

高精確度 數值技法을 利用한 河川 遷移流 解析 II. : 適用 Numerical Analysis of Transcritical Flow in Open Channels Using High-Resolution Scheme II. : Applications

김 원* / 한 건 연**
Kim, Won / Han, Kun Yeun

Abstract

A numerical model for analyzing transcritical flow in open channel is tested to various cases of channel shape. As the numerical models developed for transcritical flow until now mainly focused on the application to only prismatic or hypothetical channels, there are some restrictions to apply the nonprismatic channels. In this study, to verify the accuracy and stability of second-order implicit ENO scheme, the numerical model was applied to the channels which have the varying channel bed and width. Also the numerical model was applied to unsteady flow as well as steady flow. The study shows that the numerical model provides good accuracy in the calculation of stage and velocity with no numerical oscillation, particularly in the calculation of hydraulic jump and discontinuous flow. Then the implicit ENO scheme demonstrated good accuracy as a high-resolution scheme and stability as an implicit scheme.

keywords : river, transcritical flow, unsteady flow, implicit ENO scheme, model verification, application

요 지

개수로에서 발생하는 천이류의 해석을 위해 개발한 수치모형을 여러 형태의 수로에 적용하였다. 그 동안 개발된 천이류 해석 모형은 주로 균일하도나 가상하도를 대상으로 개발되어 다양한 형태의 하도에는 적용하기 곤란한 점이 있었다. 본 연구에서는 2차 정확도 음해적 ENO 기법을 하상 및 하폭이 변화하는 다양한 형태의 비균일 하도에서 발생하는 천이류에 적용하여 모형의 정확도와 안정성을 검증하였다. 또한 정상류 상태의 천이류 뿐만 아니라 비정상류 상태에서 발생하는 천이류에도 적용하여 모형을 검증하였다. 모형의 적용결과 수치진동의 발생없이 전반적으로 수위와 유속 등 흐름을 정확하게 계산하였으며 특히 도수의 발생위치, 불연속 구간의 계산 등에서도 좋은 결과를 나타내어 고정확도 기법으로서의 정확도와 음해법으로서의 안정성을 검증할 수 있었다.

핵심용어 : 하천, 천이류, 비정상류, 음해형 ENO 기법, 모형검증

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Kyonggido 411-712, Korea
(E-mail : wonkim@kict.re.kr)

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

1. 서 론

본 연구는 “고정확도 수치기법을 이용한 하천 천이류 해석 I : 모형개발”에 이은 연구로서, 개발된 수치모형을 여러 가지 형태의 천이류에 적용하여 검증하는 것이 목적이다. 일반적으로 하천에서 발생하는 흐름은 흐름특성에 따라 상류(常流), 사류(射流), 한계류(限界流)로 구분할 수 있다. 상류는 Froude 수가 1.0보다 큰 흐름으로 상류방향과 하류방향으로 동시에 영향을 받고 사류는 Froude 수가 1.0보다 큰 흐름으로 하류방향으로만 영향을 받는다. 이와 같이 상류와 사류는 흐름특성이 완전히 다른데 상류 또는 사류로만 형성되는 흐름의 수치모형은 흐름의 한가지 특성만을 고려하기 때문에 비교적 쉽게 흐름을 해석할 수 있다. 그러나 보를 넘어가는 흐름과 같이 일정 구간내에서 상류, 한계류, 사류, 상류가 이어서 동시에 발생하는 흐름에 대한 해석은 여러 흐름의 특성을 동시에 고려해야 하기 때문에 복잡하게 된다.

더구나 댐 붕괴시에 발생하는 흐름과 같이 상류와 사류의 경계면이 고정되어 있지 않고 빠른 속도로 이동하는 경우에 대한 흐름의 해석은 더욱 복잡하게 된다. 또한 천이류는 많은 경우에 도수로 인한 불연속점을 포함하고 있기 때문에 수치적으로 해석하기 곤란한 경우가 많이 있다. 이와 같이 상류와 사류가 일정 구간내에서 동시에 발생하는 흐름을 천이류라고 한다. 천이류는 댐 여수로, 보 등과 같이 하천에 설치된 각종 구조물이나 하폭 급변, 하상경사 급변 등의 경우에 발생할 수 있으며 댐 붕괴의 경우에도 발생하게 된다. 이와 같은 천이류는 기존의 일반적인 수치모형으로는 해석이 곤란하며 흐름의 전파특성을 정확하게 고려할 수 있는 모형에 의해서만 해석이 가능하다. 기체동역학이나 유체역학 등의 분야에서 최근에 이루어지는 수치해석의 주관심 분야중의 하나는 효과적인 천이류 해석기법을 개발하는 것이다. 하천흐름분야에서도 최근에 천이류의 해석에 관심이 모아지고 있지만 아직까지는 단순화된 하도형태에서 발생하는 천이류만을 대상으로 하고 있다.

그 동안 하천 천이류의 해석을 위해서 여러 가지 기법이 개발된 바 있다. 양해법으로는 MacCormack 기법(Fennema와 Chaudhry, 1986), 고정확도 기법인 TVD-MacCormack 기법(Garcia-Navarro 등, 1992) 등을 들 수 있으며 음해법으로는 Beam-Warming 기법(Fennema와 Chaudhry, 1986), 음

해적 TVD 기법(Garcia-Navarro와 Priestley, 1993), Beam-Warming-Roe 기법(Jha 등, 1996), MESH 기법(Meselhe 등, 1997) 등이 개발된 바 있다.

천이류 해석의 주된 관심사로는 흐름모의의 정확성과 안정성을 들 수 있다. 정확성의 측면에서 Taylor 급수전개에 기반을 둔 중앙차분기법에서 상류이송기법으로, 다시 고정확도 상류이송기법으로 발전하고 있다. MacCormack 기법, Preissmann 기법, Beam-Warming 기법 등은 모두 중앙차분기법에 속한다. 중앙차분기법은 Jacobian 고유값의 부호변화측면에서 대칭적이기 때문에 흐름정보의 상하류 전파를 정확하게 반영하지 못하는 특성이 있다. 이를 개선한 기법이 상류이송기법이며 2차 정확도 이상이 유지되면서 불연속점 근처에서 수치진동이 발생하지 않는 상류이송기법을 고정확도 상류이송기법으로 정의할 수 있다. TVD(Total Variation Diminishing) 기법은 고정확도 상류이송기법에 속한다. 안정성의 측면에서는 음해법이 선호되는 경향이다. 양해법의 계산절차가 비교적 간단하기 때문에 기법의 개발 당시에는 양해법으로 개발되지만 실제 적용을 위해서는 음해법이 계산의 안정성 때문에 선호되는 경향이 있다. MacCormack 기법이나 TVD 기법의 경우에도 양해법으로 먼저 개발된 후 계산의 적용성 면에서 음해법이 개발되는 것을 볼 수 있다.

최근에는 ENO(Essentially Non-Oscillatory) 기법이 개발되어 단순화된 하도의 흐름에 적용된 바 있다(Yang 등, 1993). ENO 기법은 상류이송기법으로 TVD 기법이 불연속점 부근에서 고차의 정확도를 확보하지 못하는 단점을 보완하기 위해 개발된 기법이다. 이 기법은 2차 정확도 이상이 전 구간에서 동일하게 유지되면서도 수치진동이 발생하지 않는 고정확도(high resolution) 기법으로 불연속 구간이 포함된 흐름을 해석하는데 적합한 것으로 알려져 있다. ENO 기법은 기체동역학 분야에서 개발되어 여러 경우의 유체 흐름해석에 적용된 바 있으며(Harten과 Osher, 1987; Yang, 1990) 최근에는 加重 ENO 기법이 개발되었다(Shu, 1997). Jin 등(1997)은 1차 정확도의 양해법 ENO 기법을 이용하여 실제 하천흐름에서 발생하는 충격파를 해석한 바 있다.

천이류 해석기법은 주로 기체동역학 분야에서 개발되어 유체역학 분야에서 많이 사용되었으며 하천에서 발생하는 천이류를 위해서는 많이 사용되지 않았다. 그

이유로는 기체동역학 분야와는 다르게 나타나는 자연 하천 종횡단면의 복잡성과 하폭, 하상경사, 마찰경사 등 생성/소멸항 처리의 문제점 등을 들 수 있다. 그로 인해 일차원 하천흐름 해석의 경우 지금까지 개발된 대부분의 수치기법은 균일하도나 가상하도를 대상으로 한 것이었다(Jin과 Fread, 1997). 균일하도나 가상하도에 대한 적용이라는 것은 하폭이나 하상이 균일하며 마찰경사도 무시하는 가상적인 상황을 대상으로 하는 것이다. 비균일 하도에 적용된 경우는 Garcia-Navarro 등(1992), Meselhe 등(1997)의 경우에 한 하며 자연하도에 적용한 경우도 Jin과 Fread(1997), Vazquez-Cendon(1999), Garcia-Navarro 등(1999)으로 많지 않다.

국내에서 김원 등(1998)은 하천흐름분야에서 양해법으로만 적용되던 MacCormack 기법을 음해법으로 적용한 바 있고 김원(1999)은 최근에 개발된 천이류 해석기법으로 고차의 정확도가 확보되는 ENO 기법과 안정성이 뛰어난 음해법의 장점을 결합하여 새로운 형태의 음해적 ENO 기법을 구성하고 이를 토대로 수치모형을 개발한 바 있다. 본 연구에서는 음해적 ENO 기법을 여러 가지 형태의 비균일 하도에 적용하여 음해적 ENO 기법의 안정성과 정확성, 그리고 비균일 하도에 대한 적용성을 검증하고자 한다.

2. 음해적 ENO 모형

본 연구에서 개발된 수치모형의 지배방정식과 차분방정식은 다음과 같다.

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

여기서 U , F , S 항은 다음과 같이 정의된다.

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gI_2 - gA(S_o - S_f) \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 A 는 통수단면적, Q 는 유량, g 는 중력가속도, S_o 는 하상경사, S_f 는 마찰경사, t 는 시간, x 는 거리이다. 또한, I_1 과 I_2 는 각각 단면 1차 모멘트와 종단방향에 따른 하폭의 변화를 고려해 주는 항이다.

식 (1)에서 F 의 Jacobian으로 J 를, S 의 Jacobian으로 G 를 정의할 수 있다. 또한 J 를 정규화된 Jacobian인 \hat{J}^+ 과 \hat{J}^- 으로 분리할 수 있다. ENO 기법에서는 $\partial F/\partial x$ 를 다음 식과 같이 정의한다(Yang 등, 1993).

$$\frac{\partial F}{\partial x} = (\hat{J}^+ + \hat{J}^-) \frac{\partial F^M}{\partial x} \quad (3)$$

여기서 F^M 은 식 (2)에서 정의되는 흐름률 벡터 F 를 수정한 형태로서 2차 ENO 기법은 F^M 을 식 (4)와 같이 정의함으로써 구성된다.

$$F_i^M = F_i^{ENO2} = F_i^n + E_i^n \quad (4)$$

여기서 벡터 E 는 ENO 기법을 구성하기 위한 추가 벡터이다.

최종적으로 음해적 ENO 기법을 이용한 수치모형의 지배방정식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[I + \Delta t \alpha \left(\frac{\partial J^{+n}}{\partial x} + \frac{\partial J^{-n}}{\partial x} + G^n \right) \right] \Delta U^{n+1} = -\Delta t \left\{ (\hat{J}^+ + \hat{J}^-) \frac{\partial F^M}{\partial x} + S \right\}^n \quad (5)$$

여기서 I 는 단위벡터, Δt 는 시간간격, α 는 시간가중치이다.

3. 모형의 적용 및 분석

본 연구에서는 2차 정확도의 음해적 ENO 모형을 여러 가지 형태의 하천 천이류 해석에 적용하였다. 정상류 상태로 발생하는 4가지 경우의 천이류와 비정상류 상태로 발생하는 2가지 경우의 천이류에 대하여 적용하였다. 정상류 상태로 발생하는 천이류를 계산하기 위해서 임의의 초기조건을 부여한 후 기지의 상하류단 경계조건을 고정시켜 오랜 시간 동안 모형을 실행하면 각 지점별로 일정한 값에 수렴하게 되는데 이 값이 정상류 상태의 천이류에 대한 계산결과이다. 본 연구에서는 정상류 상태에서의 보의 월류부, 하폭변화, 하상경사 급변화, 복합적인 하도변화 등의 경우에 발생하는 천이류와 비정상류 상태의 급격한 수문폐쇄로 인한 홍수파, 하상경사 급변화로 인한 천이류를 모의하여 음해

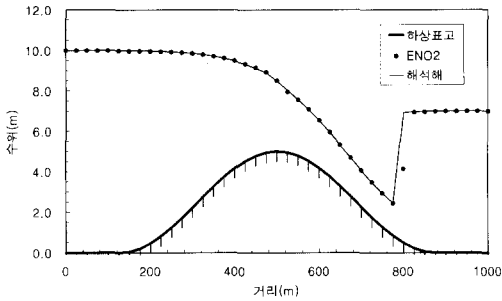


그림 1. 보를 월류하는 천이류 계산결과

적 ENO 모형의 적용성과 정확성을 검증하였다.

3.1 보 월류부에서 발생하는 천이류

대상 하도조건은 하상이 연속적으로 변화하는 마찰 없는 직사각형 단면으로 하폭은 1.0 m이다. 상류단 경계조건으로는 $h = 10.0$ m, 하류단 경계조건으로는 $h = 7.0$ m를 설정하였다. 전체 하도길이는 1,000 m, 거리간격인 Δx 는 25 m, 시간간격인 Δt 는 2.24초이다. 초기조건은 $h = 10.0$ m, $Q = 20.0$ m³/s이다. 초기조건으로 전 하도구간에서 수위 10.0 m, 유량 20.0 m³/s를 부여한 후 상·하류단 경계조건을 동일하게 유지한 채 모형을 수행하면 일정 시간 후에 주어진 하도조건에 적합한 천이류의 흐름상태가 계산된다. 이 적용 예는 Garcia-Navarro 등(1992), Meselhe 등(1997)이 이용한 바 있는데, 이 경우의 해석해는 에너지방정식에 의하여 계산되었다.

그림 1에서 보는 바와 같이 하상경사의 변화로 인해 보의 上流에서는 상류상태가 유지되고 보 정상을 지난 부분부터 사류가 형성되며 보를 지난 후에는 도수가 발생하면서 상류로 변화하고 있다. 해석해와 비교하여 보면 사류에서 상류로 바뀌는 부분에서 약간의 오차가 발생하는 것을 제외하고는 도수의 발생위치나 수위변화 등이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 2는 보를 월류하는 경우에 발생하는 천이류의 Froude 수 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 500 m에서 800 m 사이에서 Froude 수가 1.0에서 3.1의 범위에 들고 있다. 보의 하류측에서 강한 사류가 발생하는 것을 Froude 수를 통해서 알 수 있다. 이 경우 최대 Courant 수는 1.41로 나타났는데 본 모형이 음해법이기 때문에 Courant 수가 1.0보다

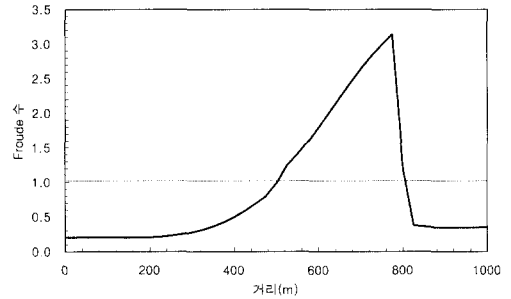


그림 2. 보를 월류하는 천이류의 Froude 수

큰 경우에도 안정적이고 정확한 계산을 수행하고 있음을 알 수 있다.

3.2 하폭변화로 인해 발생하는 천이류

하도조건은 그림 3에서와 같이 하폭이 연속적으로 변화하는 직사각형 수평수로로서 조도계수가 '0'인 가상조건이다. 하도의 길이는 500 m, Δx 는 10 m, Δt 는 1.5초이다. 초기조건은 $h = 2.0$ m, $Q = 20.0$ m³/s이다. 상류단 경계조건 $Q = 20.0$ m³/s, 하류단 경계조건 $h = 1.775$ m이다.

그림 4는 하폭변화에 의해 발생하는 도수를 계산한 것으로 250 m 지점에서 약간의 오차가 나타나는 것을 제외하고는 도수의 발생위치, 도수 후의 수위 등이 해석해와 잘 일치하고 있다. 하폭의 변화가 끝나는 지점에서 Froude 수가 최대 1.9로 나타났으며 이 경우 최대 Courant 수는 1.26으로 나타났다.

3.3 하상경사 급변화로 인해 발생하는 천이류

하상경사의 급변화에 의해 발생하는 천이류에 대한 모형의 적용성을 살펴보기 위한 하도조건은 다음과 같다. 하천단면은 직사각형이며 하폭은 8.0 m이다. Manning의 조도계수는 0.015, 하도길이는 1,000 m이다. 0~300 m 구간의 하상경사는 0.002, 300~600 m 구간의 하상경사는 0.009, 600~1,000 m 구간의 하상경사는 0.001이다. $\Delta x = 20$ m, $\Delta t = 10$ 초이다. 상류단 경계조건은 $Q = 20$ m³/s, 하류단 경계조건은 $h = 2.5$ m로 부여하였고, 초기조건은 $h = 4.5$ m, $Q = 20$ m³/s이다.

그림 5는 하상경사의 변화에 의해 발생하는 도수를

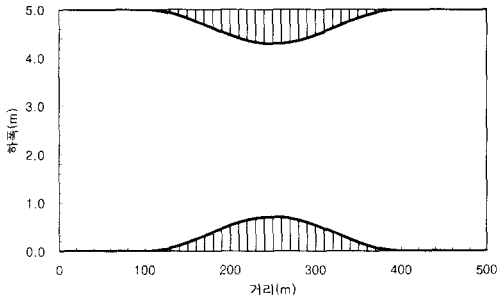


그림 3. 하폭 변화 양상

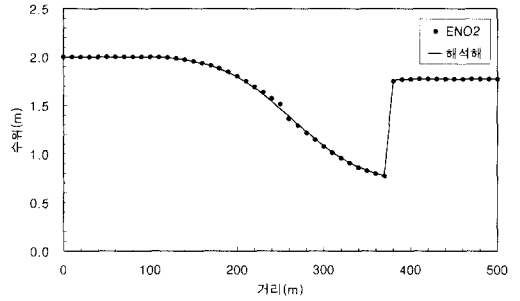


그림 4. 하폭변화에 의해 발생하는 천이류의 계산결과

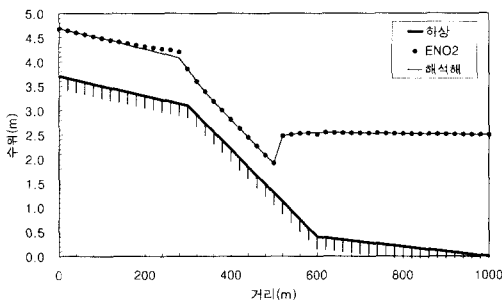


그림 5. 하상경사의 변화로 인해 발생하는 천이류의 계산결과

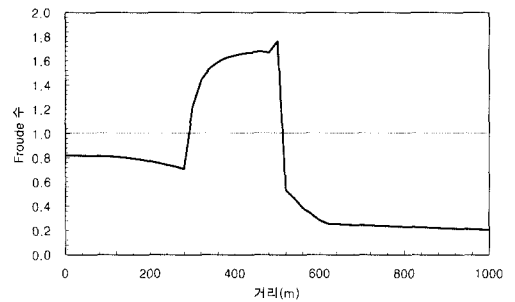


그림 6. 하상경사의 변화로 인해 발생하는 천이류의 Froude 수

음해적 ENO 모형에 의해 계산한 결과이다. 완경사에서는 흐름이 상류로 유지되다가 급경사로 변화한 후에는 사류로 변화하며 다시 하상이 완경사가 되면 도수가 발생하면서 상류로 변화하는 것을 알 수 있다. 해석해와 비교하여 보면 사류가 발생하기 전의 구간에서 계산결과가 해석해보다 약간 크게 나타날 뿐 다른 구간에서는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 하상경사 급변화의 경우에 대한 Froude 수의 변동양상을 나타내고 있다. 하상경사가 완경사에서 급경사로 변화하면서 Froude 수가 1.0 이하에서 최대 1.8까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이 경우 최대 Courant 수는 2.8로 계산되었는데 1.0보다 크지만 안정성 있는 계산결과를 얻을 수 있었다.

그림 7은 정상류에 수렴해 가는 과정을 나타낸 그림이다. 수렴시간은 약 3,900초이며 그 시간 이후에는 일정한 해에 수렴하는 것을 볼 수 있는데 임의의 초기 조건에도 불구하고 일정한 해에 안정되게 수렴되어 모형의 안정성과 정확성을 나타내고 있다. 이 그림에서

수렴오차는 다음 식에 의해 계산된 것으로 매시간 간격마다 계산한 결과이다.

$$Error = \frac{ABS(\max \Delta A_i)}{A_i} \quad (6)$$

여기서 $Error$ 는 수렴오차, ΔA_i 는 식 (5)의

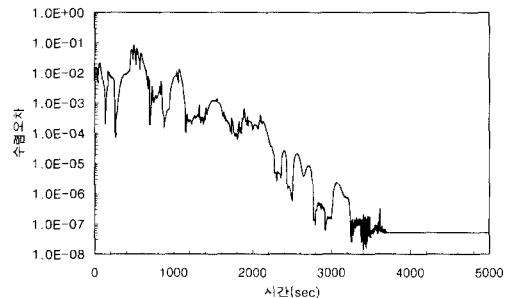


그림 7. 하상경사의 변화로 인해 발생하는 천이류 계산의 수렴과정

ΔU_i^{n+1} 에 의해 기술되는 단면적, A_i 는 최대 ΔA_i 가 발생하는 지점의 통수단면적을 말한다.

3.4 복합적인 하도변화에 의해 발생하는 천이류

본 절에서는 하상경사의 변화, 하폭의 변화, 조도계수의 영향 등 여러 가지 복합적인 하도조건에 대한 ENO 모형의 적용성을 검토하였다. 그림 8과 9는 하폭의 변화와 하상경사의 변화를 나타낸 그림이다. 하폭은 10.0 m에서 5.0 m까지 연속적으로 변화한다. 이 경우 0~4,500 m 구간의 하상경사는 0.01이고 4,500~5,500 m 구간의 하상경사는 0.02이며 나머지 구간의 하상경사는 0.01이다. 하도단면형은 직사각형이고 하도 길이는 10,000 m이며 Manning의 조도계수는 0.025이다. Δx 는 100 m, Δt 는 19.34초가 적용되었고, 상류단 경계조건은 $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, 하류단 경계조건은 $h = 0.78 \text{ m}$ 을 부여하였으며, 초기조건은 $h = 1.5 \text{ m}$, $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다.

그림 10은 하상경사와 하폭의 변화에 따른 계산결과를 나타낸 그림이다. 하폭의 축소로 하도의 중간부분에서 수심이 상승하였으며 중간부분의 하상경사가 다른 부분에 비해 급한 관계로 사류가 발생하여 이 부분의 수심이 갑자기 낮아진 것을 알 수 있다. 이 계산결과는 Meselhe 등(1997)에 의한 MESH 기법의 모의 결과와 잘 일치하고 있다. MESH 기법에서는 이 하도 조건에 대한 흐름을 계산하기 위해 거리격자를 불균일하게 모두 261개로 구분하였다. 이것은 MESH 기법이 하상이나 하폭이 급격하게 변화하는 구간에서 발생하는 흐름을 균일 거리격자로서는 계산할 수 없기 때문이다. 본 연구에서 개발한 모형은 100개의 균일격자로도 MESH 기법과 일치하는 계산결과를 얻을 수 있었다.

그림 11은 이 경우에 대한 Froude 수의 변화양상을 나타내고 있다. 중간부분에서 갑자기 변화하는 하상경사의 영향을 받아서 Froude 수가 1.2까지 증가하였다가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 경우 최대 Courant 수가 1.74로 나타났다.

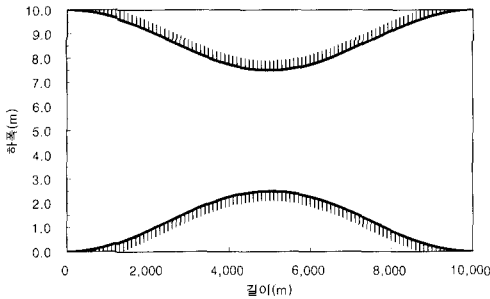


그림 8. 하폭의 변화

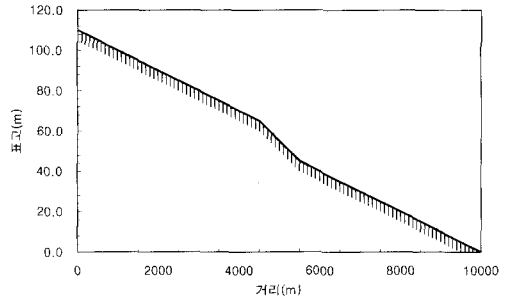


그림 9. 하상표고의 변화

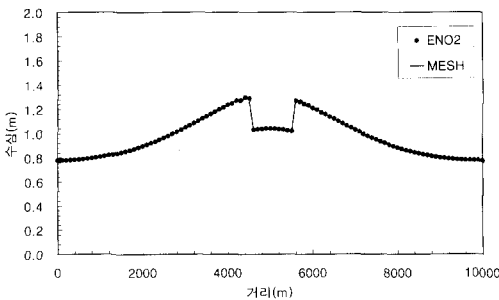


그림 10. 복합적인 하도에서 발생하는 천이류의 계산결과

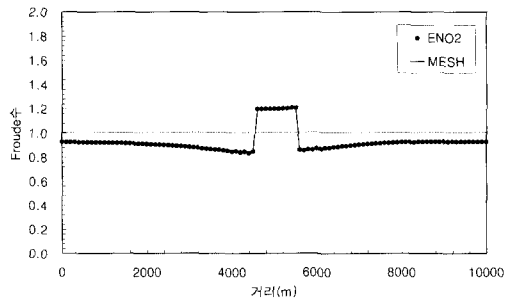


그림 11. 복합적인 하도에서 발생하는 천이류의 Froude 수

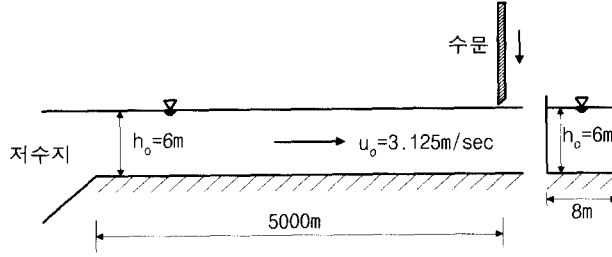


그림 12. 급격한 수문폐쇄의 하도조건

3.5 급격한 수문폐쇄로 인한 홍수파

본 절에서는 급격한 수문폐쇄로 인해 발생하는 부정류 상태의 홍수파 해석에 음해적 ENO 모형을 적용하였다. 하도조건은 그림 12와 같이 하폭 8 m, 하도거리 5,000 m 이고, 마찰의 영향을 고려하지 않은 수평수로이다. 초기수위는 6.0 m, 초기유속은 3.125 m/s 를 부여하였고, Δx 는 100 m, Δt 는 9.26초를 적용하였다.

그림 13은 급격한 수문폐쇄로 인한 홍수파의 해석결과를 나타낸 그림으로 수문폐쇄 후 361.21초 후의 계산결과이다. 하류단에서 갑자기 수문을 폐쇄하는 것을 모의한 것인데 초기시작 이후 하류경계단에서 갑자기 유량이 '0'이 되는 경계조건을 설정해서 계산한 것이다. 유속 3.125 m/s 의 흐름을 갑자기 하류단에서 차단함으로써 인해 하류단에서는 갑자기 수위가 상승하게 되고 빠른 속도로 상류방향으로 전파하게 된다. 해석결과와 비교를 위해 음해법의 대표적인 방법으로 알려진 Preissmann의 가중 4점 음해법과 Beam-Warming 기법을 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 ENO 모

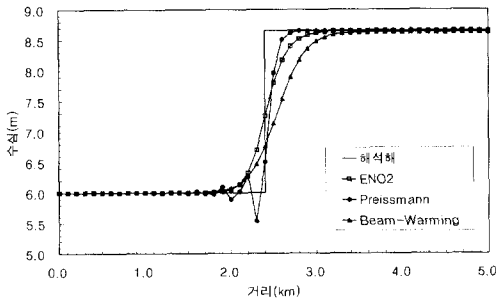


그림 13. 급격한 수문폐쇄로 인한 홍수파의 계산결과

형이 해석해와 가장 근접해 있으며 Preissmann 기법에서는 진동이 발생하였고, Beam-Warming 기법에서는 수치진동은 발생하지 않지만 해석해와 차이가 있는 것을 알 수 있다.

3.6 하상경사 급변화 하도에서 발생하는 천이류

그림 14는 하상경사의 변화에 따른 부정류 상태의 천이류 변화양상을 살펴보기 위한 것으로 상하류 경계조건의 변화에 따른 수위의 변화양상을 나타내고 있다. 하도조건은 하도길이를 제외하고는 3.3절에서와 같은데, 하천단면은 직사각형이며 하폭은 8.0 m 이다. Manning의 조도계수는 0.015, 하도길이는 900 m 이다. 0~300 m 구간의 하상경사는 0.002, 300~600 m 구간의 하상경사는 0.009, 600~900 m 구간의 하상경사는 0.001이다. 초기조건은 $h = 4.5$ m, $Q = 20$ m³/s 가 부여되었고, Δx 는 20 m, Δt 는 10초가 적용되었다.

상류단 경계조건 $Q = 20$ m³/s, 하류단 경계조건 $h = 1.5$ m 로 계산이 수행되었고, 정상상태에 수렴한 이후 400초 동안 하류단 경계조건인 수위를 3.5 m로 상승시켰고 상류단 경계조건인 유량은 40 m³/s 로 증가시켰다. 이 경우에 계산된 수면종단도를 나타낸 것이 그림 14이다. 그림에서 보는 바와 같이 상류 유량이 증가하고 하류 수위가 증가함에 따라 도수의 발생위치도 상류로 이동하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차 정확도 음해적 ENO 기법을 하천에서 발생하는 다양한 형태의 천이류 해석을 위해 적용하여 수치모형의 정확도 및 안정성을 검증하였다. 지금까지의 많은 천이류 해석기법들이 주로 균일하도

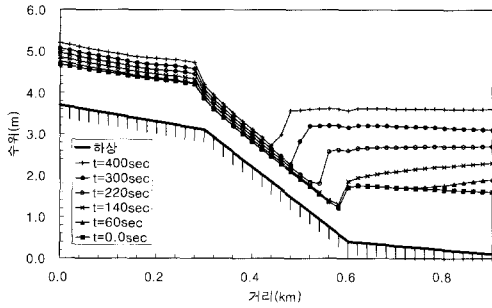


그림 14. 하상경사 변화 하도에서 유량에 따른 흐름의 변화

에서 발생하는 천이류만을 대상으로 한 것에 비해 본 연구에서는 하상변화, 하폭변화, 하상과 하폭의 변화 등 비균일 하도에서 발생하는 천이류를 대상으로 하였으며 정상류 상태 뿐만 아니라 비정상류 상태의 흐름에도 적용하여 음해적 ENO 모형을 검증하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 개발한 모형을 적용한 모든 경우에서 수치진동 발생없이 도수의 발생위치, 불연속 흐름부분 등을 포함하여 정확하게 수위와 유속을 계산하여 모형의 정확성과 안정성을 검증할 수 있었다. 임의의 초기조건을 부여하더라도 모형 실행 시작 후 일정 시간이 경과하면 일정한 값에 안정되게 수렴하여 모형의 안정성을 검증할 수 있었다.

(2) 복잡한 하도변화에 의해 발생하는 천이류에 대한 해석에서도 기존의 연구에서는 복잡하게 변화하는 하천을 고려해 주기 위해 불규칙하게 격자간격을 조밀하게 설정하였는데 비해 본 연구에서 개발한 모형은 균일한 거리격자라도 정확하게 흐름을 계산하여 복잡한 하도조건에 대한 적용성이 있음을 보여 주었다.

(3) 수문의 급격한 폐쇄나 하상경사 급변으로 인해 발생하는 발생하는 부정류 상태의 홍수파에 대해서도 본 모형은 Preissmann 기법이나 Beam-Warming 기법 등 보다는 안정적이면서도 정확하게 계산하였다.

(4) 본 연구에서 개발한 모형은 음해법이기 때문에 Courant 수가 1.0 이상인 경우에도 천이류를 해석할 수 있는 것으로 나타나 다양한 하천조건에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용대상으로 한 하도는 직사각형 단면의 하도로서 임의의 단면을 가진 자연하천은 대상에서 제외하였다. 그 이유는 자연하천의 단면이 가지는 불규

칙성을 반영할 수 있도록 고정확도 천이류 수치기법을 구성하는 것이 아직까지 국내외적으로 완전하게 이루어지지 않았기 때문이다. 실제 하천에 많은 경우에 천이류가 발생하고 있으며 이를 해석하기 위한 실용적인 고정확도 수치기법에 대한 관심이 높아지고 있는 상황이므로 자연하천에서 발생하는 천이류를 해석하기 위해 앞으로 추가적인 연구가 필요한 부분이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- 김 원 (1999). 고정확도 수치기법을 이용한 하천 천이류 해석모형의 개발. 박사학위논문, 경북대학교.
- 김 원, 한건연 (1998). "Implicit MacCormack 기법을 이용한 하천흐름의 해석." 1998년도 학술 발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 293~296.
- 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.
- Garcia-Navarro, P. and Priestley, A. (1993). *The application of an implicit TVD method for water flow modelling in channels and pipes*. Numerical Analysis Internal Report No. 6, Department of Mathematics, University of Reading.
- 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., Frías, 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.
- Harten, A. and Osher, O. (1987). "Uniformly high-order accurate nonoscillatory schemes I." *SIAM Journal of Numerical Analysis*, Vol. 24, No. 2, pp. 279~309.
- 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. 605~621.
- 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. 166~173.
- Meselhe, E.A., Sotiropoulos, F., and Holly, F.M., Jr. (1997). "Numerical simulation of transcritical flow in open channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp. 774~783.
- Shu, C.W. (1997). *Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws*. ICASE Report No. 97-65, NASA Langley Research Center, Hampton, VA.
- 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, pp. 497~526.
- Yang, J.Y. (1990). "Uniformly second-order-accurate essentially nonoscillatory schemes for the Euler equations." *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 12, pp. 2069~2076.
- Yang, J.Y., Hsu, C.A., and Chang, S.H. (1993). "Computations of free surface flows: I. One-dimensional dam-break flow." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 19~34.

(논문번호:00-069/접수:2000.10.16/심사완료:2001.02.27)