

## 2차원 동수역학 해석을 위한 CCHE2D 모형의 적용

○김상호\*·김 원\*·우효섭\*\*·한건연\*\*\*

### 1. 서 론

하천에서 자유수면을 가진 비정상 난류흐름이나 유사이송 그리고 하상의 변화 등을 모의하기 위한 3차원 모형이 최근에 많이 개발되고 있지만 안정성과 정확성이 검증된 2차원 계산수리모형은 공학적 설계의 실행가능성 평가나 최적화를 위한 계획과 의사결정, 단기간의 모의를 통하여 장기간에 대한 영향예측 등 많은 분야에서 필요로 하고 있다. 특히, 일차원 해석을 통하여 수행할 수 없는 복잡하고 불규칙한 경계와 하상을 가진 하도에 대한 유동분석을 위해서는 2차원 모형을 통한 고찰이 효과적이다.

자연하천에서 발생하는 자유수면을 가진 대부분의 흐름은 천수흐름이라는 가정하에서 근사화될 수 있으며 수심 평균화된 모형을 통하여 모의되고 있다. 본 연구에서는 개수로의 비정상 난류흐름과 유사이송 모의를 위해 천이류에 대한 지배방정식을 Efficient Element Method(Wang과 Hu, 1992)를 적용하여 수심평균치를 취한 2차원 동수역학적 유사이송모형인 CCHE2D 모형에 대한 안정성과 적용성을 살펴보고자 한다. 이 모형은 개수로에서 시간의 변화에 따른 정상상태의 해를 해석할 수 있으며, 상류와 사류영역뿐만 아니라 천이영역에 대한 모의를 수행할 수 있다. 또한 비정상상태의 흐름에 주로 나타나는 이동경계조건을 다루기 위해 마름/젖음 기법(dry/wet method)을 사용함으로써 실제 지형에 대한 모의시 발생할 수 있는 해의 발산을 방지할 수 있는 장점을 가지고 있다.

### 2. 동수역학적 지배방정식

대부분의 개수로 흐름이 천이류의 흐름상태이기 때문에 수심 평균치를 취한 2차원 천수방정식이 적용될 수 있다. 3차원 레이놀드 방정식을 연직으로 적분을 취하면 수심 평균화된 2차원 난류흐름에 대한 운동량방정식을 얻을 수 있는데 이를 직교 좌표체계로 나타내면 식 (1)~(2)와 같이 나타낼 수 있다.

---

\* 한국건설기술연구원 수자원환경부 선임연구원

\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경부 연구위원

\*\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor} u \quad (2)$$

여기서  $u$ 와  $v$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향으로의 수심 평균유속이며,  $t$ 는 시간,  $g$ 는 중력가속도,  $\eta$ 는 수위,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $h$ 는 수심,  $f_{Cor}$ 는 Coriolis 매개변수,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yy}$ 는 수심 평균화된 레이놀즈 응력들이며,  $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$ 는 하상과 흐름경계간의 전단응력을 나타내고 있다. 수면에서의 전단응력항은 본 모형에서는 바람에 의한 전단효과를 무시하고 있기 때문에 고려하지 않는다.

흐름에 대한 자유수면의 높이는 식 (3)과 같은 연속방정식에 의해 계산된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{A} \int h s \vec{u} \cdot d\vec{n} = 0 \quad (3)$$

여기서  $\eta$ 는 자유수면의 높이,  $A$ 는 요소의 면적,  $s$ 는 요소의 곡면 경계를 따른 구획선의 길이,  $h$ 는 구획에서의 수심,  $\vec{n}$ 은 구획의 외향 단위벡터이다.

식 (1)~(2)의 난류 레이놀즈 응력은 Boussinesq의 가정에 따라 일반적으로 와점성계수(eddy viscosity coefficient)를 이용한 흐름의 함수로 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_{ij} = \nu_t \cdot (u_{ij} + u_{ji}) \quad (4)$$

여기서  $i, j$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 를 의미하며  $\nu_t$ 는 와점성계수(eddy viscosity coefficient)이다. 본 모형에서는 와점성계수를 계산하기 위해 두 가지 방법을 사용하고 있다. 먼저 와점성계수  $\nu_t$ 는 식 (5)와 같이 수심 평균화된 포블선 와점성공식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\nu_t = \frac{A_{xy}}{6} \chi u_* h \quad (5)$$

여기서  $u_*$ 는 전단속도,  $\chi$ 는 von Karman의 상수(0.41) 그리고  $A_{xy}$ 는 와점성계수 값을 조절하는 계수이다. 이 계수의 초기값은 1로 주어져 있으며 사용자에 의해 조정될 수 있다. 와점성계수에 대한 다른 방법으로는 식 (6)과 같이 수심 평균화된 혼합길이 와점성모형을 이용하는 것이다.

$$\nu_t = l^2 \sqrt{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2} \quad (6)$$

여기서

$$\bar{l} = \frac{1}{h} \int xz \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h}\right)} dz = xh \int_0^1 \zeta \sqrt{1 - \zeta} d\zeta = 0.267xh \quad (7)$$

여기서  $\zeta$ 는 흐름의 상대수심을 의미하며, 연속좌표  $\frac{\partial U}{\partial z}$ 를 따라 수심 평균화된 유속경사는 하상표면으로부터 발생하는 난류의 영향을 고려하게 된다. 식 (6)에 의해 정의된 와점성은 등류의 흐름조건에서는 이러한 항이 없는 0이 된다.

### 3. 실제 하도에 대한 적용성 검토

#### 3.1 경사하도에 대한 댐 붕괴파 해석

본 모형에 대한 적용성 검토를 위해 순간적으로 댐이 파괴되거나 수문을 갑작스럽게 열었을 때와 같은 불연속적인 초기조건을 가지는 경우에 대해 모의하고자 한다. 이를 위해 그림 1에서와 같이 경사를 가진 균일하도에서 발생하는 댐 붕괴파에 대한 모의결과를 미 공병단(U.S. Corps of Engineers, 1960)의 실험자료와 비교하였다. 실험을 위한 수로의 길이는 122 m, 하폭이 1.22 m인 직사각형 하도에서 60 m 위치에 있는 0.305 m의 댐을 순간적으로 제거하였다. 이 때 하도의 하상경사는 0.005이고 조도계수는 0.009이다.

모형의 수행을 위해 댐 상류부에서는 댐의 높이와 동일하게 초기수위를 지정하였으며 상류단 경계에서는  $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 작은 양이 유입되도록 하였으며, 댐 하류부의 초기조건과 하류단 경계조건은 실제 실험조건에서는 흐름이 없는 마른 하도였지만 본 모형에서는 하류단 경계로부터 댐 직하류부까지 완전 마른 하도일 경우 모형의 수행이 불가능하기 때문에 0.0003 m의 아주 작은 수심이 있는 상태로 가정하였다. 또 실험에서 사용된 실제 수로의 길이는 122 m였지만 모형을 통한 모의수행에서는 홍수파에 대한 하류부의 영향을 살펴보기 위해 244 m로 연장하였다. 모형의 수행을 위한 격자는  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 는 각각 1 m, 0.12 m를 사용하여 전체 2695개의 절점으로 구성하였다.

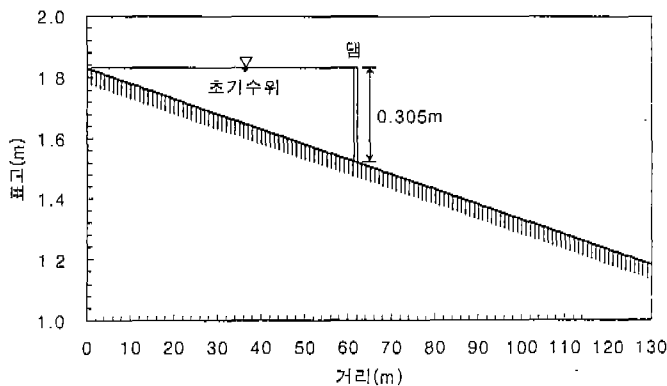


그림 1. 댐 붕괴 모의를 위한 초기조건

모의수행을 시작하고 2초, 5초, 10초 그리고 30초 후의 결과를 그림 2에서와 같이 나타내었다. 댐 하류부에서의 초기수위를 매우 작은 값을 사용하였음에도 불구하고 본 모형은 발산없이 안정된 모의결과를 제시하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 모형을 통한 계산결과가 댐 붕괴로 인한 급변부에서의 수위변화를 잘 나

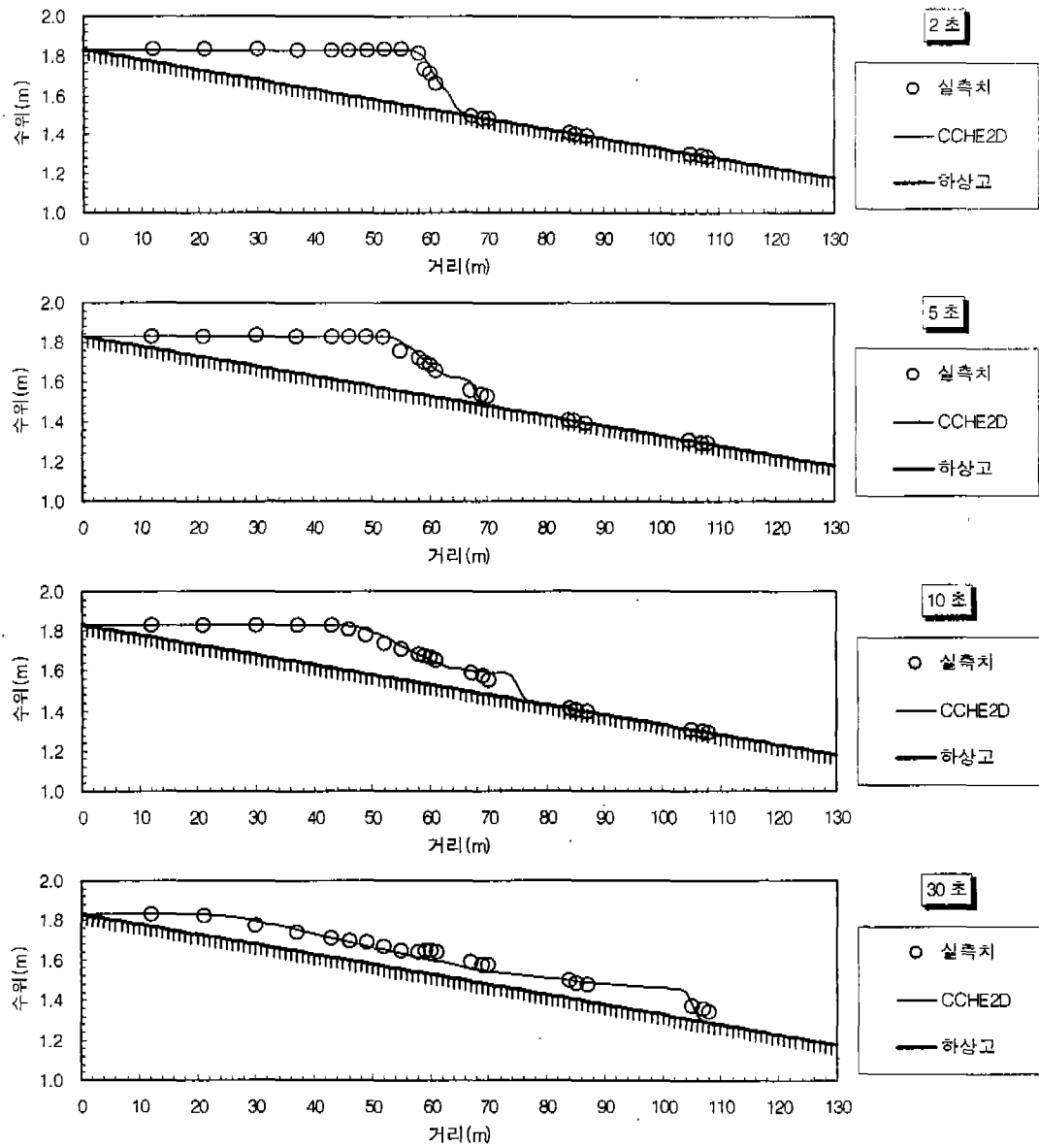


그림 2. 경사하도에 대한 댐 붕괴 모의결과

타내고 있는 것을 알 수 있었으며 전반적으로 계산수위와 실측수위가 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 하도-저류지 시스템에 대한 해석

하천 수로에 넓은 홍수터 또는 저수지가 연결되어 있는 하도에 대한 모의를 통하여 자유수면 흐름에서의 비선형 난류항으로 인한 순환현상을 모의하고자 한다. 이러한 모의를 위하여 수로는 4 m의 폭과 30 m의 길이로 된 하도로 구성하였으며 여기에 13 m의 폭과 14 m의 길이를 가지고

있는 저류지를 수로의 8 m 위치에서부터 연결되도록 하였다.

상류단에서는  $3 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 의 유량이 유입되도록 하였으며 초기수위와 하류단의 경계수위는 2 m를 유지하고 있는 것으로 가정하였다. 하도와 저류지에서의 초기상태는 흐름이 없는 정지상태이며 하도는 마찰이 없는 수평수로로 하여 상류단의 유입에 의해 흐름이 유지되도록 하였다. 모의를 위한 격자망의 구성도 직사각형의 망으로부터 외부절점의 지정을 통하여 그림 3과 같은 격자망을 구성하였다. 그림에서 격자망의 절점간격  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 각각 1 m로 구성하였으며, 계산시간 간격  $\Delta t$ 는 0.1초로 모의하였다.

모의시작 후 5초, 7.5초, 10초, 20초, 30초 및 40초 후의 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서

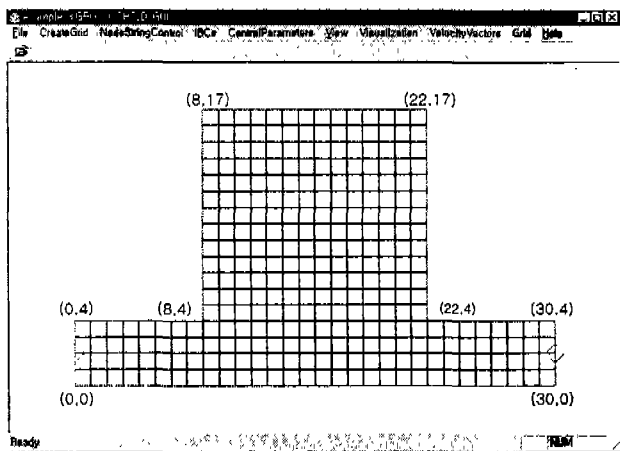


그림 3. 하도-저류지 시스템에 대한 격자망의 구성

로내의 흐름도 안정되어 일정한 유속분포를 나타내고 있었다.

는 유속벡터와 함께 흐름에 따른 수위변화 양상을 확인할 수 있는 등고선의 형태로 된 등수위도를 나타내었다. 그림 4(a)에서는 수로에서 저류지로의 유입으로 인해 우상단에서의 수위가 상승하고 있으며, 그림 4(b)에서는 저류지에서 순환류의 형성과 함께 좌상단으로 최고 수위가 이동하였다. 이 때 발생한 순환류는 점차 시간이 경과함에 따라 저류지의 내부로 이동하고 있으며 수위도 점차 안정되면서 전반적으로 일정한 수위로 낮아지고 있었다. 그리고 수

#### 4. 결 론

본 연구는 개수로의 비정상 난류흐름과 유사모의를 위해 천이류에 대한 지배방정식을 Efficient Element Method(EEM)를 적용하여 수심평균치를 취한 2차원 동수역학적 유사이송모형인 CCHE2D 모형을 이용하여 흐름모의를 위한 모형의 안정성과 적용성을 검토하였다.

이를 위하여 경사진 균일하도에서 댐의 순간적인 붕괴로 인한 홍수파의 전파양상에 대한 모의결과를 미 공병단에서 측정한 실험자료와 비교해 보았다. 모의결과 댐 붕괴로 인한 선단부의 수위감소와 급격한 수면경사가 발생하는 초기현상을 모형의 발산없이 안정적인 수행과 함께 비교적 실측수위와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 하천 수로에 넓은 홍수터 또는 저수지가 연결되어 있는 하도에 대한 수치모의를 통하여 자유수면 흐름에서의 비선형 난류항으로 인한 순환현상을 모의하였다. 모의수행을 시작함에 따라 수로에서 저류지로의 흐름의 유입으로 인해 저류지내에서 시간이 경과함에 따라 수위상승과 함께 순환류가 형성됨으로써 비교적 합리적인 모의결과를 제시하였다.

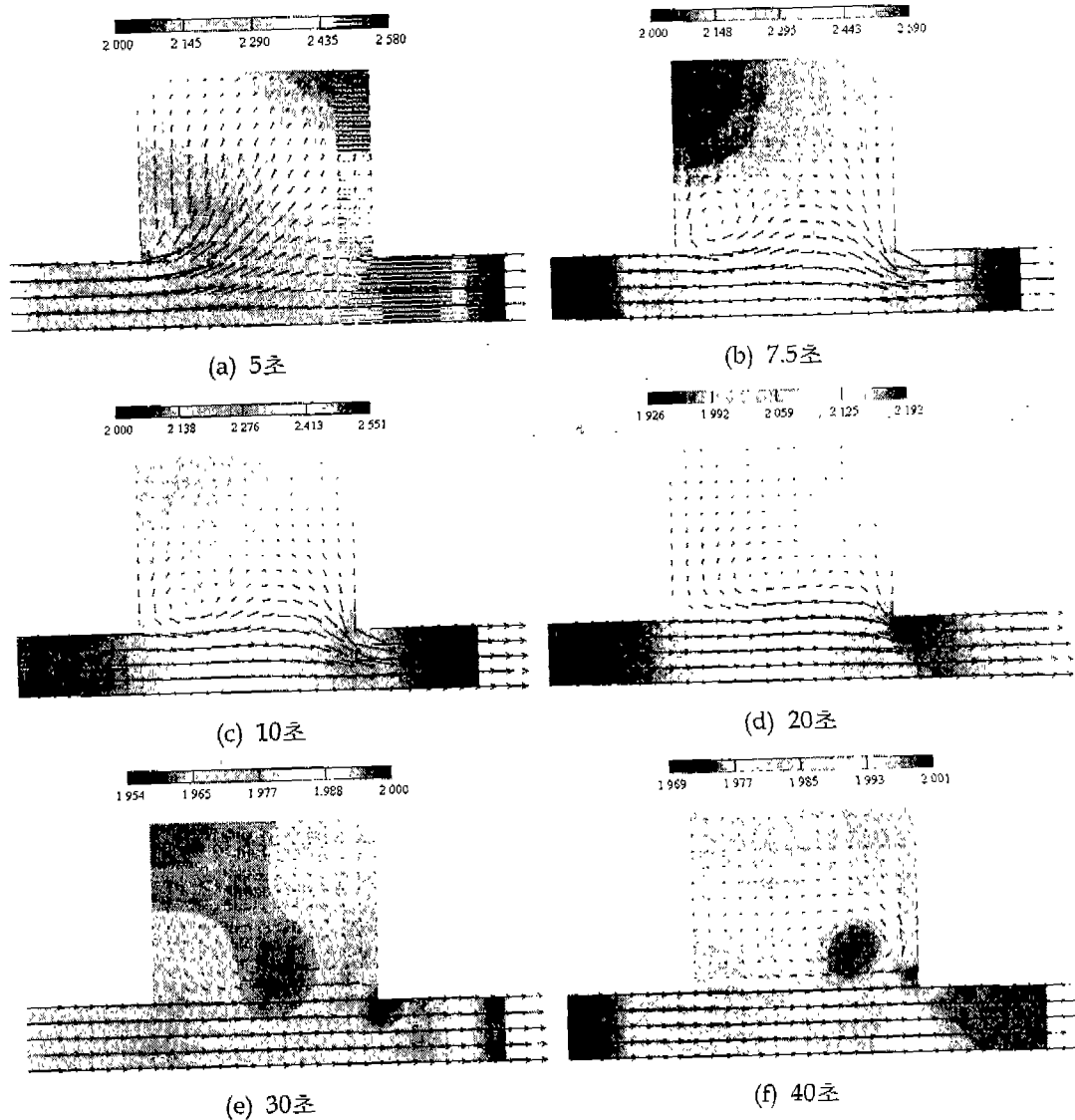


그림 4. 하도-저류지 시스템에 대한 모의결과

## 6. 참고문헌

- U.S. Corps of Engineers (1960). "Floods resulting from suddenly breached dams." *Miscellaneous Paper No. 2-374, Report I, Conditions of Minimum Resistance*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- Wang, S.S.Y., and Hu, K.K. (1992). "Improved methodology for formulating finite-element hydrodynamic models." *Finite Element in Fluids*, T.J. Chung, ed., Vol. 8, Hemisphere Publishing Corp., pp. 457-478.