

2차원 수치모형을 이용한 수제 주변 수리특성 변화 예측

Prediction of Hydraulic Characteristics Change around Spur-Dike Using a Two Dimensional Numerical Model

김태범*, 장지연**, 최성욱***
Tae Beom Kim, Jiyeon Jang, Sung-Uk Choi

요 지

수제는 유수에 의한 하안 침식을 방지하기 위한 목적의 수공구조물이다. 최근에는 하천복원 및 생태계복원에 대한 관심이 증가되면서, 하안 침식 방지뿐만 아니라 수제에 의한 흐름분리 및 재순환영역의 생태 서식처 제공에 대한 역할이 부각되고 있다. 따라서 수제 설계 시, 수제 설치에 따른 수리특성 변화를 미리 파악하는 것이 필요하지만, 수제 간격, 설치 방향, 수제 높이, 수제 길이, 하도 특성 및 접근 유수 특성 등 다양한 인자에 의해 수리특성 변화를 예측하기란 쉽지 않으며, 비용과 사공간 측면에서 물리 모형을 이용한 접근법도 용이하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 수제 설치에 따른 흐름특성 변화를 모의하고, 모형의 적용성을 판별하고자 하였다. 지배 방정식은 기본적으로 천수방정식을 적용하게 되는데, 수제 주변 흐름 특성은 난류에 의한 횡방향 확산이 중요한 인자로 작용하게 된다. 상수 와점성 (constant eddy viscosity) 모형, 포물선형 와점성 (parabolic eddy viscosity) 모형을 통해 개발 모형의 예측 결과와 실험 수로 결과를 비교하였다. 수제 하류의 재순환영역의 길이가 실험수로의 결과에 비해서 5~6 배까지 확대된 결과를 나타내고 있어, 만족할 만한 결과를 현재까지 얻지 못하였다. 횡방향 확산이 중요한 만큼 $k-\epsilon$ 모형 등 다양한 난류 모형의 적용이 고려되어질 필요가 있으며, 또한 1차원 요소가 아닌 2차원 요소의 적용을 고려할 필요도 있다.

핵심용어 : 수제, 흐름분리, 재순환영역, 2차원 수치모형

1. 서 론

수제는 호안이나 하안 및 제방의 보호를 위해서, 또는 수로 제어와 수심 확보 등의 목적을 위해서 설치하는 수공 구조물이다. 수제 설치에 의해 수로의 흐름 특성이 변화되고, 결과적으로 하상변동이 유발되어, 근래까지 수제 설치에 따른 수제 주변의 하상변동에 연구의 초점이 맞추어져 있었다. 최근에는 수제 설치에 따른 흐름 분리 및 재순환 영역의 생태학적 중요성이 부각되고 있으며, 하천 복원이나 수로 정비 시 하상 준설에 따른 제방의 침식 방지 구조물로써 활용성이 다시 증대되고 있으며, 자연형 하천으로의 복귀 및 생태 서식처 제공 등의 순기능이 강조되고 있다. 따라서 수제 설계 시, 수제 설치에 따른 수리특성 변화를 미리 파악하는 과정이 필요하며, 이 과정에서 비용과 시·공간적인 측면에서 물리 모형을 이용하기 보다는 수치모형을 활용한 예측이 일반적이다. 수제 설치에 따른 수리특성 변화는 2차원의 수평적인 분포를 보이기 때문에, 종방향 변화만을 예측할 수 있는 1차원 수치모형은 부적합하다. 또한 수제에 의한 수리특성의 수직적인 변화 보다는 수평적인 변화가 매우 크기 때문에, 3차원 수치모형을 적용하기 보다는 2차원 수치모형을

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 연구원 · E-mail : geo108@naver.com
** 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 · E-mail : jiyeon83@yonsei.ac.kr
*** 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · E-mail : schoi@yonsei.ac.kr

이용한 접근법이 적합하다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 수제 설치에 따른 흐름특성 변화를 모의하고, 모형의 정확성을 판별하고자 한다. 수제 주변 흐름 특성은 난류에 의한 횡방향 확산이 중요한 인자로 작용하게 되므로, 난류 점성항이 포함된 수심 적분 흐름 방정식을 지배방정식으로 하며, 유한요소법을 적용하여 수치해를 구한다. 개발된 모형을 이용하여 수제 설치에 따른 흐름 특성 변화를 모의하고, 실험 결과와의 비교를 통해서 2차원 수치모형에 의한 수제 주변 흐름특성 모의에 관한 정확성 및 적용성을 판별한다.

2. 지배방정식

몇 가지 가정들에 기초하여 연속방정식과 Reynolds 방정식을 수심 적분하면, 아래와 같은 천수방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} = 0 \quad (3)$$

여기서 $p = hu$, $q = hv$ 의 관계에 있으며, p , q 는 x , y 방향의 단위 폭 당 유량성분, h 는 수심, u , v 는 x , y 방향의 수심 적분된 유속성분이다. 그리고 t 는 시간, g 는 중력가속도, 그리고 z_b 는 하상고이다. 식 (2)의 τ_{bx} 와 식 (3)의 τ_{by} 는 각각 하상 전단응력의 x , y 방향 성분으로, Manning의 공식식을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2}{h^{7/3}} p \sqrt{p^2 + q^2}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2}{h^{7/3}} q \sqrt{p^2 + q^2} \quad (4)$$

여기서 n 은 Mannig의 조도계수이다. 식 (2)와 (3)의 ν_t 는 와점성 계수로서, ν_t 를 어떻게 평가하는가에 따라 다양한 난류 모형이 존재한다. 본 개발 모형에서는 유체 흐름 전체에 걸쳐서 일정한 값을 설정하는 상수 와점성 모형 (constant eddy viscosity model)과 식(5)로 정의되는 포물선형 와점성 모형 (parabolic eddy viscosity model)을 적용하였다.

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} U_*^2 h \quad (5)$$

여기서 κ 는 von Kármán 상수 (≈ 0.4)이며, U_* 는 전단속도로써 다음과 같다.

$$U_* = \frac{n}{h^{7/6}} g \sqrt{p^2 + q^2} \quad (6)$$

식 (1) ~ (3)의 지배방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서 김태범 등 (2006)의 2D CDG 유한요소법을 적용하였다.

3. 모형의 검증

Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)는 단일 수제를 적용한 실험실 수로에서 수제 주변의 흐름 특성 변화를 고찰하였다. 길이 36.58 m, 폭 0.9144 m의 경사진 직선수로의 끝단에 수문을 설치하여 수심을 조절하였다. 두께 3 mm의 길이 0.152 m 또는 0.076 m의 알루미늄 평판과 반경 0.152 m의 반원통을 수제로 사용하였으며, 수제의 높이는 물에 잠기지 않을 정도로 충분히 높았다. 총 3

개의 유량을 적용했으며, 선택된 유량에 대해서 등류 조건을 설정하기 위해서 수로 경사와 수심을 조절하였다. 본 연구에서는 Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)의 총 13개 실험 중에서, 수심 0.188976 m, 유입유량 0.0453 m³/s, 평균유속 0.253 m/s, 수제 길이 0.152 m, 매끈한 하상바닥 실험조건 (실험번호 A1)을 선택하여 수치모형에 적용하였다. 이 경우 Froude 수는 0.186으로 상류조건에 해당한다. Rajaratnam과 Nwachukwu (1983)는 매끈한 하상 바닥의 평균 입자크기는 0.56 mm에 해당한다고 기록하였다. 따라서 기록된 입자크기를 Strickler 공식에 적용하여 Manning의 조도계수를 평가하였으며, 수치모의 시 0.01368을 적용하였다. 또한 수로의 폭과 수심, 그리고 평균유속을 이용하여 산정된 유량 0.0436 m³/s를 상류단 경계조건으로 적용하였고, 실험과 동일한 0.188976 m의 수심을 하류단 경계조건으로 적용하였다. 수치모의 적용 시 하상경사는 무시할 만큼 작다고 가정하여 평평한 바닥을 적용하였다. 수제를 적용하지 않은 상태에서의 수치모의 결과, 수면경사는 1.10×10^{-4} 이하로 등류 상태를 가정할 정도로 수심 변화가 거의 없었다. 수제 폭과 길이를 실내실험 조건과 동일하게 적용하여 격자를 구성하였으며, 격자 크기에 의해 수치해가 영향 받지 않을 정도로 수제 주변의 격자는 매우 조밀하게, 그리고 수제의 상류부와 하류부로 갈수록 격자 간격이 넓어지도록 사각형 형태의 선형 요소만을 이용하여 격자를 구성하였다. 결과적으로 절점의 개수는 5209개, 요소의 개수는 5008개이다.

그림 1과 2는 포물선형 와점성 모형을 적용하였을 때의 평균유속 분포와 벡터 결과이다. 그림 3의 모식도와 같이 수제 하류부에 흐름분리가 발생하며, 분리 영역 내부에서는 흐름이 재순환하는 결과를 보이고 있다. 표 3은 여러 연구자들의 재순환 영역에 대한 무차원 길이와 폭에 대한 요약이다. 표 3에서 보듯이 수제로부터 재순환 영역의 길이는 대략 수제 길이의 12배 정도이다. 따라서 본 적용의 경우 재순환 영역의 길이는 대략 수제로부터 1.8 m 부근까지 형성되어야 하지만 그림 1이나 2에서와 같이 5~6배 더 길다. 여러 연구 결과에 의하면 수제 주변에서의 와점성 계수 값으로 대략 0.0012 m²/s값을 제시하고 있다. 하지만, 본 모형의 포물선형 와점성 모형을 적용하였을 경우에 와점성 계수의 평가치가 이 수치보다 대략 100배 작은 값으로 평가되었다. 와점성 계수가 작아짐에 따라 횡방향 확산 효과는 상대적으로 작아지게 된다. 따라서 상수 와점성 계수 모형을 적용하여 수로 전체에 증가된 와점성 계수 값을 적용한 결과, 그림 4와 같이 재순환 영역의 길이가 짧아졌다. 하지만 여전히 여타의 실험 결과에 비해 재순환 영역의 길이가 다소 길다. 와점성 계수 값을 더욱 증가시킨 결과, 그림 5와 같이 재순환 영역이 분리되는 기이한 결과를 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 2차원 천수방정식을 지배방정식으로 하는 유한요소 수치모형을 이용한 수제 주변 흐름 특성 모의의 적용성을 판별하고자 하였다. 본 연구의 현재까지의 결과를 보면, 2차원 수치모형의 수제 주변 흐름특성 변화에 대한 수치해 결과는 만족스럽지 못하다. 하지만, 결과에 대한 고찰을 통해 추가적인 연구를 진행할 필요는 있다. 첫째, 기타의 2차원 흐름모형을 이용한 동일 사례에 대한 적용을 통해 본 개발 모형과의 비교가 필요하며, 특히 $k-\epsilon$ 난류 모형에 대한 결과를 살펴볼 필요가 있다. 이를 통해, 천수방정식 자체의 수제 적용성을 평가할 수 있으며, 난류 모형의 선택에 따른 수제 주변 흐름 특성 모의의 정확성을 평가할 수 있다. 둘째, 현재 적용된 격자의 경우 선형 요소 격자만을 적용했다. 선형 요소의 경우 유한요소기법에 의해 2계 편도함수 항의 값이 소거되거나 매우 간단한 상수 값만 나타나게 된다. 따라서 선형 요소가 아닌 2차 요소(quadratic element)를 적용하여 와점성 계수가 포함된 2계 편도함수 항의 효과를 제고할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구단 (ECORIVER21)(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

- 김태범, 최성욱, 민경덕 (2006). “CDG 유한요소법을 이용한 수심적분 흐름의 수치모의.” **대한토목 학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 447-457.
- Francis, J.R., Pattanick, A., and Wearne, S. (1968). “Observations of flow patterns around some simplified groyne structures in channels.” Technical Note No. 8, Proceedings, Institution of Civil Engineers, London, England, pp. 829-846.
- Holtz, K.P. (1991). “Numerical simulation of recirculating flow at groynes.” *Computer Methods in Water Resources*, Vol. 2, No. 2, pp. 463-477.
- Mayerle, R., Toro, F.M., and Wang, S.S.Y. (1995). “Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 33, No. 2, pp. 243-256.
- Molls, T., Chaudhry, M.H., and Khan, K.W. (1995). “Numerical simulation of two-dimensional flow near a spur-dike.” *Advances in Water Resources*, Vol. 18, No. 4, pp. 227-236.
- Ouillon, S. and Dartus, D. (1997). “Three-dimensional computation of flow around groyne.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 11, pp. 962-970.
- Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B.A. (1983). “Flow near groin-like structures.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 463-480.
- Tingsanchali, T. and Maheswaran, S. (1990). “2-D depth-average flow computation near groyne.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 71-86.

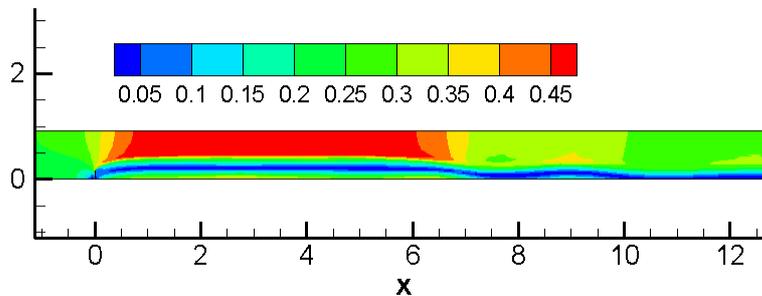


그림 1. 포물선형 와점성 모형 적용시의 유속분포

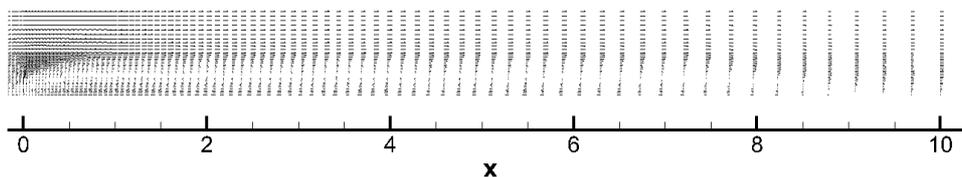


그림 2. 수계 하류부의 벡터도

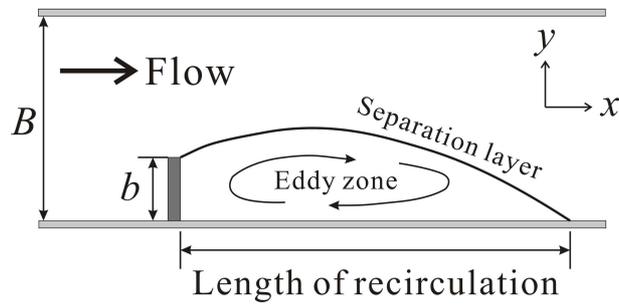


그림 3. 수계와 수로의 도식

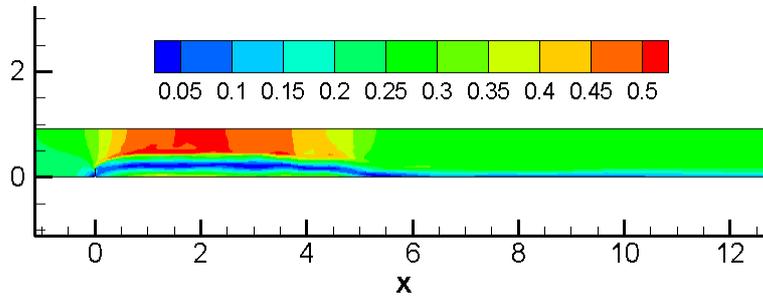


그림 4. 상수 와점성 모형 ($\nu = 0.0013$) 적용시의 유속분포

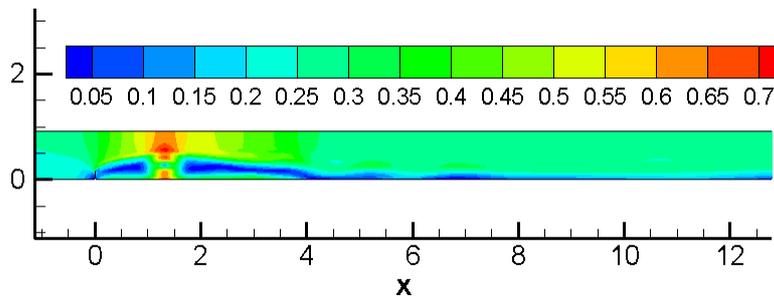


그림 5. 상수 와점성 모형 ($\nu = 0.0016$) 적용시의 유속분포

표 1. 재순환영역의 길이와 폭

연구자	무차원 재순환영역 길이 (x/b)	무차원 재순환영역 폭 (y/b)	연구분야
Francis et al.	12.5	.	실내수로실험
Rajaratnam and Nwachukwu	12.0	2.0	실내수로실험
Holtz	11.5	.	실내수로실험 / 수치모의
Tingsanchali and Maheswaran	12.0	2.0	2차원 수치모의
Molls et al.	12.0	1.85	2차원 수치모의
Ouillon and Dartus	10.7	1.9	3차원 수치모의
Mayerle et al.	8.4 ~ 15.2	.	3차원 수치모의