

하도 육역화 방지를 위한 수공구조물에 대한 연구

Numerical Study of Preventive Hydraulic Structure for Landforming

여창건*, 임장혁**, 이승오***, 송재우****

Chang Geon Yeo, Jang Hyuk Im, Seung Oh Lee, Jae Woo Song

요 지

하도 상황이 수역(水域)에서 식생역(植生域)으로 변화하여 최종적으로 육역화(陸域化)단계로의 천이가 진행되는 현상을 하도 육역화라고 한다. 하도 육역화는 하천의 생태환경적 측면에서 많은 문제들을 야기할 수 있으며, 단일 단면 하도의 복단면 고착화로 하천 통수 단면이 감소하여 하도의 홍수 관리 기능에 심각한 위해 요소로 작용할 수 있다. 본 연구는 하도 육역화 방지를 위한 수공구조물로서 말뚝을 설치하고 그 효과를 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 검토하였다. 수치 모의는 구조물 주변의 복잡한 흐름 모의를 위하여 복잡한 지형지물이 있는 경우에 많이 활용되는 LES(Large Eddy Simulation) 난류 모델을 적용하였으며 세굴 및 퇴적 영향을 알아보기 위하여 유사 세굴(Sediment Scour) 모델을 적용하였다. 하도 육역화 방지 수공구조물의 효과 검토를 위하여 모형 수로의 제방 근처에 말뚝을 설치하고 말뚝직경, 설치 간격 및 배열 등을 변화시켜 구조물 주변의 동수역학적 거동, 흐름분리 효과 및 세굴영향을 수치모의를 통하여 분석하였다. 분석 결과 말뚝에 의한 흐름 분리와 국부 세굴에 의하여 하상 퇴적이 상대적으로 감소되는 효과를 나타냈으며 설치간격이 수변으로부터 말뚝 두께의 2배 그리고 흐름방향으로 말뚝 두께의 2배 이내의 간격으로 설치하여야 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 추후 다양한 수리모형 실험을 통한 검증과 다양한 조건에 대한 수치 모의를 통하여 하도 육역화 방지 기술을 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 하도 육역화, 육역화 방지 구조물, 세굴, FLOW-3D

1. 서 론

우리나라는 경제성장과 산업화를 거치면서 하천의 정비는 환경적인 영향을 고려하기 보다는 치수와 이수기능 위주로 정비가 이루어져 왔다. 최근 환경에 대한 국민 의식수준의 향상으로 하천의 생태적 기능과 복원에 대한 필요성과 관심이 높아지고 있으나 하천의 전통적인 이수 및 치수 기능을 유지하면서 자연적 기능을 되살린 자연형 하천 복원을 하는데 많은 어려움을 내포하고 있다. 수역과 육역의 경계에 하도를 따라 선형으로 길게 연속적으로 이어지는 공간인 수변완충지대는 하천의 동식물들이 서식하여 생태시스템을 이루는 자연공간이다. 이런 수변완충지대의 수역이 토사의 퇴적으로 인하여 육역으로 바뀌는 하도 육역화(landforming)의 문제가 생태계의 건강성을 크게 훼손하여 자연형 하천복원에도 큰 문제점을 야기시키고 있다. 또한 하도 육역화는 단일 단면 하도의 복단면 고착화로 인하여 통수단면이 감소하여 치수적인 관점에서도 많은 문제점을 가지고 있다. 과거 치수 위주의 하천 정비사업에서 통수능 확보를 위하여 하상 준설 및 굴착 등으로 자연 하천에 존재하던 자연생태 환경을 인위적으로 제거하거나 댐, 교량 등과 같은 하도내 수공구조물

* 정회원 · 홍익대학교 박사과정
** 정회원 · 현대건설 기술연구소 선임연구원(공학박사)
*** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 조교수
**** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수
· E-mail : gun1230@empal.com
· E-mail : jh_lim@hdec.co.kr
· E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr(교신저자)
· E-mail : jwsong@hongik.ac.kr

을 설치하면서 흐름형태의 변화 및 하상 불안정 등의 원인으로 하도육역화가 가속화 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 하도 육역화의 원인인 수변완충지대에서 토사의 퇴적 방지를 위하여 말뚝과 같은 육역화 방지 수공구조물을 설치하고 그 형상 및 배치 등에 따른 육역화 방지효과를 수치모의를 통하여 검토하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 하도 육역화

하천의 하도 상황이 수역(水域)에서 식생역(植生域)으로의 변화를 거쳐 최종적으로 육역화(陸域化)단계로의 천이가 진행되는 현상을 하도 육역화라고 한다. 하도육역화 현상의 발생 및 진행은 하천의 생태환경적 측면에서 많은 문제점들을 야기시킬 가능성을 내포하고 있으며, 그 중에서도 원활한 유수의 흐름을 방해하여 홍수소통이라는 기본적인 하도의 홍수 관리 기능에 심각한 위해요소로 작용할 수 있다. 또한 수역으로 고려될 수 있었던 수생태계가 식생역을 거치게 되면서 급격한 생태계의 천이과정을 수반하게 되고 최종적으로 나타나게 되는 육역의 고착화로 인하여 수생태계의 건강성 측면에서도 악영향을 미치게 될 것이다. 하도 육역화 형성과정은 단일 단면의 하도가 유사의 이동 및 퇴적 과정을 통하여 점차적으로 복단면 형태의 하도를 형성한 후, 발달 및 확장하여 고수부지의 침수빈도가 감소하면서 복단면이 고착화된다. 고착화된 고수부지에는 식생의 천이 과정이 진행되며 이러한 단계가 반복되어 하천 하도에 육역화가 발생하게 된다.

2.2 FLOW-3D 모형

본 연구에서 사용된 FLOW-3D 모형은 미국 Flow Science사에서 개발한 상용 수치해석모형으로 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며 지배방정식인 연속방정식은 다음과 같다 (Flow Science, 2003).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서 V_F 는 유체의 요소체적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각 방향의 유속, A_x, A_y, A_z 는 각 방향 요소면적이다. 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 식(2) ~ (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서 G 는 체적력이고 f 는 점성력을 나타낸다. 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid)함수, $F(x, y, z, t)$ 로 표현되며, 식(5)는 일반적인 VOF함수를 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(Fu) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw) \right\} = FDIF + FSOR \quad (5)$$

여기서 FDIF는 Diffusion of Fluid Fraction이고, FSOR은 Fluid Source와 Sink이다.

또한, FLOW-3D에서는 이송 확산 방정식에 의해 유사 세굴을 모의하는 것이 아니라 밀도차를 고려한 침전 속도와 전단력에 의한 침식 속도를 계산하며 하상 경계층에서의 침식 속도(양력 속

도, Lift Velocity)는 다음 식(6)과 같이 계산된다(Flow Science, 2003).

$$w_l = C \sqrt{\frac{\tau - \tau_c}{\bar{\rho}}} \quad (6)$$

여기서, τ 는 경계층에서의 전단력, τ_c 는 한계전단력이며, $\bar{\rho}$ 는 거시적 유체 밀도이다. C는 세굴 침식률에 관한 경험적인 매개변수이다. 즉, 전단력이 한계전단력보다 큰 지점에서는 세굴 침식이 발생하며 작은 곳에서는 침전 속도에 따라 유사입자들이 계속해서 퇴적하게 된다. 이 때 한계 전단력 τ_c 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\tau_c = C_{sh} \cdot d \cdot g(\rho_p - \rho_w) \quad (7)$$

여기서, C_{sh} 는 한계 쉴드 매개변수(Critical Shields Parameter)이며 d 는 평균 유사입경, ρ_p 는 유사 입자의 밀도, 그리고 ρ_w 는 유체의 밀도이다.

3. 수치모의 적용

본 연구에서는 하도 육역화 방지를 위하여 하천 변에 설치되는 말뚝의 수리학적 특성을 파악하여, 하도 육역화 방지효과를 알아보고자 그림 1과 같이 말뚝을 설치하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의에서 사용된 말뚝의 제원은 수로의 우안쪽에 직경(D) 0.05m, 0.1m, 높이(h_p) 0.1m의 수중 말뚝들을 다양한 형태로 설치하여 유입부의 초기 수심 0.15m, 초기 유속 0.25m/s의 조건 하에서 수행하였다.

3.1 경계조건 및 입력자료

수치모의 수행을 위한 FLOW-3D의 격자망은 총 168,000개의 직육면체형 격자를 사용하였고 말뚝 주위의 흐름특성과 유사의 이동을 관찰하기 위하여 말뚝 주변은 보다 세밀하게 격자간격을 분할하였다. 말뚝 주변의 와류와 전체 유동장의 난류 모의를 위하여 복잡한 지형지물이 있는 경우에 많이 활용되는 LES(Large Eddy Simulation) 난류 모델을 적용하였으며(최성욱 등, 2001), 세굴 및 퇴적 영향을 알아보기 위하여 유사 세굴(Sediment Scour) 모델을 적용하였다. 수치모의에 적용된 수로 및 말뚝의 제원과 경계조건은 그림 1 및 표 1과 같다.

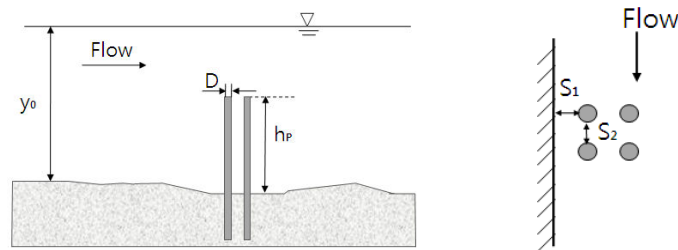


그림 1. 수치모의 적용 말뚝의 형태

표 1. 수치모의 적용 수로의 제원 및 실험 조건

수로 길이(m)	수로 폭(m)	말뚝직경(m) (D)	말뚝높이(m) (h_p)	말뚝간격		말뚝 배열
				가로(S_1)	세로(S_2)	
5m	1.0m	0.05m, 0.1m	0.1m	1.0D~2.0D	1.0D~2.0D	1열~2열

3.2 수치모의 결과

원형 말뚝에서의 세굴은 원형교각에서와 마찬가지로 말뚝 전면부의 하강류와 말뚝주위로 흐르는 와류에 의하여 국부세굴이 발생한다. 이러한 말뚝에 의한 국부세굴을 이용하여 하도 육역화 방지 효과를 알아보기 위하여 수치모의를 수행하였다. 지름 0.05m와 0.1m의 단일 말뚝을 수로 벽면에서 말뚝의 직경을 기준으로 말뚝 직경의 1.0배, 1.5배, 2.0배 간격으로 이격시켜서 설치하여 하도 육역화의 원인인 하천변 토사의 퇴적을 방지할 수 있는지를 수로 벽면인 호안에서의 세굴 효과로 검토하였다. 그림 2의 (a)에서 보인 바와 같이 수로벽면으로부터 말뚝 직경(D) 만큼 떨어진 경우에서 수로 벽면을 따라서 세굴이 발생하여 하도 육역화 방지에 효과가 있는 것으로 나타났다. 하지만 말뚝의 간격이 수로 벽면에서 멀어질수록 세굴효과가 감소하며 그림 2의 (c)와 같이 말뚝 두개의 2배(2D)의 간격으로 설치되었을 경우에는 말뚝 주위의 국부세굴만이 발생하며 벽면에서의 세굴효과는 발생하지 않았다. 이는 최대 바닥전단력이 말뚝 전면부 1.3D, 50°인 지점에서 발생하기 때문이다(서일원 등, 2000) 그림 3에서 나타낸 바와 같이 말뚝에 의한 흐름 분리 영향이 수로벽면까지 미치지 못하여 하도 육역화 방지에 효과를 주는 수로 벽면의 세굴이 발생하지 않기 때문으로 판단된다.

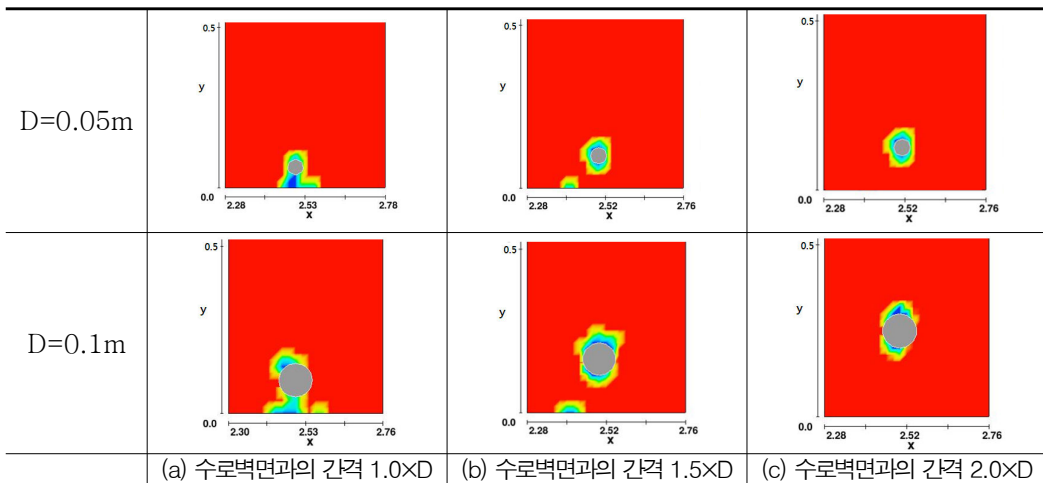


그림 2. 말뚝 간격에 따른 세굴 변화

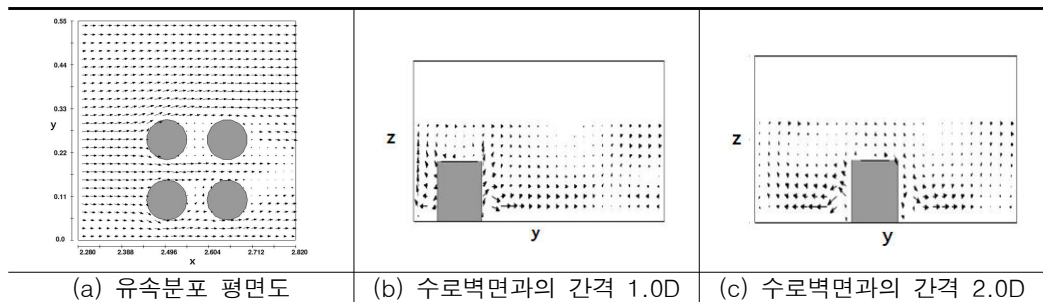


그림 3. 수치모의 적용 말뚝의 형태

수로 벽면인 호안에서 유사의 퇴적에 의한 하도 육역화를 방지하기 위해서는 말뚝을 하천 호안을 따라 연속적으로 설치하여야 효과를 얻을 수 있다. 따라서 흐름 방향에 따른 말뚝의 적정 설치 간격을 알아보고자 말뚝 간의 간격이 흐름방향으로 말뚝 두개의 1.0배와 2.0배가 되도록 설치하여 흐름 방향 설치 간격에 따른 세굴특성을 살펴보았다. 그림 4에서 보인바와 같이 흐름 방향

말뚝의 간격이 말뚝 두께의 1.0배인 경우에는 수로 벽면을 따라서 세굴이 연속적으로 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 흐름 방향 말뚝의 간격이 말뚝 두께의 2.0배인 경우에는 수로벽면에서 세굴현상이 발생하지만 일부 구간은 약간 단절되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 하도 육역화 방지를 위한 말뚝을 설치할 경우에는 호안으로 말뚝 두께의 1.5배를 넘지 않는 범위에서 호안을 따라서 말뚝두께의 2.0배 이하의 간격으로 연속적으로 설치하여야 효과적일 것으로 판단된다.

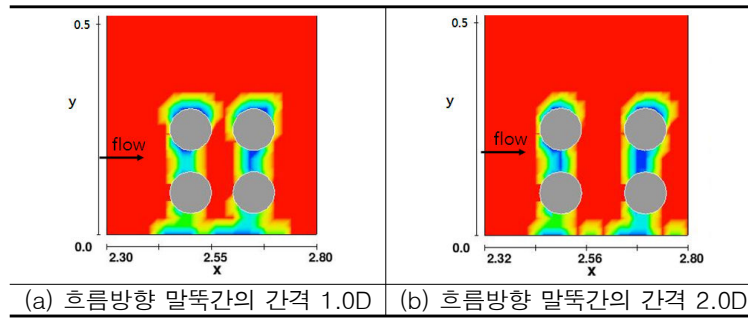


그림 4. 흐름 방향 말뚝 설치 간격에 따른 세굴 변화

4. 결 론

본 연구는 하천의 생태환경적 문제와 하천 통수능 감소로 하도의 홍수 관리 기능을 악화시키는 하도 육역화를 방지하기 위하여 수중 말뚝을 설치하여 하도 육역화 방지구조물로서의 기능을 수치모의를 통하여 검토하였다. 하도 육역화의 주요 원인인 하천 수변의 퇴적을 방지하기 위해서는 수중 말뚝의 설치 위치가 중요하며 수치모의 결과 설치간격이 수변으로부터 말뚝 두께의 2배를 넘으면 말뚝에 의한 세굴의 영향이 수로벽면까지 미치지 않아서 육역화 방지 구조물로서의 효과를 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 공간에 대해 연속적인 육역화 방지를 위해서는 하천의 흐름 방향으로 말뚝두께의 2배를 넘지 않게 연속적으로 설치하여야 할 것으로 판단된다. 추후 다양한 구조물과 조건을 이용한 수치모형 실험을 통하여 하도 육역화 방지 구조물의 효과를 실증적인 차원에서 검토해야 할 것이다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 서일원, 김영도(2000). “원형교각 주위의 국부세굴과 난류구조에 관한 실험적 연구”, **대한토목학회 논문집**, 제20권 제3-B호, pp. 343-350.
2. 최성욱, 양원준(2001). “교각주위 국부세굴의 큰 와 수치모의”, **대한토목학회 2001년 학술발표회 논문집**, pp. 1-4.
3. 최홍윤, 노경범, 진영훈, 박성천(2001). “교각형태에 따른 교각주위의 국소세굴 형상에 관한 실험적 연구”, **한국수자원학회 2006년도 학술발표회 논문집**, pp.1601-1604.
4. Flow Science, (2003). *Flow-3D User's Manual*, Los Alamos, NM, USA.