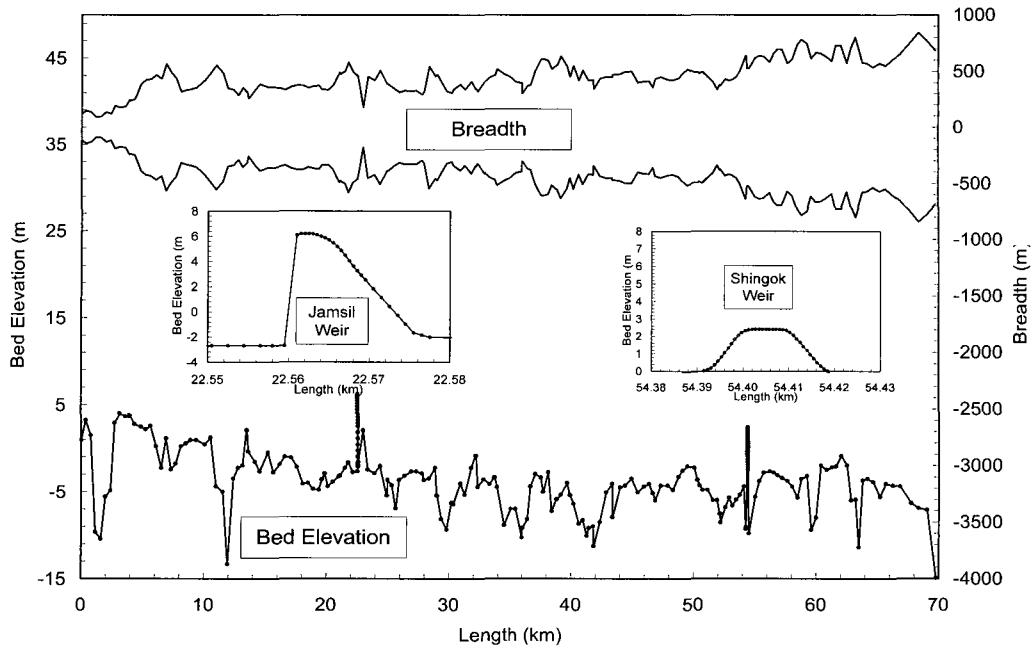


그림 6. 자연하도의 하상과 하폭의 변화

설계단면을 반영하는 88개의 횡단자료를 추가하여 모두 302개 지점으로 구성하였다. 이에 따라 단면간 거리간격은 수중보 지점에서는 최소 0.5m, 그 외의 구간에서는 최대 878.0m로 결정되었는데 단면간의 차이가 매우 큰 편이라고 할 수 있다. 하천 횡단면을 수치모형에서 반영하는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서 개발한 모형은 원래의 단면자료를 표고별 하폭의 자료로 변환하여 사용하는 방법을 선택하였다. 대상구간의 경우 하폭의 수심방향의 변화가 심하기 때문에 이를 반영하기 위해 모든 지점에서 16개의 표고별 하폭 관계로 단면을 구성하였다. 상류단 경계조건으로는 팔당댐의 방류량을 이용하였으며, 하류단 경계조건으로는 전류 수위관측소의 수위를 이용하였다. 본 연구에서 개발한 모형의 흐름형태별 검증용을 위해 정상류, 부정류, 댐붕괴류, 보어 전파 등에 적용하였다.

### 3.2.1 정상류

본 연구에서 개발된 모형을 먼저 정상류에 적용하였는데 초기조건으로 전구간에서 모든 경우에 동일하게 수위 8.0m, 유량 0.0m<sup>3</sup>/s를 설정하였다. 세 가지 정상류 경우를 설정하였는데 팔당댐에서 유량이 150m<sup>3</sup>/s인 경우, 유량이 150m<sup>3</sup>/s이면서 왕속천, 단천, 중랑천, 안양천 지점에서 각각 50m<sup>3</sup>/s의 횡유입량이 유입되는 경우, 설계홍수량인 37,000m<sup>3</sup>/s인 경우이다. 하류경계조건으로는 팔당댐 유량이 150m<sup>3</sup>/s인 경우 수심 15.2m, 유량이 37,000m<sup>3</sup>/s인 경우 전류 관측소 지점의 계획홍수위에

해당하는 수심 23.4m를 설정하였다. 팔당댐 유량이 150 m<sup>3</sup>/s인 경우 계산 시간간격은 0.1초로 하였으며 이때 계산된 전지점 CFL 값의 최고치는 1.8이다. 팔당댐 유량이 37,000m<sup>3</sup>/s인 경우 계산 시간간격은 0.4초로 하였으며 이때 계산된 최고 CFL 값은 11.3이다.

그림 7, 8, 및 9는 최종 수렴된 수위와 유량을 나타내고 있는데 계산된 유량의 경우 도수가 발생하는 2개 지점을 제외하고는 모든 지점에서 동일하여 정확하게 수렴된 것을 알 수 있으며 수위의 경우에도 수치진동없이 모든 점에서 잘 계산된 것을 알 수 있다. 특히, 지류 횡유입량이 있는 경우에도 각 유입지점에서 유입된 유량이 잘 반영되어 최종값에 수렴한 것을 알 수 있다. 또한 그림 7과 8에서 알 수 있는 바와 같이 잠실수중보와 신곡수중보에서 흐름의 불연속이 잘 계산되어 수렴된 것을 알 수 있다. 그림 10은 수렴과정을 나타낸 것으로 초기조건으로부터 최종 상태까지 잘 수렴하고 있음을 알 수 있다. 또한 CFL 값이 11.3으로 매우 큰 경우에도 해의 수렴에 문제가 없음을 보여주고 있다.

### 3.2.2 부정류

부정류의 모의를 위해서 2000년 7월 홍수(팔당댐 최대 방류량 5,180m<sup>3</sup>/s)와 2002년 8월 홍수(팔당댐 최대 방류량 22,060m<sup>3</sup>/s)를 선정하였다. 상류단 경계조건으로 팔당댐 방류량, 하류단 경계조건으로 전류지점의 관측 수위를 사용하였으며 실측수위에 대한 검증과정을 거쳐 구간별 유량별로 0.02와 0.05 사이의 Manning 조도계수

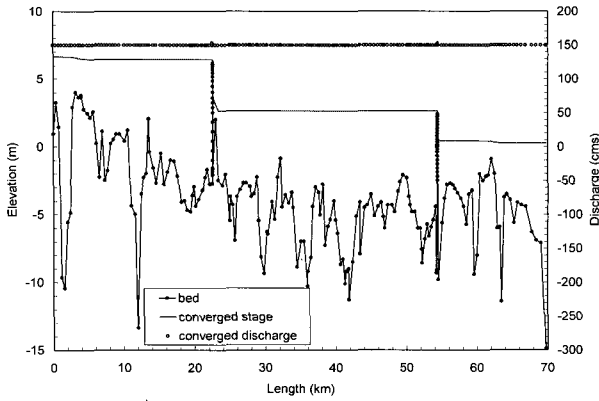


그림 7. 유량 150m³/s인 경우 수렴된 수위와 유량

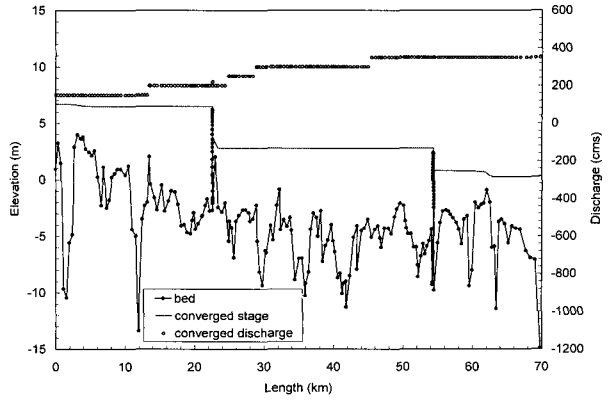


그림 8. 유량 150m³/s이고 횡유입량이 있는 경우 수렴된 수위와 유량

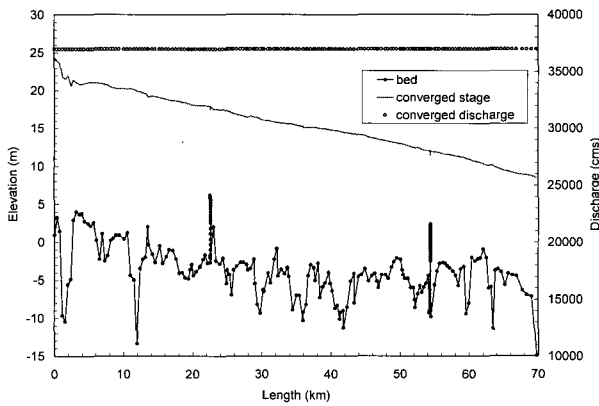


그림 9. 유량 37,000m³/s인 경우 수렴된 수위와 유량

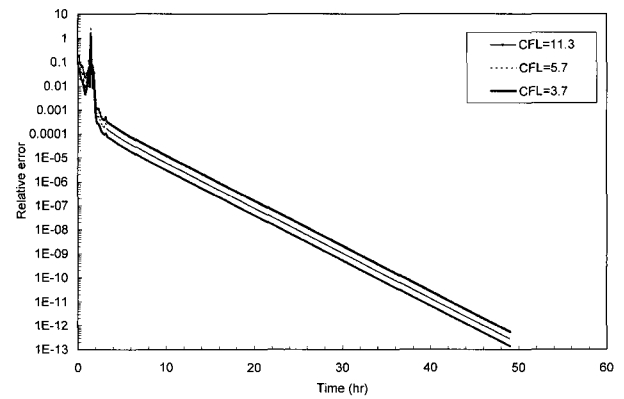


그림 10. 유량 37,000m³/s인 경우 CFL별 수렴과정

값을 선정하였다.

그림 11은 2000년 7월 홍수에 대한 한강대교 지점의 계산수위와 실측수위를 나타내고 있는데 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 신곡수중보 직하류 지점의 계산수위와 실측수위를 나타내고 있는데 두 값이 잘 일치하고 있다. 이때의 계산 시간 간격은 0.4초이며 최

대 CFL 값은 8.9이다.

그림 13은 2002년 홍수에 대한 시간별 계산 수위를 나타낸 것이다. 이 때의 시간간격은 0.6초이고 계산된 최대 CFL 값은 9.7이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 시간별로 계산된 수위가 수치진동 등의 문제없이 잘 재현되고 있다. 또한 저유량시에는 잠실수중보와 신

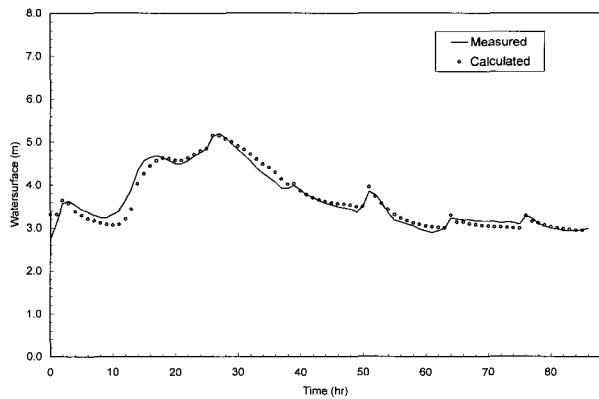


그림 11. 한강대교 지점의 수위비교(2000. 7 홍수사상)

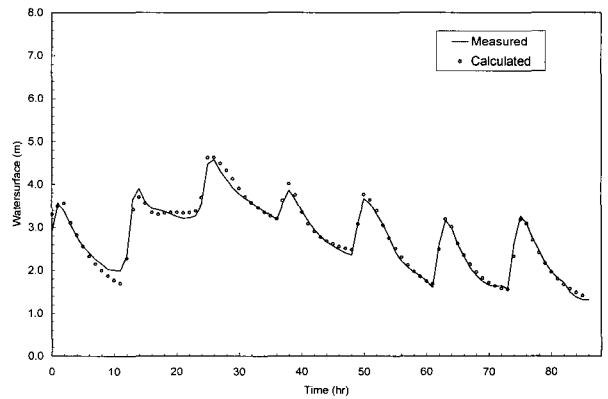


그림 12. 신곡수중보 직하류 지점의 수위 비교 (2000. 7 홍수사상)

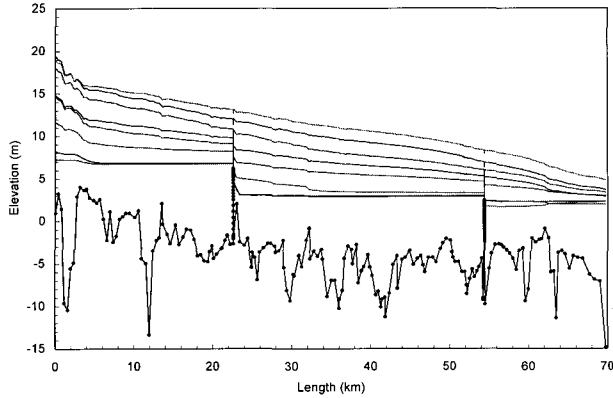


그림 13. 계산된 수위종단도(2002.8 홍수사상)

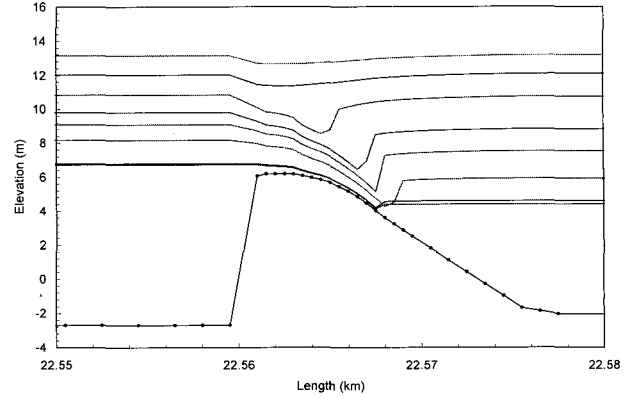


그림 14. 잠실수중보 지점의 수위종단도(2002.8 홍수사상)

곡수중보에서 불연속 흐름으로 인해 수위차가 발생하고 유량이 커질수록 이 수위차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그리고 불연속 흐름이 발생하는 지점 부근에서도 수위의 변화가 잘 재현되고 있는 것을 알 수 있다. 그림 14와 15는 각각 잠실수중보와 신곡수중보에서 계산된 시간별 수위를 나타내고 있다. 각 시간별로 유량 규모에 따라 수위가 변화하고 있는데 수위가 높아짐에 따라 도수가 발생하는 지점이 상류쪽으로 이동하다가 도수가 사라지는 것을 알 수 있다. 도수가 사라진 이후에도 보 지점에서는 수위가 약간 저하되는 것으로 나타나고 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 모형은 자연하천의 보에서 발생하는 도수가 있는 불연속 흐름을 별도의 내부경계조건을 사용하지 않고도 잘 재현할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 16은 2002년 홍수에 대한 한강대교 지점의 계산수위와 실측수위를 나타내고 있는데 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2.3 댐붕괴 흐름

댐붕괴 흐름의 모의를 위해 두가지 경우를 가정하였다. 먼저 팔당댐 붕괴시 발생하는 홍수량을 BREACH

모형(Fread, 1988)에 의해서 계산하여 상류경계조건으로 이용하는 것이다. BREACH 모형에서 댐붕괴 시간 0.2시간, 댐붕괴 폭 575m, 댐붕괴 높이 9.0m, 댐붕괴 사면 경사 0.0의 조건으로 붕괴시 발생하는 홍수량을 계산하였다. 그림 17은 팔당댐 지점에서의 홍수량과 하류 지점에서의 유량변화를 시간별로 나타낸 것으로 하류로 내려오면서 급격하게 침투홍수량이 감소하는 것을 볼 수 있다.

두 번째 경우는 대상구간의 중간지점에 높이 10m의 댐이 존재하다가 갑자기 없어지는 경우를 가정한 것이다. 전 구간에서 초기유량은 0.0m<sup>3</sup>/s이며 초기수위는 상류쪽은 13.0m, 하류쪽은 3.0m이다. 그림 18은 시간별로 수위의 변화와 유량의 변화를 나타낸 것으로 매우 급격한 수위와 유량의 변화임에도 불구하고 전체적으로 잘 계산이 이루어진 것을 보여주고 있다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 모형은 매우 급격하게 변화하는 댐붕괴 흐름의 경우에도 수치진동이나 비물리적인 현상없이 안정적으로 계산할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 댐붕괴와 같은 급격한 유량의 변화가 나타나

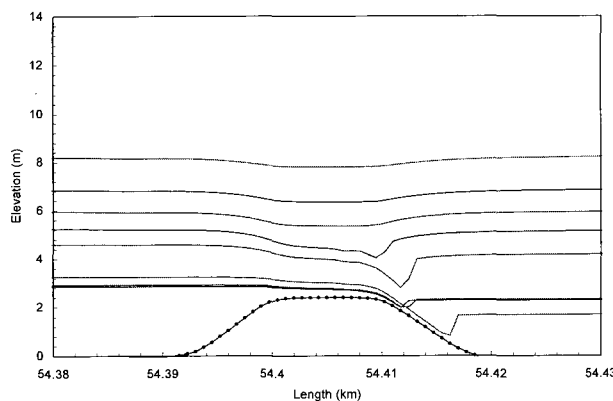


그림 15. 신곡수중보 지점의 수위종단도(2002.8 홍수사상)

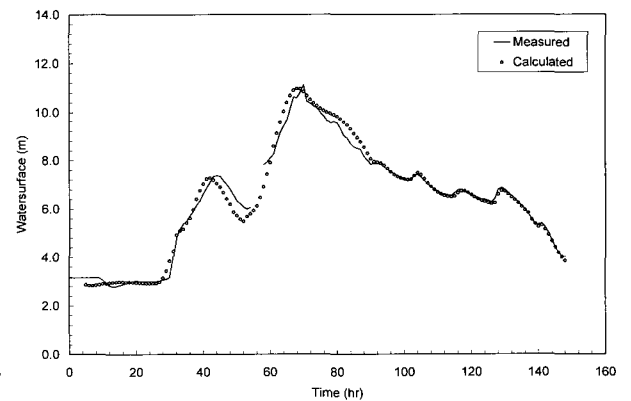


그림 16. 한강대교 지점의 수위 비교(2002. 8 홍수사상)



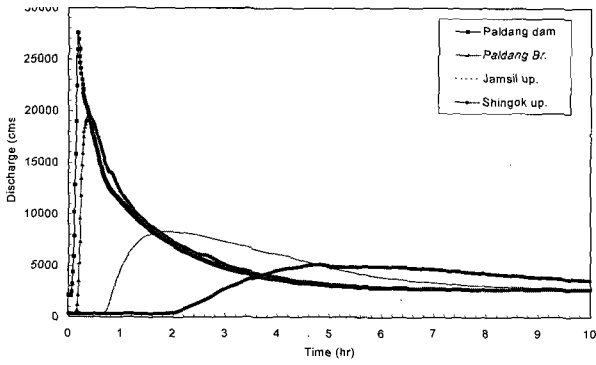


그림 17. 팔당댐 기상붕괴로 인한 지점별 유량수문곡선 변화

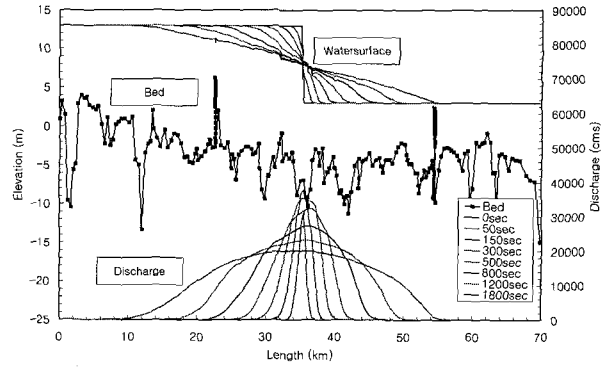


그림 18. 기상댐 붕괴로 인한 수위와 유량의 변화

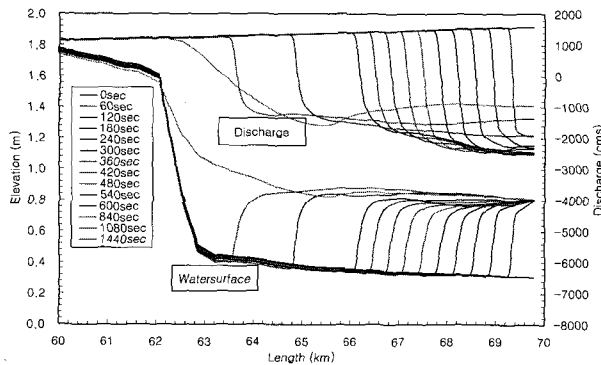


그림 19. 보어전파로 인한 수위와 유량의 변화

는 경우에도 불연속 흐름이 발생하는 보 지점에서 안정적으로 계산을 수행할 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.2.4 보어의 전파

보어의 전파 모의를 위해서 하류단 경계지점에서 갑작스런 수위상승을 가정하였다. 상류경계지점에서는 394.0m/s의 유량을 유지하면서 하류경계지점에서 계산 시작과 동시에 0.5m의 수위가 갑작스럽게 상승하여 형성되는 보어의 전파를 모의하였다. 보어 전파과정에 대한 결과를 분석하기 위해 하류경계지점에서 상류방향으로 약 6km 구간의 단면을 내삽하여 단면 간격이 4.0m가 되도록 하였다. 이에 따라 단면수가 302개에서 1,864개로 늘어났다. 그림 19는 시간에 따른 수위와 유량의 전파양상을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 시간에 따라 보어가 상류로 일정하게 전파되는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 유량의 경우에도 갑작스런 역류가 발생하며 상류로 전파되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 모형은 보어 전파 모의에서도 급격하게 감쇄되지 않는 보어가 수위와 유량의 변화를 반영하면서 이동하는 모습을 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 자연하도에서 발생하는 불연속 흐름의 해석을 위해 상류이송형 1차원 음해 수치모형을 하도 중형단이 매우 복잡한 하도에서 발생하는 여러 형태의 불연속 흐름에 적용하여 검증하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 생성항 처리 기법, 자연하도 단면 처리 방법 등을 이용하여 자연하도에 적용가능한 상류이송형 모형을 구축하였으며, 그동안 상류이송기법이 적용되지 못하던 복잡한 자연하도에도 적용이 가능한 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에서 사용한 하폭 종단방향의 고려 방법은 복잡한 자연하도에서 적절한 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서 구축한 모형은 음해법으로 CFL 값이 큰 경우에도 효과적으로 흐름을 계산할 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서 구축한 모형은 복잡한 자연하도에서 발생하는 정상류와 부정류, 연속흐름과 불연속흐름, 댐붕괴 흐름, 보어 전파 등을 수치진동이나 비물리적인 현상없이 잘 해석할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 상류이송 모형은 생성항의 효율적인 처리, 단면 변화의 정확한 고려 등으로 인해 자연 하천에서 발생하는 불연속 흐름을 효과적이면서도 정확도 높게 해석할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이 모형은 2차원 모형으로의 확대, 수질 등 기타 생성항의 포함, 복잡한 망형태의 하도에 대한 적용에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학기술기획평가원에서 위탁시행한 2004년도 특정연구개발사업중 “웹기반 홍수정보시스템 Prototype 개발사업”(과제번호: M1-0402-02-0002-04-002-02-000-00)에 의한 것으로 관계 당국에 감사드립니다.

## 참고 문헌

강민구, 박승우 (2003). “ENO 기법을 이용한 2차원 유한체적 수치모형.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제1호, pp. 1-11.

김 원, 한건연 (2000a). “고정확도 수치기법을 이용한 하천 천이류 해석 I. : 모형개발.” **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제1호, pp. 45-55.

김 원, 한건연 (2000b). “고정확도 수치기법을 이용한 하천 천이류 해석 II. : 적용.” **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제1호, pp. 57-65.

김 원, 한건연, 우효섭, 최규현 (2005). “상류이송기법에서의 새로운 생성항 처리기법.” **한국수자원학회논문집**, 제38권, 제2호, pp. 155-166.

이정규, 김태관 (2003). “댐붕괴 문제의 해석에 관한 TVD-McCormack 기법의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제3호, pp. 365-374.

전정숙, 이봉희, 조용식 (2003). “TVD 기법을 이용한 불연속 흐름의 수치해석.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제4호, pp. 597-608.

Bermudez, A., and Vazquez, M.E. (1994). “Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms.” *Computers & Fluids*, Vol. 23, No. 8, pp. 1049-1071.

Burguete, J., and Garcia-Navarro, P. (2001). “Efficient construction of high resolution TVD conservative schemes for equations with source terms: Application to shallow water flows.” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, No. 37, pp. 209-248.

Choi, S.U., and Paik, J.C. (2001). “Performance test of high resolution schemes for 1D dam break problem.” *Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 5, No. 3, pp. 273-280.

Delis, A.I., Skeels, C.P., and Ryrie, S.C. (2000). “Implicit high resolution methods for modeling one dimensional open channel flow.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No. 5, pp. 369-382.

Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H. (1986). “Explicit numerical schemes for unsteady free surface flows with shocks.” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 13, pp. 1923-1930.

Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK Model : Theoretical background/user documentation*, HRL-256, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service.

Garcia-Navarro, P., Alcrudo, F., and Saviron, J.M. (1992). “1D open channel flow simulation using TVD McCormack scheme.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 10, pp. 1359-1372.

Garcia-Navarro, P., Frás, A., and Villanueva, I. (1999). “Dam break flow simulation: some results for one dimensional models of real cases.” *Journal of Hydrology*, Vol. 216, pp. 227-247.

Garcia-Navarro, P., and Vazquez Cendon, M.E. (2000). “On numerical treatment of the source terms in the shallow water equations.” *Computers & Fluids*, Vol. 29, No. 8, pp. 951-979.

Goutal N., and Maurel F. (Eds.) (1997). *Proceedings of the 2nd Workshop on Dam Break Wave Simulation*, HE 43/97/016/B.

Harten, A., and Hyman, J.M. (1983). “Self adjusting grid method for one dimensional hyperbolic conservation laws.” *Journal of Computational Physics*, Vol. 50, pp. 235-269.

Hubbard, M.E., and Garcia-Navarro, P. (2000). “Flux difference splitting and the balancing of source terms and flux gradients.” *Journal of Computational Physics*, Vol. 165, No. 1, pp. 89-125.

Jha, A.K., Akiyama, J., and Ura, M. (1996). “A fully conservative Beam and Warming scheme for transient open channel flows.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 166-173.

- Jin, M. and Fread, D.L. (1997). "Dynamic flood routing with explicit and implicit numerical solution schemes." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 165-173.
- Roe, P.L. (1986). "Upwind differenced schemes for hyperbolic conservation laws with source terms." *Proceedings of the Conference on Hyperbolic Problems*, Carasso Riaviart and Serre (Editors), pp. 41., Springer Verlag, New York.
- Vazquez Cendon, M.E. (1999). "Improved treatment of source terms in upwind schemes for the shallow water equations in channels with irregular geometry." *Journal of Computational Physics*, Vol. 148, No. 2, pp. 497-526
- Yang, J.Y., Hsu, C.A., and Chang, S.H. (1993). "Computation of free surface flows." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 19-34.
- Zhou, J.G., Causon, D.M., and Ingram, D.M. (2001). "The surface gradient method for the treatment of source terms in the shallow water equations." *Journal of Computational Physics*, Vol. 168, No. 1, pp. 1-25.
- (논문번호:05-35/접수:2005.02.28/심사완료:2005.04.11)