

배사구 유입부 흐름 및 하상변동 수치모의를 위한 매개변수 검정 및 민감도 분석에 관한 연구

장은경 · 임종철¹⁾ · 지 윤* · 여운광

명지대학교 토목환경공학과, ¹⁾서영엔지니어링

(2011년 6월 27일 접수; 2011년 8월 4일 수정; 2011년 9월 2일 채택)

Parameter Calibration and Sensitivity Analysis for Numerical Modeling of Flow and Bed Changes near the Opening Gate for Sediment Release

Eun Kyung Jang, Jong Chul Lim¹⁾, Un Ji*, Woon Kwang Yeo

Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin 499-728, Korea

¹⁾*Water Resource Team, Seoyeong Engineering Co., Ltd., Yongin 448-160, Korea*

(Manuscript received 27 June, 2011; revised 4 August, 2011; accepted 2 September, 2011)

Abstract

The bed change analysis near the opening gate of a dam or weir to release deposited sediments have been conducted mostly using the numerical models. However, the use of unverified input parameters in the numerical model is able to produce the different results with natural and real conditions. Also, the bed changes near the opening gate of a dam or weir calculated with a numerical model could be varied depending on the geometry extent included the downstream area with supercritical flow in the model. In addition, the different time steps could provide different results in the bed change calculation, even though other conditions such as input parameters, geometries, and total simulation time were same. Therefore, in this study, hydraulic experiments were performed to validate the eddy viscosity coefficient which is the one of important input parameters in the RMA2 model and relevant to variation of simulation results. The bed changes were calculated using the SED2D model based on flow results calculated in the RMA2 model with the verified and selected eddy viscosity coefficient and also compared with experimental results. The bed changes near the opening gate were underestimated in the numerical model comparing with experimental results except only the numerical case without the modeling section of sediment release pipe and downstream area where the supercritical flow was produced. For the simulation of minimum time steps, different shapes of scour hole were produced in numerical and physical modeling.

Key Words : Bed change simulation, Numerical time step, Sediment release, Sensitivity analysis, Eddy viscosity coefficient

1. 서론

하천이나 저수지의 상류에서 유입되는 흐름이 하류 지역에 위치한 댐이나 보 등의 수공구조물에 접근하게 되면 하상경사가 작아지고 유속이 감소하게 되어 유사 이송능력 저하로 인한 퇴사현상이 발생한다. 이러한 퇴사현상이 심해질 경우 댐이나 보 등과 같은 수공구조물

*Corresponding author : Un Ji, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin 499-728, Korea
Phone : +82-31-330-6808
E-mail : jjuncivil@gmail.com

의 기능적인 측면에 문제를 발생시킬 뿐 아니라 유사퇴적으로 인한 홍수위 상승 등의 문제를 발생시키기도 한다. 퇴사문제는 저수지, 댐에서 뿐만 아니라 운하에서 선박 운행을 위해 건설되는 댐, 주운보, 갑문시설 등과 같은 하천 수공구조물에서도 발생할 수 있다. 주운을 목적으로 하는 수로는 선박이 통과할 수 있는 주운수심이 유지되어야 하지만 유사의 퇴적으로 주운수심이 유지되지 못하면 선박항해에 큰 영향을 미치게 된다. 이와 같은 퇴사 및 배사 문제해결을 위해 상류와 하류 하천간의 흐름 차단을 억제하고 상류로부터 유입되는 유사가 댐이나 보 상류 부분에 퇴적되는 현상을 방지하기 위해 수문이 설치되어있는 혹은 상시 개방되어 있는 배사관을 설치하기도 한다(지 등, 2009).

댐이나 보 등과 같은 수공구조물 주변에서의 하상변동을 분석하기 위한 연구 방법으로는 크게 수리모형실험을 활용하는 방법과 수치모의를 활용하는 방법이 있다. 수리모형실험은 모형과 원형 간의 흐름 상사성에 대해 Froude 상사법칙을 만족시켜야한다. 유사이송 및 하상변동을 예측하기 위한 이동상 모형실험의 경우 저항계수 상사, 무차원 유사입경 상사, 무차원 한계소류력 상사 등의 상사법칙을 고려하여 Froude 상사와 함께 검토해야 한다(Julien, 2002). 하지만 실제 이동상 수리모형실험에서는 앞서 설명한 4가지 상사를 모두 만족시키기는 것이 현실적으로 불가능하다. 반면, 수치모의의 경우 이러한 상사성에 있어서 제약 없이 손쉽게 여러 흐름 조건이나 하상토 분포 등을 다양하게 적용시킬 수 있는 장점이 있다. 국내에서는 최근에 지 등(2008)이 낙동강 하류를 대상으로 유사 특성과 낙동강하구둑 준설효과에 관한 수치모의를 수행하였으며, 윤 등(2003)은 한강 하류부의 하상변동 원인을 분석하기 위해 CCHE2D 모형을 활용하였다. 이 등(2006)은 HEC-6 모형을 이용하여 임진강 하상변동 예측에 관한 연구를 수행하였으며, 안 등(2007)은 HEC-6 모형을 이용하여 형산강의 장기하상변동을 모의하였다. 하지만, 수치모의는 유사거동에 대한 명확한 이론이 성립되지 않아 특정한 경험공식을 이용해야 한다는 점과 검증되지 않은 매개변수 사용으로 실제 자연현상과 상이한 결과가 나올 수 있다는 문제점이 있다(임, 2008).

이러한 수치모의 상의 문제점을 해결하기 위해서

는 실측된 현장자료를 이용해 흐름 계산시 사용되는 와점성계수와 같은 모형의 매개변수 검증 과정이 반드시 필요하며 하상변동 예측시에는 검증된 모형에서 채택하고 있는 여러 수치모의의 조건에 대한 대상하천의 적용성도 반드시 검토해야 한다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 댐이나 보에 설치되는 배사관을 단순화하여 수리모형실험을 수행하였으며 상사의 왜곡 없이 실제모형 크기를 2차원 수치모형의 적용한 후 유입부 흐름 및 하상변동을 계산하고 상호비교 분석과정을 통해 매개변수 검증 및 수치모의의 조건에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

본 연구의 목적은 첫째, 배사구 유입부에서의 흐름 분석을 위해 RMA2 모형의 입력자료로 사용되는 와점성계수의 변화에 따른 유속과 수심 결과를 수리모형실험 결과와 비교 검증하여 민감도 분석을 실시하고자 한다. 둘째, RMA2 흐름모의 결과를 기초로 SED2D 모형을 이용하여 배사구 유입부에서의 하상변동 모의시 사류발생 구간의 포함 여부에 따라 하상변동 결과가 어떻게 달라지는지를 분석하고자 한다. 셋째, SED2D모형을 이용한 하상변동 모의시 계산시간 간격 설정에 따른 수치모의상의 하상변동 결과 값의 차이를 분석해 보고 동일한 지형의 서로 다른 경계조건들을 모의할 경우 동일한 계산시간간격의 적용이 반드시 필요한지에 대해서도 알아보하고자 한다.

2. RMA2와 SED2D 모형의 개요

2.1. 흐름분석을 위한 RMA2 모형

본 연구에서는 2차원 유한요소모형으로 정류, 부정류 모의가 가능하고 전,후 처리가 편리한 흐름모의 프로그램인 RMA2 모형을 이용하였으며 기본방정식은 다음과 같다. RMA2 모형의 기본방정식인 수심평균된 2차원 천수방정식은 자유 수면을 가진 물의 운동을 기술하는 3차원 Navier-Stokes 방정식의 일반식을 수심방향으로 적분함으로써 유도될 수 있다. 이때 연직방향의 가속도항은 무시하여 압력항을 정수압 분포로 처리하며, 유체는 비압축성이라 가정한다. 수심 적분된 2차원 천수방정식의 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다(EMRL, 2000).

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) \\ & - \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) \\ & - \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, u, v 는 x, y 방향의 유속, h 는 수심, a_0 는 하상 표고, $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yy}$ 는 와점성계수이며 C 는 Chezy 공식의 Chezy 계수, ρ 는 유체의 밀도를 나타내고 있다.

2.2. 하상변동 모의를 위한 SED2D 모형

본 연구에서 사용한 SED2D 모형은 2차원 정상적 및 동수역학적인 유사이송과 하상변동을 분석하는 프로그램이다. 유한요소망에서 SED2D의 계산은 Arithurai 등 (1977)이 제안한 이송-확산 방정식을 기초로 하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $C =$ 농도(kg/m^3), $t =$ 시간(sec), $D_x, D_y =$ x, y 방향 유사확산계수, $\alpha_1 =$ 하상근원(bed source)에 대한 계수(1/sec), $\alpha_2 =$ 하상공급(bed source)의 평형농도부분($kg/m^3/sec$)이다. 총유사량 C_{eq} 를 계산하는 많은 이송관계식이 있으나, SED2D의 경우 Ackers and White(1973)공식만을 사용한다. SED2D에서 채택하여 사용되는 Ackers and White(1973) 공식은 에너지 개념 형태의 식으로써 무차원 유사량은 이동 수(mobility number)에 관계한다는 차원 해석에서 출발한다. 이 공식은 증소하천에 적용했을 때와 중앙입경이 0.04 mm보다 크고 D_{35} 가 4 mm보다 작은 경우에

적용하는 것이 결과 값의 신뢰성이 높다. 유사량 공식들의 민감도분석 결과(한국건설기술연구원, 1989)에 의하면, Ackers and White 공식은 하상토 입경이 0.25 mm 보다 작은 영역에서 유사량이 과다하게 추정되기 때문에 이 공식은 세사나 극세사에 대해 적용하기 어렵다는 평가를 받고 있다. 또한 단일입경에만 적용할 수 있으며 Froude 수가 0.8 이하일 경우에만 사용하도록 추천하고 있다(EMRL, 2000).

3. 수리모형실험 및 수치모의 조건

3.1. 수리모형실험장치 및 조건

본 실험에서는 수조를 포함한 길이 25 m, 높이 0.8 m, 그리고 폭 0.8 m의 수로가 사용하였다. 개수로 상류단에는 고수조에 유입된 물을 받아 유량을 조절할 수 있는 사각 위어(Weir)가 설치되어 있으며 수로의 끝에는 수위를 조절할 수 있는 수문이 설치되어있다. 유량 공급 장치는 고수조, 저수조, 순환수로, 펌프(최대공급유량 360 l/s)로 구성되어있다. 한편 유속은 1차원 프로펠러유속계를 이용하였으며 수심은 포인트 게이지를 이용하여 측정하였다. 와점성계수 검정을 위한 수리모형실험의 조건은 Table 1과 같으며 유속 및 수심은 구조물의 영향을 받지 않는 구조물 전면에 상류방향으로 1 m 떨어진 지점에서 측정하였다.

배사구 주변에서의 흐름 및 하상변동 수리모형실험을 위해 Fig. 1과 같은 아크릴 재질의 배사관을 제작하였다. 배사구 폭은 0.3 m로 설정하였으며 배사구 높이 또한 0.3 m로 배사구 형태가 정사각형 모양이 되도록 제작하였다. 또한 아크릴 하단에서 배사관 입구바닥 높이는 하상재료 포설높이와 같은 0.2 m로 제작하였다. 제작된 배사관은 개수로 실험 장치의 유입부에서 5.4 m 떨어진 지점에 설치하였으며 배사구로부터 상류방향으로 2 m, 하류방향으로 1 m 지점의 범위까지 높이 0.2 m로 하상재료를 포설하였다(Fig. 2). 배사구 바닥 높이에 따른 수리모형실험을 진행하기 위해 0.03 m와 0.06 m 높이의 목재를 배사구 하단에 설치하여 높이를 조절할 수 있도록 하였다. 배사구 주변에서의 흐름 및 하상변동 분석을 위한 수리모형실험의 조건은 Table 2와 같으며 실험조건 명칭(예: C086, C344)의 C는 CASE의 약자이고 첫 번째 숫자는 배사

구 바닥과 하상과의 높이차, 두 번째 숫자는 하도 경사, 세 번째 숫자는 유량을 의미한다.



Fig. 1. Sediment release pipe used in experiments.

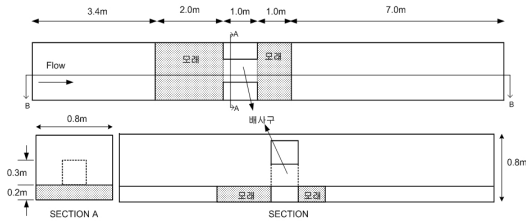


Fig. 2. Layout of experimental open channel.

3.2. 수치모의를 위한 입력조건

수치모의시 유한요소해석을 수행하는데 있어서 가장 중요한 것은 유한 요소망의 구축이다. 와점성계수 분석을 위한 수치모의의 유한요소망은 개수로 실험장치 및 개수로에 설치된 배사관과 같은 크기로 구성하였다. 수치모의에서 격자망 크기에 따른 민감도분석을 위해 3가지 크기가 다른 격자망 간격으로 지형을 구축하였으며 각각의 격자점수는 4,020개, 8,042개, 16,995개이다. 와점성계수 분석을 위한 수치모의 조건은 Table 1과 같으며 유량, 경사 및 하류수위 조건은 수리모형실험과 동일하고 격자점수와 와점성계수를 바꾸면서 민감도 분석을 수행하였다. 와점성계수의 범위는 각 모의조건 별로 지형 및 경계조건에 따라서 수렴 조건 내에 있는 최소 및 최대값으로 설정하였다.

배사구 유입부에서의 하상변동을 위한 수치모의에서 사용된 유한요소망 또한 수리모형실험에서 사용한 개수로 실험장치 및 아크릴로 제작된 배사구와 같은 크기로 구성하였다. 본 연구에서 사용된 하상변동 모형인 SED2D는 하상조건이 나무 및 콘크리트 재질 등의 침식활동이 없는 지형을 재현할 수 없고 모두 침식이 가능한 하상재료로 인식하기 때문에 본 수치모의에서는 배사구 상류의 지형조건을 수리모형실험에서

Table 1. Experimental cases for eddy viscosity coefficients

Case	Flow rate (m ³ /s)	Downstream depth (m)	Slope (%)	# of mesh points	Eddy viscosity coefficient range (N-sec/m ²)
CASE 1	0.06	0.3	1	4020	1 ~ 500
				8042	1 ~ 500
				16995	1 ~ 350
CASE 2	0.06	0.4	1	4020	1 ~ 1000
				8042	1 ~ 1000
				16995	1 ~ 500
CASE 3	0.06	0.3	0	4020	1 ~ 1000
				8042	1 ~ 1000
				16995	1 ~ 500
CASE 4	0.04	0.3	1	4020	1 ~ 500
				8042	1 ~ 350
				16995	1 ~ 1000
CASE 5	0.04	0.4	1	4020	1 ~ 1000
				8042	1 ~ 1000
				16995	1 ~ 500
CASE 6	0.04	0.3	0	4020	1 ~ 1000
				8042	1 ~ 1000
				16995	1 ~ 500

Table 2. Experimental cases for the bed change analysis near the opening gate for sediment release

No.	Case	Entrance bottom height (m)	Slope (%)	Flow rate (m ³ /s)	Downstream depth (m)
1	C086	0.00	0.8	0.06	0.3
2	C084	0.00	0.8	0.04	
3	C046	0.00	0.4	0.06	
4	C044	0.00	0.4	0.04	
5	C386	0.03	0.8	0.06	
6	C384	0.03	0.8	0.04	
7	C346	0.03	0.4	0.06	
8	C344	0.03	0.4	0.04	
9	C686	0.06	0.8	0.06	
10	C684	0.06	0.8	0.04	
11	C646	0.06	0.4	0.06	
12	C644	0.06	0.4	0.04	

모래포설범위인 배사구 상류 2 m까지 재현하였다. 배사구 유입부에서의 하상변동 모의를 위한 수치모의 경계조건은 수리모형실험과 동일한(Table 2) 조건으로 수행하였으며 하상재료 또한 실험에서 사용했던 모래 크기와 동일한 중앙입경(0.53 mm)을 사용하였다. Crank-Nicholson θ 값은 Default 값인 0.67을 각각 사용하였으며 유입되는 부유사농도 값은 실제 개수로 모형실험과 같은 조건으로 상류에서 유입되는 부유사가 없는 것으로 설정하였으며 유사공급은 접근수로에서만 발생하는 것으로 하였다. 유사확산계수는 100 m²/sec를 사용하였으며 침강속도는 Rubey식에 의해 계산된 0.0764 m/s를 사용하였다.

4. 와점성계수 분석 및 배사구 유입부에서의 흐름모의 결과

4.1. 와점성계수의 선정

Hardy 등(2000)은 격자망 스케일의 영향을 고려한 와점성계수의 선정이 난류모형의 문제뿐만 아니라 수치모형의 보정에 더 좋은 결과를 보여준다고 하였다. 본 연구에서는 격자망 간격의 영향을 고려하기 위해 3 종류의 격자망 종류에 따른 와점성계수의 유속과 수심에 따른 민감도 분석을 실시하였으며 수리모형실험을 통해 나온 결과와 비교하여 수치모의에서 실제 수리적 현상과 가장 비슷한 현상을 재현하는 와점성계

수를 선정하였다.

와점성계수 분석을 위한 수리모형실험 결과는 Table 3과 같으며 배사관 내부에서의 유속은 구조물 상류 1 m 지점에서의 유속보다 약 3배 빠르게 나타났고 구조물 하류 0.5 m 위치에서 유속은 구조물에서 빠져나온 와류의 영향으로 불규칙하게 나타난 것을 알 수 있다. 실험으로부터 도출해낸 흐름특성 결과는 수치모의에서 와점성계수를 변화시켜가며 동일한 지점에서 도출해낸 유속 및 수심과 비교하였고 이는 수치모형 내 지형자료의 격자점 수에 따라 다르게 나타나기 때문에 격자점 수 4,020개, 8,042개, 16,995개의 지형조건에 따라 와점성계수를 다양하게 변화시키면서 동일한 지점에서 수리모형실험의 결과 값(유속과 수심)과 비교하였다.

CASE 1에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 모의 결과 CASE 1에서 격자점 수 4,020개의 지형일 경우 수리모형실험 결과와 같은 유속 값이 산정된 와점성계수는 10.693, 동일한 수심에 대한 와점성계수는 7.389로 계산되었으며 평균 9.041인 것으로 분석되었다. 격자점수 8,042개일 경우 수리모형실험의 유속 및 수심과 동일한 값이 모의가 되는 와점성계수는 각각 6.617, 7.789이며 평균 8.703이었고, 격자점수 16,995개에 대해서는 와점성계수는 각각 9.262, 6.316이고 평균 7.789로 분석되었다.

Table 3. Hydraulic experimental results for the analysis of eddy viscosity coefficients

Case	1 m upstream		Sediment release pipe		0.5 m downstream	
	Vel. (m/s)	Depth (m)	Vel. (m/s)	Depth (m)	Vel. (m/s)	Depth (m)
CASE 1	0.258	0.270	0.882	0.240	0.196	0.248
CASE 2	0.198	0.349	0.600	0.331	0.128	0.342
CASE 3	0.211	0.318	0.720	0.290	0.145	0.293
CASE 4	0.202	0.252	0.677	0.240	0.124	0.245
CASE 5	0.146	0.347	0.459	0.344	0.090	0.351
CASE 6	0.157	0.318	0.720	0.290	0.141	0.297

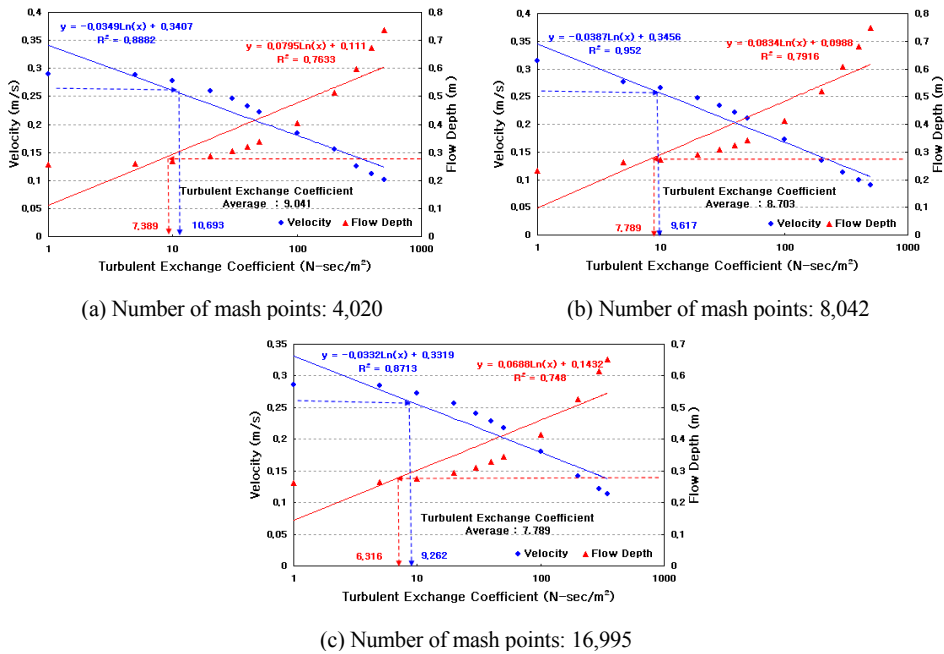


Fig. 3. Numerical modeling results for CASE 1 with various eddy viscosity coefficients.

와점성계수 분석을 위한 수리모형실험과 수치모의와 결과를 종합하여 Fig. 4와 같은 격자점수와 와점성계수와의 관계 그래프를 작성하였다. 격자점수가 많아질수록 유속조건이 빠를수록 수치모의 상에서 실제 현상과 동일한 값을 도출해 내는 와점성계수는 작아지는 경향이 있으며 유량이 다르면 추세선의 경사가 바뀌는 것을 확인할 수 있다.

도출된 결과(Fig. 3과 4)를 기초로 수행되는 배사구 유입부에서의 흐름 및 하상변동 모의를 위한 최적의 와점성계수를 결정하였다. 배사구 유입부에서의 흐름

및 하상변동 분석을 위한 수치모의에서의 격자점수인 8867개와 경사 0.8%와 0.4%에 맞는 와점성계수를 결정하기 위해서 유량 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때는 Fig. 4에서 CASE 1과 CASE 3의 추세선을 선형보간 하여 경사 0.8%와 경사 0.4%일 때의 와점성계수를 결정하였으며, 유량 $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때는 Fig. 7에서 CASE 4와 CASE 6의 추세선을 선형보간 하여 와점성계수를 결정하였다. 따라서 4.2절의 배사구 유입부에서의 흐름 및 하상변동 모의를 위해 결정된 와점성계수는 Table 5와 같다.

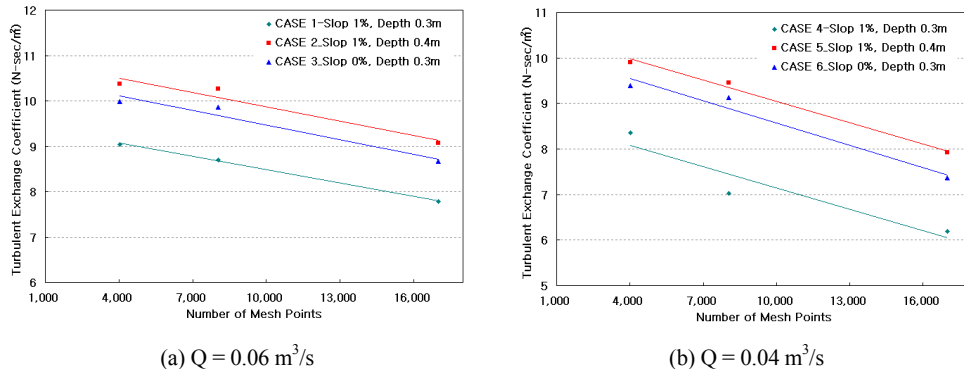


Fig. 4. Number of mash points and eddy viscosity coefficients.

Table 4. Eddy viscosity coefficients calculated for experimental cases of the bed change analysis near the opening gate for sediment release

Flow Rate (m ³ /s)	Slope (%)	Eddy viscosity coefficient (N-sec/m ²)
0.06	0.4	9.22
	0.8	8.79
0.04	0.4	7.83
	0.8	7.22

4.2. 배사구 유입부에서의 흐름모의

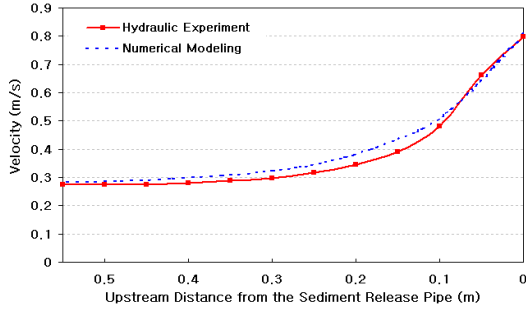
본 연구에서는 Table 4와 같이 선정된 최적의 와점 계수를 이용하여 배사구 유입부에서의 흐름 특성을 계산한 후 SED2D 모형을 이용하여 배사구 유입부에서의 하상변동 수치모의를 수행하였으며 그 결과를 수리모형실험 결과와 비교하였다(Fig. 5). 접근유속은 수치모의 결과가 수리모형실험에 비해 약 0.01 m/s 큰 근사한 값을 유지하다가 배사구에 가까워질수록 수치모의와 수리모형실험의 유속 차는 점점 커지고 배사구 유입부 부근에서는 수치모의 유속이 수리모형실험에 비해 약 0.15 m/s 크게 계산된 것을 확인할 수 있다. 수심은 접근수로에서 수리모형실험이 수치모의 보다 약 0.002 m 크게 유지되다가 배사구 유입부에서 0.04 m 떨어진 지점에서 상승하고 다시 배사구 유입부에 다가갈수록 줄어들었으며 배사구 전면에서는 수치모의가 수리모형실험보다 0.04 m 정도 작게 계산된 것을 확인할 수 있다. 하지만 수리모형실험에서 수심의

변화는 미세하게 감소 하지만 수치모의에서는 변화 폭이 수리모형실험 결과보다 큰 것으로 관측되었다.

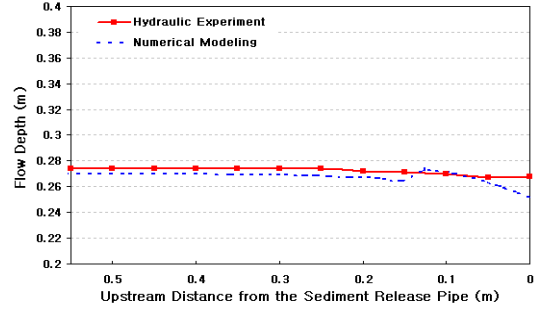
5. 배사구 유입부에서의 하상변동 분석

5.1. 모의구간에 따른 하상변동 분석

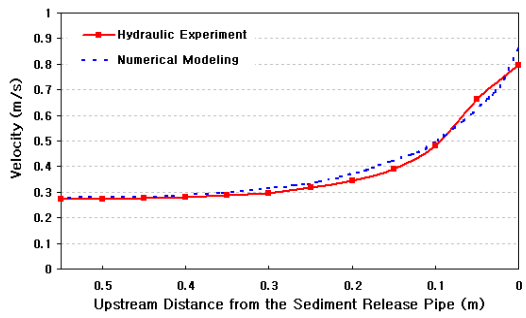
배사구 유입부에서의 하상변동을 분석을 위해 본 연구에서는 하상변동 모형인 SED2D를 이용하였다. SED2D 모형은 Ackers & White(1973) 공식을 총유사량 산정공식으로 채택하고 있으며 이 공식은 Froude 수가 0.8 이하일 경우만 적용할 것을 권고하고 있다 (한국건설기술연구원, 1989). 본 연구에서는 Fig. 6에서 보는 것과 같이 배사관 내에서 그리고 배사관을 빠져나온 흐름은 Froude 수가 1이 넘는 사류이며 Ackers & White공식(1973)을 적용할 수 있는 Froude 수 영역을 벗어나게 된다. 따라서 Fig. 7과 같이 모의 구간을 4가지 유형으로 나누어 사류가 발생하는 하류 모의 구간이 배사구 유입부의 하상변동 모의결과에 미치는 영향을 분석하였다. 유형 I은 배사구 상류와 배사관, 배사구 하류구간을 모두 포함한 것이며 유형 II는 배사관 길이의 50%(50 cm)만을 고려한 것이다. 유형 III은 배사관 전체길이의 5%(5 cm)만을 구축하였으며 유형 IV는 배사구 상류에서 배사구 전면까지만 고려한 조건이다. 수치모의에서의 유형별 하류단 경계조건은 실제로 수리모형실험에서 각 하류단에 해당되는 지점에서 발생한 수위조건을 경계조건으로 활용하였다.



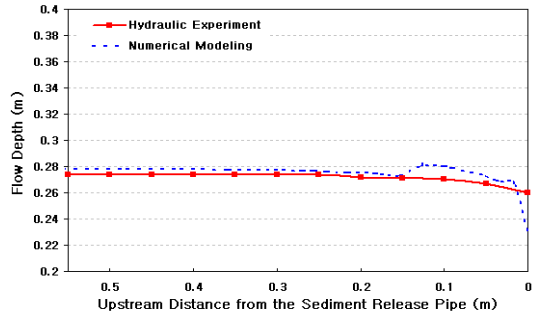
(a) Velocity profile for C086



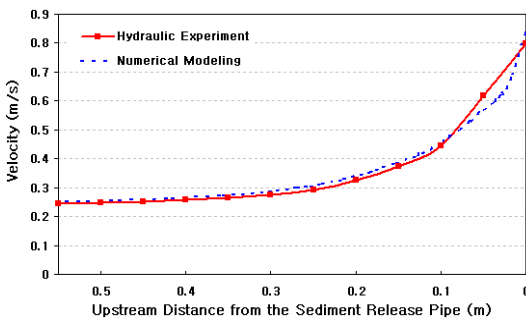
(d) Water depth profile for C086



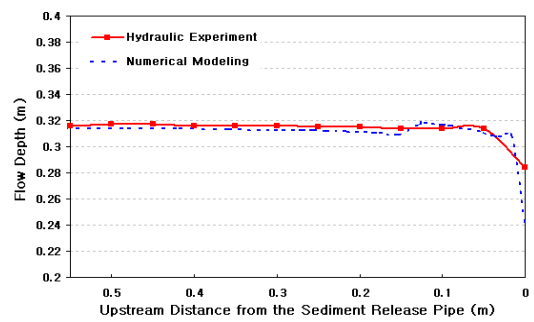
(b) Velocity profile for C386



(e) Water depth profile for C386



(c) Velocity profile for C686



(f) Water depth profile for C686

Fig. 5. Numerical and experimental results of velocity and water depth profiles.

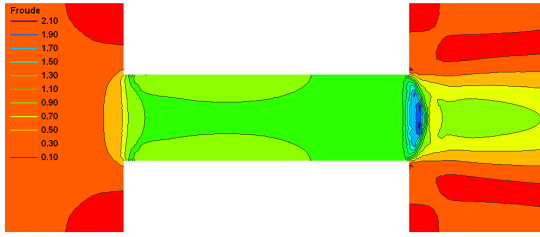


Fig. 6. Froude number distribution of C686(Flow direction →).

수치모의 흐름 결과 4가지 유형 모두 배사구 유입부에서 상류 0.2 m 떨어진 지점까지는 수치모의와 수리모형실험 값이 서로 근접한 값을 갖지만 배사구 유입부에서 상류 0.2 m 떨어진 지점에서부터는 조금씩 편차가 커지면서 배사구 전면에서는 유속 및 수심차가 많이 나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 유형 IV의 배사구 전면 유속이 다른 유형에 비해 약 0.17 m/s 크게 계산되었다.

모의구간별 수치모의와 수리모형실험의 하상변동 결과 중 최대 세굴심을 비교하면 Fig. 8과 같다. 수치모의 결과 배사관의 재현 길이가 길수록 최대 세굴심은 작게 계산되었으며 유형 IV를 제외한 나머지 유형은 세굴심이 수리모형실험 현상과 비교했을 경우 매우 작게 계산되는 경향을 보였고 유형 IV의 하상변동

예측이 수리모형실험과 가장 근접한 것으로 나타났다. 또한 배사관의 바닥 높이가 높을수록 수치모의의 최대 세굴심이 수리모형실험 결과에 비해 더 작게 발생하며 수리모형실험과의 차이는 C086의 경우 각각 17배, 3.8배, 3.6배, 1.88배, C386일 때는 각각 11.4배, 4.2배, 3.1배, 1.64배, C686일 때는 각각 122배, 36.1배, 14.8배, 2배의 차이가 있는 것으로 나타났다. 배사관의 재현길이가 길어질수록 배사관 내의 유속이 빨라져 배사관 내의 Froude 수가 커지는 현상이 발생하게 된다. Froude 수가 커짐에 따라 SED2D 모형에서는 계산수렴의 안정성을 위해 계산간격이 크게 설정되어야 하며 이로 인해 세굴심은 더 작게 계산되는 결과가 발생한다. 이러한 이유로 유형 IV에서 가장 큰 세굴심이 나올 수 있었으며 또한 RMA2 모형을 이용한 흐름모의에서 유형 IV에서 유속이 가장 크게 계산되었기 때문에 상대적으로 유형 IV의 세굴심이 크게 산정된 것으로 판단된다. 따라서 향후 SED2D를 이용하여 배사구 유입부에서의 하상변동을 모의시 Froude 수가 큰 구간 즉, 사류 발생 구간은 모의 구간에서 제외시켜야 실제 최대 세굴심과 가장 비슷한 결과를 도출해 낼 수 있을 것이다.

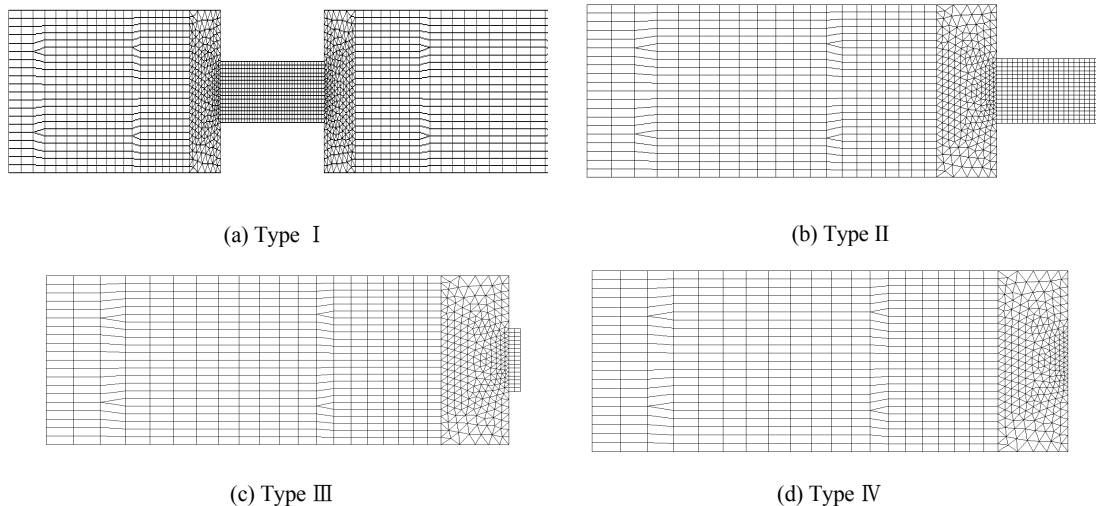


Fig. 7. Four types of modeling section (flow direction →).

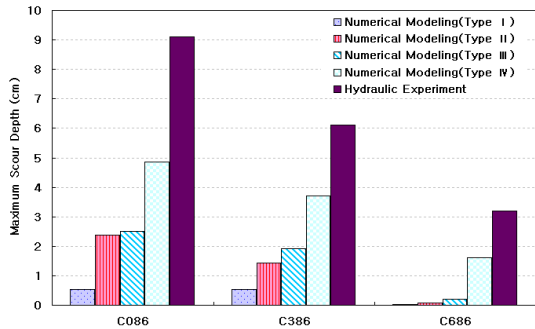


Fig. 8. Numerical and experimental results of the maximum scour depth near the opening gate for sediment release.

5.2. 수치계산 시간간격에 따른 하상변동 분석

하상변동 수치모의시 계산 시간간격에 따라 하상변동 결과는 상당히 큰 차이를 나타내기 때문에 계산 시간간격에 대한 설정은 매우 중요하다. 계산 시간간격의 설정에 대한 매뉴얼이나 기준은 없으며 모델 사용자의 주관적인 경험을 바탕으로 선정하는 문제점이 있기 때문에 하상변동 모의 결과에 대한 신뢰성은 떨어지게 마련이다. 특히 다양한 수리조건에 대한 하상변동 양상을 서로 비교할 경우 각기 다른 계산 시간간격을 사용한다며 결과 값 분석에 문제가 있을 것이다. 본 연구에서는 각 모의조건에서 서로 다른 계산 시간

간격을 설정했을 경우와 모두 같은 계산 시간간격을 설정했을 경우에 대해 수치모의와 수리모형실험 결과를 서로 비교하였다.

각 계산 시간간격의 산출은 모의 조건에서 해가 수렴하는 최소 계산 시간간격으로 선정하였으며 이 계산간격보다 작은 값을 적용하여 모의했을 경우 해가 수렴하지 않는 결과가 나타났다. 또한 모든 모의 조건들이 동일한 계산간격을 갖도록 하기 위해 앞서 선정 한 최소 계산 시간간격 중 가장 큰 계산간격(24.5 sec)을 선택하여 모두 동일하게 설정하였다(Table 5).

계산 시간간격이 최소일 때와 동일할 때 하상변동 모의 결과를 수리모형실험 결과와 비교하여 Fig. 9와 같이 나타내었다. Fig. 9에서 C086과 C046, C386과 C346, C686과 C646을 살펴보면 계산 시간간격이 최소일 경우 다른 조건들은 모두 동일함에도 불구하고 경사가 더 작은 조건에서 더 큰 세굴심이 발생한 것을 볼 수 있다. 즉, 수치모의에서 계산 시간간격이 작을수록 계산 횟수가 더 많아지게 되어 다른 입력 조건이 동일하더라도 경사가 더 작은 조건에서 세굴심이 크게 산정되는 결과가 발생하였다. 반면, 계산간격이 모두 동일한 경우 실제 수리현상과 동일하게 경사가 급할수록 유량이 클수록 세굴심이 더 크게 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 바닥으로부터 배사관 위치의 높이가 높을수록 세굴심이 더 작게 계산되었으며 수

Table 5. Numerical modeling conditions for various time steps

No.	Case	Minimum time step		Constant time step		Simulation time (hr)
		Time step length (sec)	Number of cycle	Time step length (sec)	Number of cycle	
1	C086	18.0	600	24.5	450	3
2	C084	7.2	1500	24.5	450	
3	C046	13.3	800	24.5	450	
4	C044	7.2	1500	24.5	450	
5	C386	24.5	450	24.5	450	
6	C384	7.2	1500	24.5	450	
7	C346	18.0	600	24.5	450	
8	C344	10.8	1000	24.5	450	
9	C686	12.6	850	24.5	450	
10	C684	7.2	1500	24.5	450	
11	C646	18.0	600	24.5	450	
12	C644	10.8	1000	24.5	450	

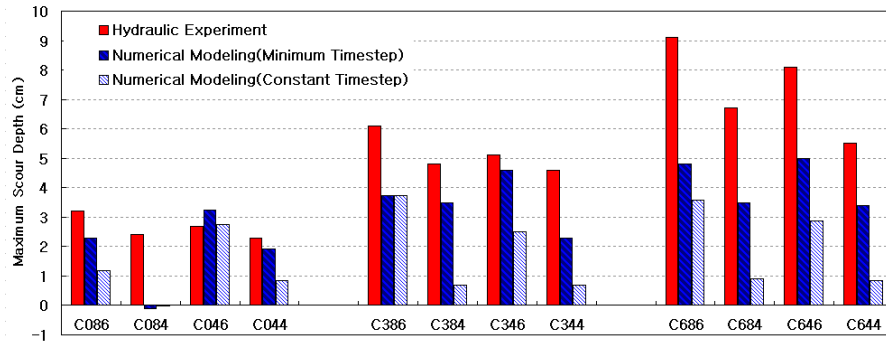


Fig. 9. Maximum scour depths in the experiments and the numerical simulation with different time steps.

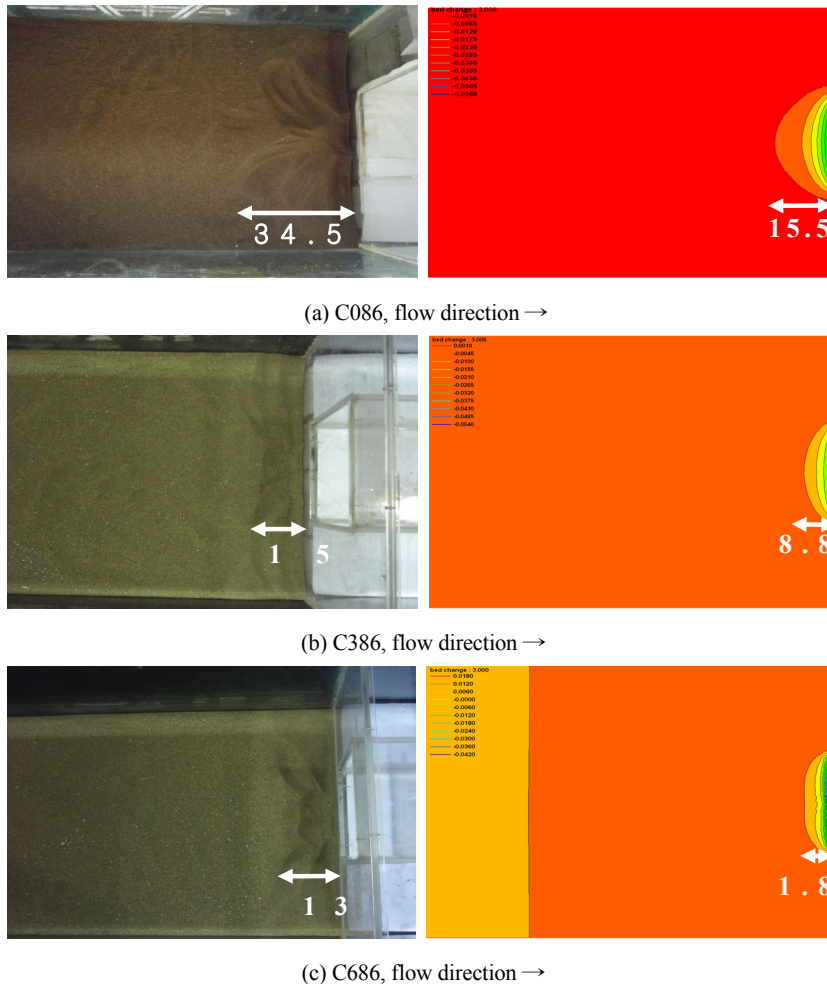


Fig. 10. Experimental and numerical results of scour hole range with fixed time steps (24.5 sec).

리모형실험에서도 비슷한 결과를 나타냈다. 경사의 변화보다는 유량의 변화가 클수록 세굴심에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

또한 수치모의시 계산 시간간격을 모든 조건에서 동일하게 했을 때의 수치모의 결과와 수리모형실험 결과를 평면적으로 비교해 보았으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 수리모형실험 및 수치모의 결과, 세굴범위는 C086일 경우 각각 34.5 cm, 15.5 cm, C386일 경우 각각 15 cm, 8.8 cm, C686일 경우 각각 13 cm, 1.8 cm의 결과가 나타났다. 배사구 높이 3 cm, 6 cm, 9 cm일 경우 배사구 유입부에서의 세굴범위 차이는 수리모형실험이 수치모의에 비해 각각 2.2배, 1.7배, 7.2배 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 배사관 위치의 높이가 높을수록 세굴범위는 더 작아진 것을 볼 수 있으며 수치모의의 세굴형태는 일정한 원 형태로 나온 반면에 수리모형실험의 세굴형태는 대칭적이기는 하지만 수치모의와는 다른 형태를 갖는 것을 확인할 수 있다.

6. 결과 및 고찰

본 연구에서는 RMA2 모형을 이용한 흐름 모의시 와점성계수 값의 변화에 따른 유속과 수심의 민감도 분석을 실시하고 이를 수리모형실험 결과와 비교함으로써 배사구 주변의 흐름 모의 및 하상변동 모의를 위한 검증된 와점성계수를 선정하였다. 또한 검증된 와점성계수를 적용하여 수행된 배사구 유입부에서의 흐름모의 결과를 기초로, 2차원 하상변동 모형인 SED2D를 활용하여 모의구간의 변화와 계산간격 설정에 따른 하상변동 모의를 실시하였으며 이를 수리모형실험 결과와 비교 분석하였다.

RMA2 모형을 이용한 수치 모의시 와점성계수 값의 변화에 따른 유속 및 수심의 민감도 분석을 수행한 결과, 배사구에서 상류 방향으로 50 cm 떨어진 곳의 유속은 수치모의가 수리모형실험보다 약 0.01 m/s 크게 계산되었고 수심은 0.002 m 작게 계산되었으며 전반적으로 수리모형실험과 수치모의 결과가 매우 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 배사구 전면에서는 수치모의가 수리모형실험보다 유속이 0.15 m/s 크게 나왔으며 수심은 0.04 m 작게 계산되어 배사구 유입부에

가까워질수록 수리모형실험과 수치모의 흐름 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구의 수리모형실험수로를 모의하는데 적용하기 위한 최적의 와점성계수는 실험 검정 결과를 이용하여 Table 5와 같이 선정되었다.

사류가 발생하는 배사구 하류 모의구간이 포함되는 정도에 따라 배사구 유입부에서의 하상변동 결과에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 모의구간을 4가지 유형으로 나누어서 수치모의를 수행하였다. 4가지 유형에 대한 분석 결과, 배사관 재현길이가 길어질수록 배사관 내의 Froude 수가 증가하게 되고 이에 따라 SED2D 모형에서 계산수렴을 위한 계산 시간간격이 크게 설정되어야하는 결과를 초래하게 되며 이는 세굴심이 작게 계산되는 결과를 야기시켰다. 이로 인해 배사관을 재현하지 않고 유입부만이 수치모의에 고려된 유형 IV에서는 실제 수리모형실험에서의 세굴심과 가장 유사한 세굴심이 계산되었고 이는 다른 유형들 중 가장 큰 세굴심에 해당되는 값이다. SED2D 모형에서 채택하고 있는 유사이송공식인 Ackers와 White(1973) 공식의 적용한계(Froude 수가 0.8보다 작은 경우) 때문에 배사구 하류부(배사관 또는 배사관 하류 영역)를 수치모의에 포함했을 경우 배사구 유입부에서의 하상변동 결과 값에 많은 차이가 나타났다.

수치계산 시간간격에 따른 배사구 유입부에서의 하상변동 변화를 분석하기 위해 각 조건별 계산간격을 최소로 하여 수치모의를 수행하였다. 모의 결과, 다른 조건이 동일하다 할지라도 계산 시간간격이 다를 경우 경사가 작은 조건에서의 최대 세굴심이 경사가 큰 조건보다 최대 0.96 cm 더 크게 계산되는 결과가 나타났다. 동일한 계산 시간간격을 갖는 수치모의 결과와 수리모형실험에서의 세굴 범위를 비교한 결과, 배사관 위치 높이가 높을수록 세굴범위가 더 작아지는 것을 확인할 수 있었으나 세굴 형태는 수리모형실험과 수치모의에서 상이한 형태로 발생한 것을 확인할 수 있었다.

7. 결론

본 연구의 결론을 수치모의시 와점성계수 값의 변화, 적용모의 구간의 변화, 그리고 계산간격 설정 변화

에 따른 관점에서 간략히 서술하면 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용한 흐름 모의시 와점성계수에 따라 다르게 계산되는 유속 및 수심 값의 민감도 분석을 수행하였으며 실제 수리 모형실험 결과 값과의 검증을 통해 최적의 와점성계수 선정방법을 제시하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 향후 실제하천에서의 수치모의 연구를 수행하는데 있어 측정된 수위값의 비교를 통해 와점성계수를 선정하는데 기준이 될 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 배사구 주변의 모의 구간 설정에 따른 결과를 통해 배사관 재현길이가 길어질수록 배사관내에서의 유속이 상대적으로 빨라져 Froude 수가 커지는 결과가 도출됨으로 하상변동모의 결과 값이 실제현상과 많은 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 배사구 유입부 주변 하상에 대한 수치모의 수행시 배사관 또는 배사관 하류의 구간은 제외하고 배사구 유입부만을 2차원 모의 영역에 포함시켜야 할 것이다.

셋째, 계산간격 설정은 수치모의 상의 계산간격을 모두 동일하게 하는 것이 신뢰성 있는 수치모의 결과를 보여줄 것으로 판단된다. 하지만 동일한 지형에 대해 상호 비교하는 여러 조건의 모의가 아닐 경우는 계산시간을 한 값으로 설정할 필요는 없으며 다른 수치 매개변수들을 보정하여 계산을 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

안정민, 류시완, 이남주, 여홍구, 2007, 수치모형을 이용한 형산강의 장기하상 변동 모의, 2007년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, 1272-1276.

윤광석, 김치영, 2003, 수치모의에 의한 한강 하류부 하상변동원인 분석, 2003년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 1948-1953.

이남주, 황승용, 이삼희, 2006, HEC-6 모형을 이용한 임진강 하상변동 예측에 관한 연구, 2006년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, 1566-1570.

임종철, 2008, 댐이나 보에 설치된 배사구 유입부에서의 흐름 및 하상변동 특성에 관한 수치모의 연구, 석사학위논문, 명지대학교.

지운, 손광익, 김문모, 2009, 홍수조절댐에서의 배사관 설치에 따른 상류 하천의 하상변동에 관한 수치모의 연구, 한국수자원학회 논문집, 42(4), 319-329.

지운, Julien, P. Y., 박상길, 김병달, 2008, 낙동강 하류의 유사특성과 낙동강하구둑 준설효과에 관한 수치모의 연구, 대한토목학회 논문집, 28(4B), 405-411.

한국건설기술연구원, 1989, 하천 유사량 산정방법의 선정기준개발, 기본연구과제보고서, 한국건설기술연구원 89-WR-112.

Ackers, P., White, W. R., 1973, Sediment Transport : New approach and Analysis. Journal of hydraulic Engineering, 99(HY11), 2041-60.

Ariathurai, R., MacArthur, R. C., Krone, R. B., 1977, Mathematical Model of Estuarial Sediment Transport, Technical Report D-77-12, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Environmental Modeling Research Laboratory, 2000, SMS RMA-2 WES version 4.5 User's Manual, Brigham Young University.

Hardy, R. J., Bates, P. D., Anderson, M. G., 2000, Development of a reach scale two dimensional finite element model for floodplain sediment deposition. Pro. Inst, Civ, Eng., Water. Maritime Energ., 132, 141-156.

Julien, P. Y., 2002, River Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, UK.