한국습지학회지 제13권 제1호, 2011년 4월 (79 - 94)

충적하천에서 수제에 의한 안정하도 확보기술에 관한 연구 - 수제에 의한 하안보호 기법 -

박 효 길*+ / 정 성 순** / 김 철 문*** / 안 원 식**** / 지 홍 기*****

The Study on Stability Channel Technology by Using Groyne in Alluvial Stream - Riverside Protection Techniques by Using Groyne -

Hyo Gil Park*+ / Sung Soon Jung** / Chul Moon Kim*** / Won Sik Ahn**** / Hong Kee Jee*****

요약 : 본 연구의 목적은 수제설치로 변화되는 수제역 주변의 흐름을 3D 수치해석으로 분석하여 수제역의 흐름과 유사거동에 관한 환경적 효과(수중생물의 서식처 등)에 대한 기초자료를 제공하는데 있다. 비월류 수제군(non-submerged groynes)의 흐름 특성은 대체로 2차원류(주 수직와류 : mainly horizontal eddies)이고 와류는 수제의 말단에서 발생하여 유로를 따라 이동한다. 이러한 동적 움직임은 큰 격자와 큰 시간차 그리고 난류 모델링의 부적합성 즉 k-ε 모델을 이용한 수제 주변에서의 흐름패턴 모의 등은 그 해석이 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 연구는 WL/Delft Hydraulics의 DELFT3D 소프트웨어 패키지의 한 부분인 DELFT-3D-MOR 프로그램을 이용하여 준 2차원 난류와 3차원 난류로 시뮬레이션을 실시하고 2차원 수심평균 모델을 적용하여 수평대와류 모의(horizontal large eddy simulation, HLES)를 실시하였다. 그 결과 HLES를 이용하여 하상변화를 예측할 경우 실제 관측한 하상과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 HLES를 이용하지 않은 평균 유속 모델을 사용하는 경우에 하상형태는 현실성이 떨어지고 하상형상학적 변화시간이 길어짐을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 시간적으로 변화하는 와류(eddy)의 형상과 관련된 강력한 유속변화를 무시한 결과로 추정되었다.

핵심용어 : 수제, 충적하천, DELFT3D

Abstract : As demonstrated in study for non-submerged groynes, the flow field is predominantly two-dimensional, with mainly horizontal eddies. The eddies shed form the tips of the groynes and migrate in the flow direction. These eddies have horizontal dimensions in the order of tens of meters and time-scales in the order of minutes. In the standard flow simulations, these motions are usually not resolved, due to a too coarse grid, too large time steps and, more importantly, the use of inadequate turbulence modelling. using for example a k-ε model, it is necessary to introduce substantial modifications. Therefore simulation resolved in this study, were carried out using the DELFT-3D-MOR programme, which is part of the DELFT3D software package of WL/Delft Hydraulics and In this study, apply a two-dimensional depth-averaged model, taking an horizontal large eddy simulation(HLES). The bed morphology computed when using HLES, as well as the associated time-scale, is similar to what has been obseved in a field case. When using a mean-flow model with-out HELS, the bed morphology is less realistic and the morphological time-scale is much larger. This slow development is the result of neglecting(or averaging). the strong velocity fluctuations associated with the time-varying eddy formation.

Keywords : Groyne, Alluvial Stream, DELRT3D

+ Corresponding author : rookey1004@nate.com
* 정회원 · 동부엔지니어링 수자원부 · 사원 · E-mail : rookey1004@nate.com
** 정회원 · 영남대학교 대학원 · 석사과정 · E-mail : sungsoon4737@naver.com
*** 정회원 · 국토해양부 4대강살리기추진본부 · 기술지원국장 · E-mail : stghe@korea.go.kr
**** 정회원 · 수원대학교 명예교수 하천공학 연구소 · 소장 · E-mail : ryuhss@hanmail.net
***** 정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 · 교수 · E-mail : hkjee@yu.ac.kr

1. 서 론

수제는 일반적으로 하천에서의 흐름 방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위한 목적으로도 이용되고 있다. 또한 수제는 하천의 경관성 및 접근성을 개선하는 친수구조물로 이용될 뿐만 아니라 주생태계의 수중서식처 및 홍수시 피난처를 제공하는 생태적인 기능도 발휘한다. 이와 같이 수제는 다양한 기능을 지니고 있고 시공성이 뛰어나 특정목적에 따라 다양한 형태의 수제를 적용할 수 있다. 특히, 최근 하천복원 및 자연하천 정비에 대한 관심이 커지면서 수제는 국부적인 흐름제어와 수중서식처 조성을 위한 주요 수공구조물로 제시되고 있다.

수제에 의한 안정하도 확보에 관한 연구로는 중국, 일본 등에서 전통적인 하천관리에 수제를 적용해왔으며, 유럽의 경우는 하도에서 주운기능 즉, 수심확보를 위해서 수제기법을 도입해 왔다. 일찍이 우리나라 같은 주운기능이 크게 요구되지 않았던 시절에는 수제공법이 점차 사라지게 되었으나, 수제는 충적하천 즉, 퇴적하천에서 만곡하도의 하도 안정화(수충부의 침식억제)를 위해서 매우 유용하게 사용될 수 있는 하천 안정화 공법의 하나이다. 따라서 수제 관련 연구내용들을 국내외로 구분하여 보면, 목적은 다소 다를 수 있느나 대체로 주운기능 회복과 하도 안정화에 주안점을 두고 연구되어 왔음을 알 수 있다.

먼저, 수제의 재순환 영역에 대한 연구동향을 살펴보면 최초의 연구는 Francis 등(1968)의 수제 하류부 재순환 영역에 대한 실험적 연구를 들 수 있으나 유속의 측정은 이루어지지 않았다. 흐름영역(flow field)의 정밀한 유속측정은 Rajaratnam 과 Nwachukwu(1983)이 두 가지의 다른 수제에서 실험을 수행하였으며, 그들은 흐름역역을 수제주변에서 3차원으로 구분하여 측정했다. Tingsanchali와 Maheswaran(1990)은 수제 하류부 재순환 영역에 대한 수치해석을 수행하여 수제 주변의 국부적인 흐름장의 주요특징을 제시하였으나 불투과 수제에 대해서만 적용되었으며, 하류부 흐름분리 영역과 흐름 중심선에 대한 수제의 영향에 대해서는 구체적으로 다루어지지 않았다. 최근의 연구는 Ettema와 Muste(2004)에 의해 수행되었는데, 이는 길이 변화에 따른 불투과 수제의 하류 재순환 영역과 흐름중심선에 대한 축척 영향(Scale Effect)만을 분석하였으며, 투과수제에 대해서는 다루지 않았다.

다음으로, 국외의 수제 설치간격에 대한 연구동향을 살펴보면 Copeland(1983)은 만곡부에서 호안 보호공으로서 불투과 횡수제의 효과를 평가하고 검증하고자 횡수제의 설계와 관련된 매개변수의 간격-길이 비, 설치각도 등의 조건에 따른 하상 및 제방의 세굴양상을 살펴보았다. Petersen (1986)은 직하류 수제의 위치에 따른 함수로 규정하고 대체로 수제 길이의 1.5배에서 6배, 주운과 홍수조절을 위해서는 1.5배에서 2배가 가장 적절하다고 주장한 바 있다. Acheson(1968)은 만곡수로 곡률의 각도에 대해 L/l=2~4의 간격을 제안하였으나 수제 간격과 수제 투과율과 그리고 곡선부 만곡 정도 사이의 관계에 대해 명확한 표준을 제공하지는 못하고 있다. Fenwick(1969)은 수제간격을 설치목적에 의해 구분하였는데 흐름제어 목적으로는 L/l=2~2.5 와 L/l=3~6의 값을 제안하였고 직선 또는 큰 반경을 가지는 곡선수로에서는 4~6, 작은 반경을 갖는 곡선수로에서는 3~4의 값을 제안하였으며, Jansen 등(1979)은 수리실험결과를 기초로 설치간격을 에너지방정식의 형태로 표현하여 제시했다. Copeland(1983)는 하안 보호목적에 대해 간격을 제안했는데 수제의 침식되는 길이를 이용하여 L/l=3 이상으로 제시했다. FHWA(1985)는 제방보호 목적에서 수제의 간격은 수제길이, 각도 그리고 투과율 뿐만 아니라 만곡수로의 곡률반경 등의 영향을 고려할 것을 제안하고 있는데 일반적으로 수제 간격은 수제설치 목적에 따라 L/l=1~6의 범위를 제안하고 있다.

마지막으로, 수제 형상에 대한 연구동향을 살펴보면 Teraguchi(2007) 등은 2개의 불투과 및

투과 수제에 대한 하상변동을 수리모형실험 및 수치모형을 통해 비교하였으며, Mccoy(2007) 등은 2개의 불투과 수제에 대한 월류와 비월류 상태의 수치해석을 통해 흐름분포를 파악하였다. 몇 개 예를 들면 대다수의 수제에 대한 연구는 직선형태의 I형 수제에 대한 연구만이 진행되고 있을 뿐이고 변형수제에 대한 연구는 미미한 실정이다. 변형수제에 대한 연구로는 Hook 수제의 설치각과 투과율에에 대해서, Mohsen(2008)은 I, T, L형 수제에 대한 이동상 실험을 수행하였으나 흐름특성보다는 세굴량에 따른 효율성에 대해서만 언급하였다.

국내의 경우 여홍구 등은 먼저 다양한 수제조건에 따른 수제주변 흐름특성에 대한 실험연구와 분석을 하였고 연구동향을 살펴보면 경사수제 주변 흐름특성 분석에 관한 실험연구(2009)에서 경사수제 실험의 주요 인자인 수제의 선단부 각도와 수심변화에 따른 유속변화를 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 측정하였다. 실험결과 흐름중심선 변화는 환산길이에 영향이 크지 않았으나 재순환영역 폭은 환산길이가 클수록 증가했다. L형 수제주변 흐름특성 변화에 대한 실험연구(2008)에서는 5가지 L형 수제를 팔길이 조건에 대하여 유속을 변화시키면서 수리실험을 실시한 결과 수제 팔길이의 영향은 적었으며 유속은 증가했고 수로폭이 변화하는 것으로 나타났다. 열쇠형 수제의 흐름특성에 관한 실험연구(2007)에서는 6 종류의 유속조건과 2 종류의 팔길이를 가지는 열쇠형 수제설치로 인해 발생하는 수제 주변의 흐름특성에 대해 실험하였고 그 결과 재순환영역의 크기나 형상은 유속조건에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 수리 및 3차원 수치모형을 이용한 경사형 수제주변 흐름해석에서는 경사수제에 대해 수리모형과 수치모형실험을 수행하여 수제주변의 흐름특성에 대해 분석하였고 연구결과 수리모형실험은 수치모의 결과와 일치하였으며 경사수제의 수제주변 흐름은 수심비에 따라 다르게 모의되는 것으로 나타났다. 수심변화에 따른 경사수제 주변 흐름특성의 변화(2006)에서는 수위변화에 따라 흐름특성이 달라지는 경사수제의 적절한 설계를 위해 수리실험을 실시하였고 실험결과 제방부근 수제역의 역류속이 평균유속의 최대 0.3 배인 것으로 나타났으며, d/h_g=1에 가까울수록 역류발생이 미미한 것으로 나타났다. 수제 설치간격에 따른 수제주변 흐름특성에 관한 실험 연구(2006)에서는 군수제의 적절한 수제간격 결정을 위한 기초자료 제공을 목적으로 수제설치로 인해 변화되는 수로와 수제역 흐름을 수리실험을 통해 분석하였고 실험결과 수제간격이 수제길이의 세 배 이상에서는 두 개의 소용돌이 흐름이 발생했으며, 열 배 이상에서는 세 개의 소용돌이 흐름이 발생하는 것으로 나타났으며, 하안침식의 원인인 역류속은 네 배 이상에서 접근유속의 20% 이상 감소되는 것으로 나타났다. 수제길이와 투과율에 따른 수로흐름에 대한 실험적 연구(2005)에서는 단일 돌출수제의 길이 및 투과율 변화에 따른 수제 주변의 흐름장을 LSPIV를 이용하여 측정하였고 실험결과 흐름중앙선과 흐름분리영역의 폭은 Fr 수에 따라 큰 변화를 보이지 않으나 수제의 길이 및 투과율에 따라 변화하는 것으로 나타났으며, 이러한 변화 경향은 흐름중앙선과 흐름분리영역이 유사한 것으로 나타났다.

그리고 수제주변의 세굴에 대한 실험연구를 했고 연구동향을 살펴보면 투과율과 설치각도에 대한 수제주변 세굴영역에 관한 실험 연구(2006)에서 투과율과 설치각도를 변화한 실험을 통해 수제주변 세굴규모를 측정하였고 각 실험조건에 따라 최대세굴 발생시의 세굴영역과 세굴심을 분석할 수 있었다.

지홍기 등은 충적하천에서 수제에 의한 운하수로의 안정화기법(2008)에서 2차원 수리모델인 RMA-2를 이용한 수리학적 해석을 실시하여 하도중심부로의 유심 유도와 수심 확보를 위한 유속을 비교분석했다. 충적하천의 수충부에서 수제에 의한 저수로 유도기법(2009)에서는 RMA-2 프로그램을 적용하여 고찰한 결과 만곡부의 외측(수충부)은 유속이 현저히 감소하는 것으로 나타났으며 수위는 수충부측이 상승하는 것으로 나타났다. 수

제설치 간격에 따른 흐름특성(2009)에서는 수제 설치간격에 따라 수제 사이의 회류현상이 변화되고 유속 및 수위 변화에 따라 흐름현상도 변한다는 사실을 연구한 바 있다.

최근 들어 자연형 하천과 하천생태계 복원에 대한 관심이 점증되면서 수리학적 기능 외에 다양한 생태환경을 제공하고 하안 부근의 경관을 개선하는 기능을 하는 수제에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 현재 국내에는 수제설치에 대한 설계지침이 충분치 않을 뿐 만 아니라 국내 수행된 연구 자료가 매우 부족한 실정이다. 특히, 수제의 주요 영향인자가 하천의 형태, 수문현상, 수리특성 등의 국지적인 원인이 지배적이므로 모든 영향을 고려한 해석은 매우 힘든 실정이다. 이에 본 연구에서는 수제 설계인자 해석을 위한 수치모의를 수행 토록하였다.

2. 하상의 유사거동해석 기본이론

본 논문에서는 WL/Delft Hydraulics의 DELFT 3D 소프트웨어 패키지의 한 부분인 DELFT-3D-MOR 프로그램을 이용한 시뮬레이션에 대해 연구한다. 이 프로그램은 주 모듈(Main module : MORSYS), 파 모듈(Waves module : DELFT3D-WAVE), 흐름 모듈(Flow module : DELFT3D-FLOW), 이송 모듈(Transport module : DELFT3D-TRAN), 하상 모듈(Bottom module : DELFT3D-BOTT)로 구성되었다.

다음은 흐름/유사이송/하상고 업데이트 모듈의 기본 방정식에 대해 간략히 정리하였으며,. 추가적인 정보는 Struiksma(1985), Stuiksma et al. (1985), Roelvink and van Banning(1994), Jagers (2003), Lesser et al.(2004) and WL/Delft Hydraulics(2001a)과 같다.

2.1 수평대와류모의 모형을 적용한 흐름이론

흐름모델은 수심적분 천수방정식에 기초하고 곡면격자 해법을 사용한다(Stelling, 1984). 이러한 접근은, 수직모멘트방정식이 정수압관계(수직가속도는 중력가속도와 계산되지 않는 것을 비교하여 작은 것을 추측함.)에 의해 감소된다는 것이다. 시스템방정식은 수심적분 모멘트방정식과 연속방정식으로 구성된다. x와 y방향의 모멘트방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-fv=-\frac{\tau_{b,x}}{\rho h}+\sum\frac{F_x}{\rho h} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+g\frac{\partial \zeta}{\partial y}+fv=-\frac{\tau_{b,x}}{\rho h}+\sum\frac{F_y}{\rho h} \quad (2)$$

수심적분 연속방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial hu}{\partial x}+\frac{\partial hv}{\partial y}=0 \quad (3)$$

하상전단응력성분은 Chezy 조도계수(C)를 이용하여 아래와 같이 모델링된다.

일반적인 모델링 방법에서는 수평와점성을 상수로 둔다. 하지만, 이런 균일한 와점성은 대 수평와류를 정확하게 모사하지 못한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 부격자(sub-grid) 난류운동의 영향이 종속변수로 모델링 되어야 한다. DELFT3D-FLOW버전에서는 최근에 개발된 수평와점성을 적용한 Smgorinsky-type sub-grid scale(SGS) 모델이 적용된다.

$$\tau_{b,x}=\frac{\rho g u\sqrt{u^2+v^2}}{C^2} \quad \tau_{b,y}=\frac{\rho g v\sqrt{u^2+v^2}}{C^2} \quad (4)$$

$$F_x=\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+F_{x,external} \quad F_y=\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+F_{y,external} \quad (5)$$

$$\tau_{xx}=2v_H\frac{\partial u}{\partial x},\ \tau_{xy}=2v_H\frac{\partial v}{\partial y},\ \text{and}\ \tau_{xy}=v_H\frac{\partial u}{\partial y}+v_H\frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

하상마찰에 의한 감쇠가 포함된 SGS 모델은 하상마찰에 의한 직접 에너지손실의 형태로 시·공간적으로 변화하는 수평와점성을 만든다. 공간필터링 보다는 단순시간반복 High-Pass Filter가 유속장의 해법으로 적용되었다. 이 필터는 SGS 모델 내에서 일정하게 변하거나 느리게 변화하는 큰 규모의 변형률 수축을 제거한다.

HLES의 장점은 수평운동이 정확하고 천수흐름에서 모멘텀 방정식으로 잘 성립된다는 점이다. 적용된 SGS 모델은 아래와 같다.

$$v_H = \frac{1}{k_s^2}\left(\sqrt{(\gamma\sigma_T S^*)^2 + B^2} - B\right) \tag{7}$$

$$k_t = \frac{\pi f_{lp}}{\sqrt{\triangle x \triangle y}}; \quad f_{lp} \le 1 \tag{8}$$

$$\gamma = \frac{1}{2} I_\infty \sqrt{1-\alpha^{-2}} \text{ and } I_\infty = 0.844 \tag{9}$$

$$B = \frac{3}{4}\frac{g|\overline{U}|}{hC^2} \tag{10}$$

$$(S^*)^2 = 2\left(\frac{\partial u^*}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v^*}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u^*}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial v^*}{\partial x}\right) + 2\frac{\partial u^*}{\partial y}\frac{\partial v^*}{\partial x} \tag{11}$$

전단파수 k_s와 난류의 길이축척이 어디까지인지에 대한 결정은 SGS 모델로 모델링된다. 변동흐름은 사용자 지정 완화시간(τ)을 이용하는 Recursive High-Pass Filter 운영자에 의해 정의된다. 대와류의 시간축척에 의존하는 τ의 선택은 변동과 기저유출사이를 구분짓는 것으로 정이된다.

DELFT3D-FLOW를 적용한 정확한 HLES의 결과를 산정하기 위해서는 다음 시간변화($\triangle t$)의 제약이 따른다(Uittenboggaard, 1998):

- 표면파(barotropic mode)에 대한 Courant 수 σ_{BT} 는 $4\sqrt{2}$ 보다 작아야 한다.

$$\sigma_{BT} = 2\sqrt{2}\frac{\triangle t}{\triangle l}\sqrt{gH} < 4\sqrt{2}$$

- 대류(convection)에 대한 Courant 수 σ_I는 1 보다 작아야 한다.

$$\sigma_I = U\frac{\triangle t}{\triangle l} < 1$$

- SGS 응력에 대한 명시적 적분법

$\sigma_b = v_{SGS}\frac{\triangle t}{(\triangle l)^2} \le \frac{1}{2}$, 단, $\triangle l$은 흐름 방향내 그리드 크기

2.2 하도내 유사의 이송해석 기본이론

흐름장을 해결하고 나면 유사이송장은 소류사와 부유사에 대해 각각 표현한 Van Rijn 공식 이용으로 계산된다. 부유사이송 표현은 국부 평형농도를 얻기 위해 주로 사용된다.

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial uhc}{\partial x} + \frac{\partial vhc}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_s h\frac{\partial c}{\partial y}\right) = \frac{h(c_c - c)}{T_a} \tag{12}$$

농도 c에서, x와 y 방향의 유사이송률는 아래와 같이 정의된다.

$$Qs_{s,x} = huc - h\varepsilon_s\frac{\partial c}{\partial x} \tag{13a}$$

$$Qs_{s,y} = hvc - h\varepsilon_s\frac{\partial c}{\partial y} \tag{13b}$$

부유사의 유입(E)과 감수(D)의 항(-E+D)은 수심평균 농도에 의해 계산된다.

$$(-E+D) = \frac{\partial Qs_{s,x}}{\partial x} + \frac{\partial Qs_{s,y}}{\partial y} - \frac{\partial hc}{\partial t} \tag{14}$$

결론적으로 하상고 변화는 유사이송장의 변화율에 기반하고 아래와 같다.

$$(1-p)\frac{\partial z_a}{\partial t} + \frac{\partial Qs_{b,x}}{\partial x} + \frac{\partial Qs_{b,y}}{\partial y} = (-E+D) \tag{15}$$

2.3 하상 업데이트 절차

DELFT3D-MOR 에서의 하상시뮬레이션은 흐름, 이송, 하상변화의 통합적인 시뮬레이션을 포함한다. 하천형상을 모델링하는 방법은 일반적으로 아래 Fig. 1(a)와 같이 흐름장이 정상류로 계산되는 구조를 가지고 있다. 유사이송영역은 하상자료의 업데이트에 의한 침식과 감수율로 계산된다.

하상 업데이트 이후 흐름장은 재산정 되야 한다. 그럼에도 불구하고, 하상변화가 크지않기 때문에 흐름패턴은 크게 변하지 않는다. 이 경우 하상변화가 작은 수송영역을 조정하기위해 자주 적용되는 방법은 유속과 수심이 일정한 연속보정기법(continuity conection)이다. 그러나 흐름의 특성에 큰 변화을 주면 주어진 기간이상의 평균유속이나 가장 최근의 유속장 사진(snapshot)은 순간속도로부터 계산된 유사이송 값과 차이를 보인다. 평균속도장의 적용은 큰 규모의 속도변화를 감소시킨다.

사진(snapshot) 유속장의 적용은 일방향 유사이송의 과대평가를 야기하고 다른 것들에 대해 과소평가를 야기 할 수 있다. 게다가 대와류를 계산할 때, 혼합층에서의 흐름장은 절대 정상류에 근접할 수 없다. 따라서, Fig. 1(a)에서 보여주고 있는 구조는 적용할 수 없고 대신 주기적인 여향을 받는 하상에서 사용하는 Fig. 2(b)와 같은 유사구조를 사용한다.

이 방법에서, 시변적 유사수송은 대표 지속시간(T_p)에 의해 평준화시키게된다. 조석의 경우 대표기간의 선정은 단순한 조석기간에 있다. 대규모의 와도에 의한 흐름변동에서의 T_p 선정은 정확하지 않고, 하상변화 단계를 완전히 실행하기 전에 유속장에서 T_p를 평가하기 위한 유속장의 후처리가 요구된다. T_p를 결정하기 위한 방법은 5.2절에서 설명하겠다.

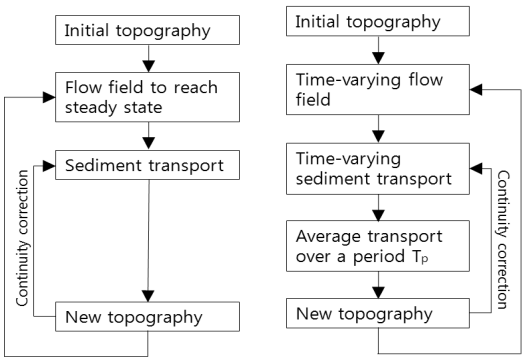


Figure. 1. Structure of DelftSD-Mor; (a) conventional morphological procedures, (b) eddy resolving procedures

3. 모델 구축(Model Setup)

모델링은 양쪽에 수제가 있는 직선하도를 도식적으로 구현하였다(Fig. 2 및 Fig. 3). 하천 크기는 낙동강을 채택했다. 모델링된 하도의 하상경사는 1.1×10^{-4}이고 1.5km의 길이로 구현되었다. 수제의 길이(L)와 면적(S)은 50m와 200m^{2}이다. 하도의 폭은 200m, 하도와 수제간 하상고 차이는 2.0m이다. 그리고 수제 내부의 하천변 경사는 1:15이고, 하도의 단면도는 Fig. 4와 같다. 유사크기는 전체 영역에서 320um로 결정되었다. 균일한 격자크기(uniform grid size)는 모델 전지역에 대해 5m를 사용했다.

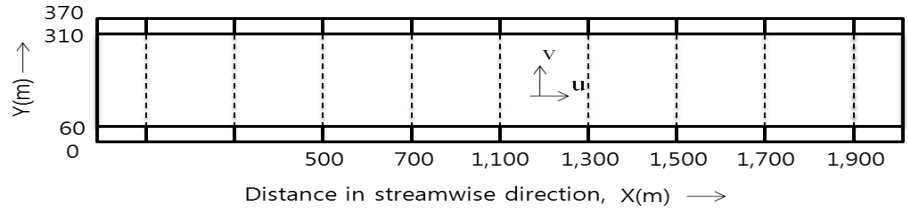


Figure. 2. Model layout

상류 경계조건에서, 일정 방류량은 1,450m^3/s로 정의되고, 하류 경계조건은 하도의 하상에서 7.0m의 일정한 수위를 갖도록 정의했다. 전체 영역에 대해 조도계수는 0.035로 정하였다. 하상마찰의 지배적인 영향에도 불구하고, 벽면 경계조건은 수제영역내에서 재순환 패턴구조에 중요한 영향을 주고 있다. DELF3D-FLOW에서는 3가지 기능이 있다. : 자유경사, 경사없음, 부분경사 조건이 그것이다. 벽면 경계조건은 조도높이가 0.1인 부분 경사를 적용했다.

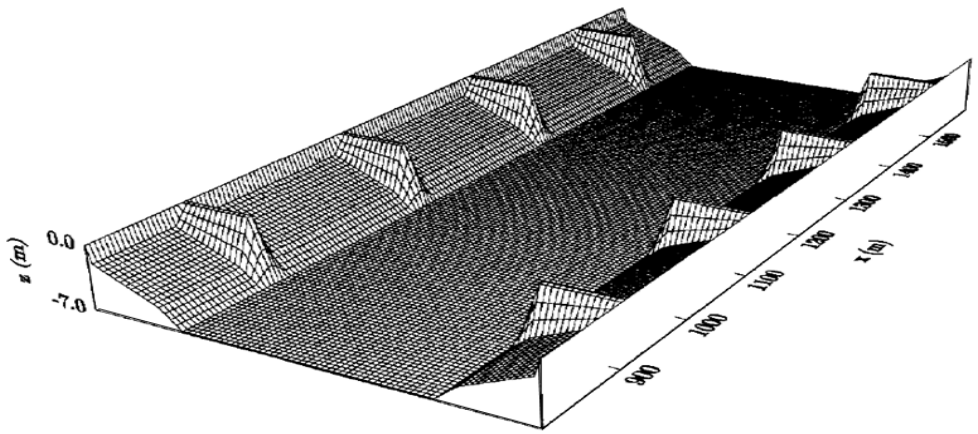


Figure. 3. Overview of the model grid

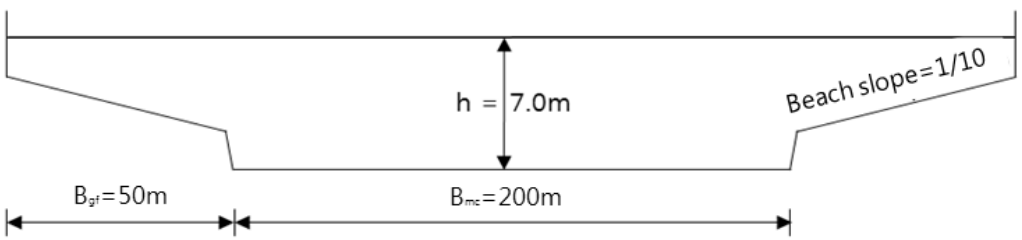


Figure. 4. Channel cross-section through a groyne-field

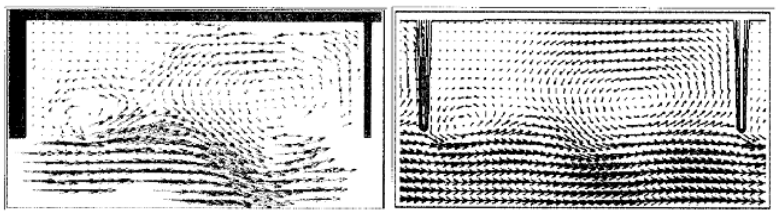
수제는 수심 점에서 모델링 된다. 침식이 안되거나 침식을 고려하지 않는 경우, 침식으로부터 수제을 유지하기 위해 '비침식성' 레이어 옵션을 적용하였다. '비침식성' 레이어의 적용으로 이 레이어에 걸친 유사이동의 규모를 줄일 수 있다. 전체 시뮬레이션에서, 수제와 측면경사는 '비침식성' 레이어 조건으로 만들어졌다. 정확성과 안정성을 위해 흐름 모듈의 계산 시간 간격은 3초로 하였다. 다만 서로 다른 모듈간의 결과는 매 30초마다 커뮤니케이션 파일을 보낸다. 따라서 유사이송장은 30초의 시간단위로 계산된다. 하상학적 변화는 Courant-Friedrichs-Lewy 안정상태를 만족하는 자동 단계 과정에 따라 자동으로 계산된다.

4. 계산 결과의 비교분석

4.1 흐름 패턴

Fig. 5에서는 계산된 순간흐름패턴과 S/L 비의 측정된 패턴의 유사성을 보여주고 있다. 아래 그림에 흐름영역의 역학적 특성에서, 흐름 패턴은 주기적으로 거동하는 사실을 확인할 수 있다. 이

러한 주기성의 가장 중요한 징후는 하천과 수제장(법선)의 경계선에서 찾아볼 수 있다. 유속 결과는 흐름 계산 결과에서 추론되고, 평균값은 변동부분(fluctuating part)을 구분하여 뺀다.



(a) experimental result (after Uijttewaal, 1999) (b) model results

Figure. 5. Flow field in a groyne-field, snapshot picture;

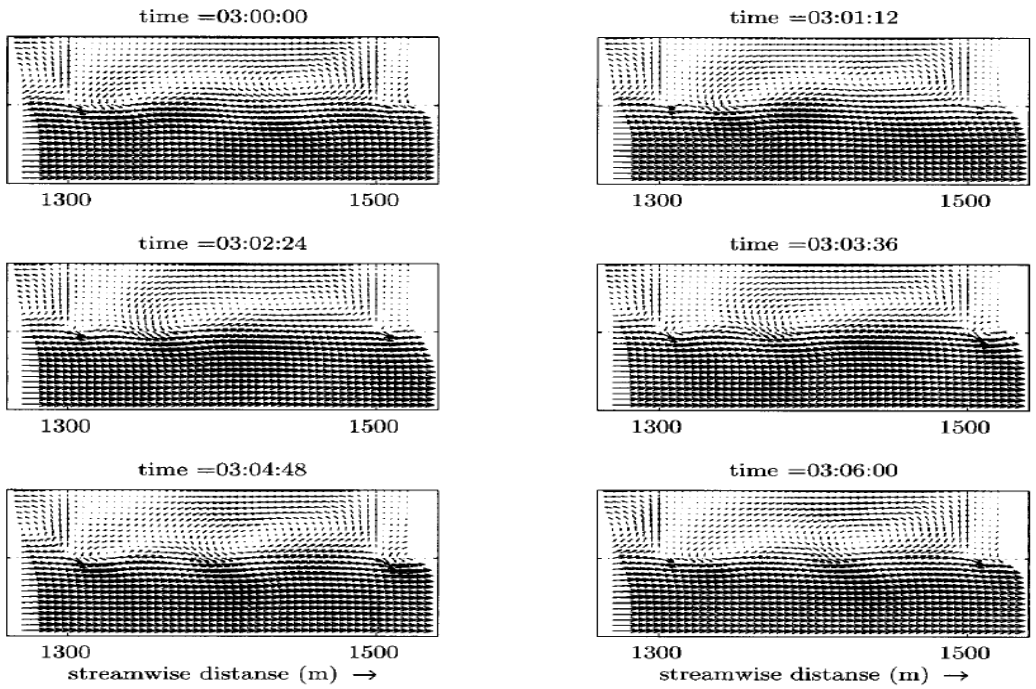


Figure. 6. Computed time varying flow field in a groyne field (over a period of 6 minutes)

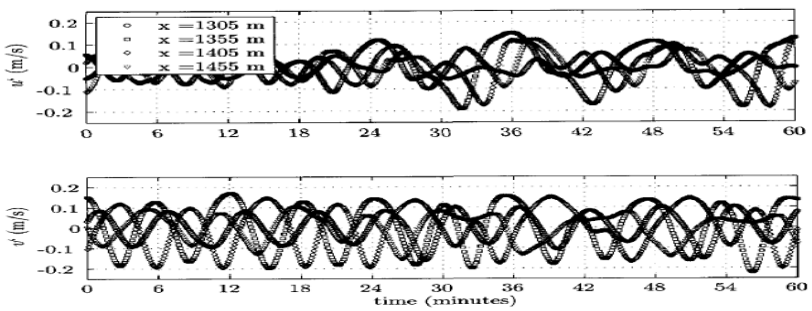


Figure. 7. Velocity fluctuations for some points along the normal line, μ-component (upper panel) and ν-component (lower panel).

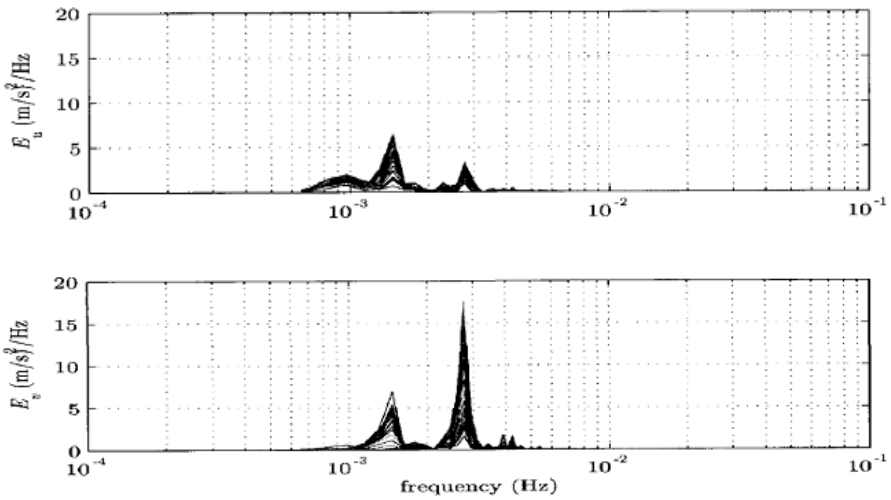


Figure. 8.: Energy density spectra for velocity fluctuations, μ-component (upper panel) and ν-component (lower panel).

법선 상의 임의 점에 대한 유속변화는 Fig. 7에 나타냈다. 유속 신호(velocity signal)는 주기성을 가지고 있으며, 이제 수량화하는 절차만 남았다. 유속 요소 u와 v의 장기 시간 적용으로 에너지 밀도 스펙트럼(energy density spectrum)을 얻을 수 있다. 에너지 밀도 스펙트럼은 서로 다른 빈도의 난류 에너지(turbulent energy) 분포를 보여준다. 각 관측 점에서 에너지 밀도 스펙트럼 E를 계산할 수 있고 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다.

유속의 v요소 에너지 스펙트라는 진동수 2.78x10^{-3}Hz(wave period $t_{p1} \cong 6\ \mathrm{min}utes$)에서 최고값을 나타내고, 그 다음 첨두값(minor peak)은 더 낮은 에너지의 진동수1.46x10^{-3}Hz(wave period $t_{p1} \cong 11.4\ \mathrm{min}utes$)에서 나타났다. u 요소에서는 낮은 진동수의 첨두값(slow fluctuations)에서 약간 높은 에너지가 발생하고, u 요소의 두 첨두값은 v 요소 에너지 스펙트라와 같은 진동수에서 나타났다. 이는 평균유속 보다 진동수의 변화가 높아 평균유속이 상쇄되었기 때문이다. 같은 이유로, u 요소의 에너지 첨두값의 전체 에너지 상수는 v 요소의 첨두값보다 작다. 스펙트럼 양 측면에서는 고 진동수(high - frequency) 에너지가 존재하지 않는 것으로 나타났다.

4.2 유사이송 계산시간(T_p)의 선정

정확한 유사이동 모델링은 신중한 시간 선택을 요구한다. 평균 시간 T_p의 선정은 스펙트럼 해석(spectral analysis)으로부터 추론된 파주기(wave period)에 따라 결정한다. 즉, T_p는 최소 1개의 파주기(wave period(tp))를 포함하고 있다. t_{p1}에서의 첨두값은 대부분의 난류에너지가 포함되어 있고, t_{p1}의 다기관(manifold)은 T_p를 선정하는 기초로 사용되고 있으나 t_{p2}에서의 두 번째 파주기의 존재로 인해 T_p는 최소한 한 사이클(t_{p2})을 포함할 수 있도록 연장되어야 한다. 그러나 T_p의 증가는 전체 계산 시간의 상당한 증가를 야기하여 흐름모듈 또한 장기기간에 의해 해석되야 한다.

수송 평균 기간(transport-averaging-period)은 Engelund와 Hansen의 공식을 이용하여 산정한다. 시간 평균수송률(Time averaged transport rates) Qsx와 Qsy는 서로 다른 T_p값을 이용하여 계산된다. 그림. 9는 서로 다른 T_p값에 의한 이동률을 비교한 결과와 60분의 장기간을 참고로 사용한 결과이다. 이 그림은 3초와 3분의 매우 짧은 시간으로, 두 결과에서 기간시간과는 확연히 다른

이동패턴을 확인할 수 있다. T_p를 증가시킬 경우, T_p=6분일 때, 여전히 편차를 확인할 수 있는 반면, T_p=12분일 때, 그 편차는 줄어들고, 사실상 T_p=24분이 되면 편차가 사라지는 것을 확인할 수 있다. 에너지 밀도 스펙트라에서 생각했을 때, 주 파장기간(dominant wave period)의 다기관(manifold) 값을 사용할 경우, 장기평균기간(long averaging period)의 결과와 비교해 편차가 커짐을 확인할 수 있었다. 이에 따라, 이동평균기간은 T_p=24분이 적절한 것으로 나타났다.

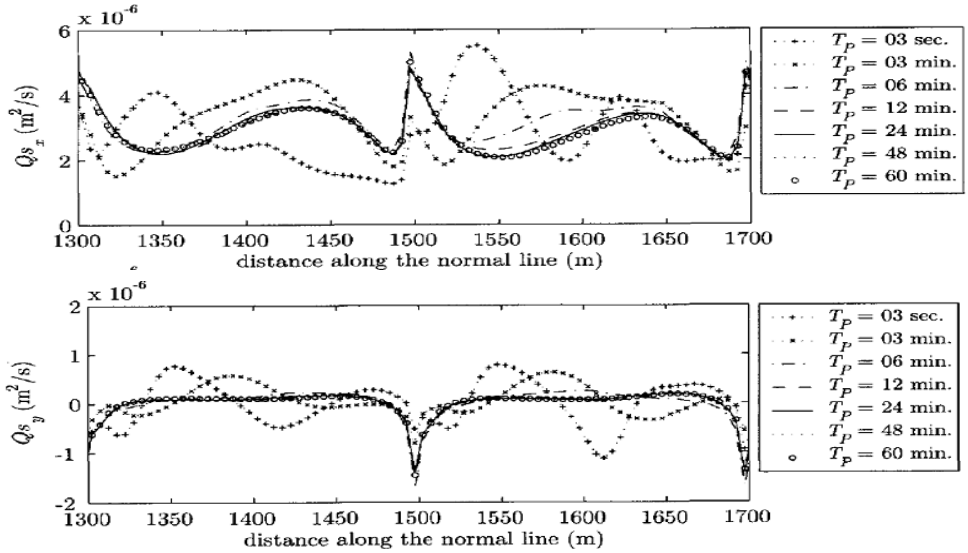


Figure. 9. Comparison between sediment transport rate along the normal line using different values of T_p as averaging period. Streamwise component S_x (upper panel) and transverse component S_y (lower panel) + ve S_y is towards the groyne fields.

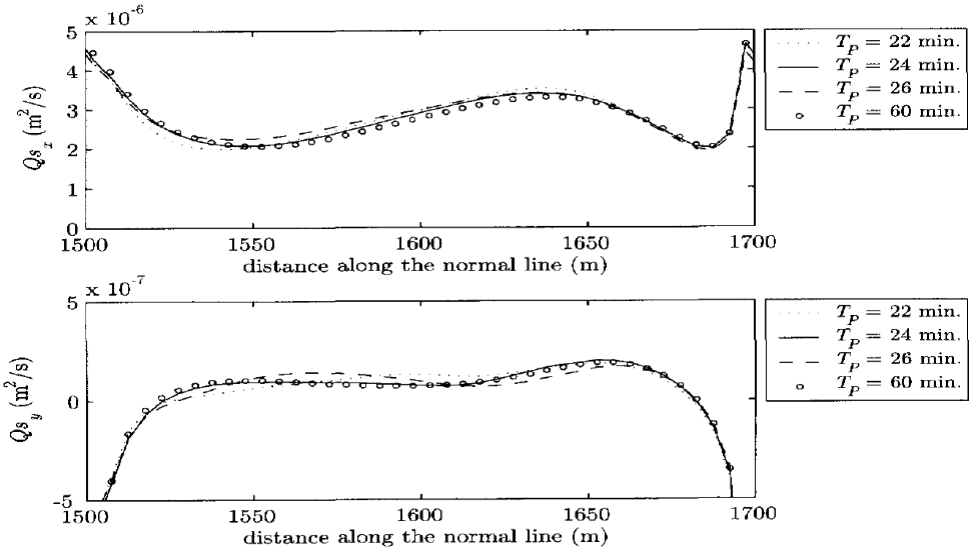


Figure. 10. Comparison between sediment transport rate along the normal line using a multiple of t_p (T_p = 4×t_{p1}), and T_p = 4×t_{p1} ± 2 minutes.

4.3 하상의 변화

1) HLES 적용시

앞 장에서 언급했던 바와 같이 이송평균기간은 24분으로 결정되었다. 이제 Fig. 1(a)에서 본 하상학적 절차를 적용할 수 있게 되었다. 2개월이 지난 하상은 Fig. 11에서 보는바와 같이 적종천 지역(subsequent area)의 퇴적물을 따라 모든 수제의 끝에 세굴공(oblique scour hole)이 비스듬하게 진행되었다. 이러한 퇴적지역을 수제 불꽃(groynes flame) 이라고 부른다. 또한 각 수제 주변에서 하상학적 패턴에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 해석된 와류가 어느정도 무작위성을 가지고 있다는 사실 때문이다. 동적와류가 존재하기때문에 일부 수제 불꽃은 두 개의 정점을 가지지만 시간이 지날수록 점진적으로 한 개의 정점이 된다.

수제 불꽃의 형상과 차원은 Fig. 12에서 1개월과 2개월이 지난 후의 하상의 변화를 설명하고 있다. Fig. 12의 상위 하상은 1개월이 지나면 기본적인 불꽃형상이 나타나게 된다. 퇴적물은 45일 동안 지속적으로 쌓이게 된다.(Fig. 14) 이 기간 이후에 형상은 지속적으로 변하지만, 최고 퇴적고(maximum deposition height)의 증가는 더 이상 나타나지 않았다.

최대퇴적고는 법선에서 10m 정도의 거리에서 발생하고, 주하도의 초기 하상고보다 1.5m이상 쌓이게 된다. 초기 하도 하상고에서 퇴적물 높이가 0.5m 이상이 되는 지역은 법선에서 20~50m 정도까지 확장된다.

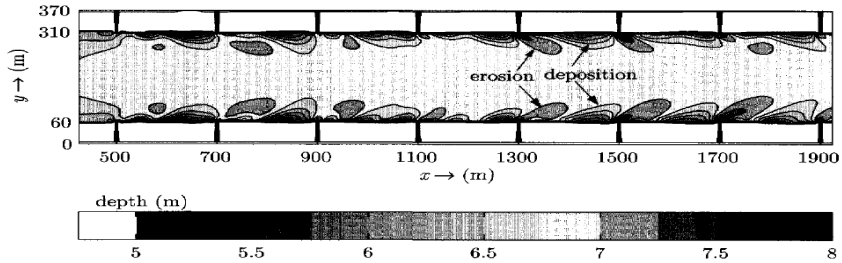


Figure. 11. Bed topography after two months; (bed level is measured from water surface; flow from left to right).

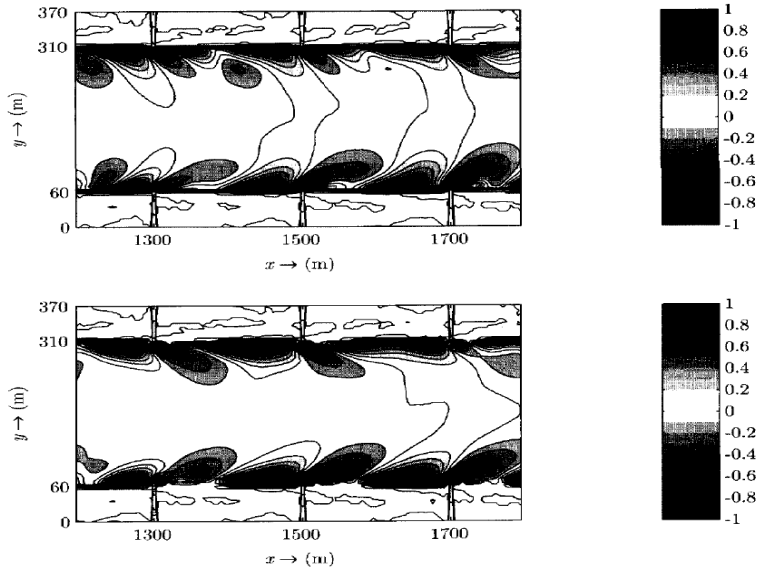
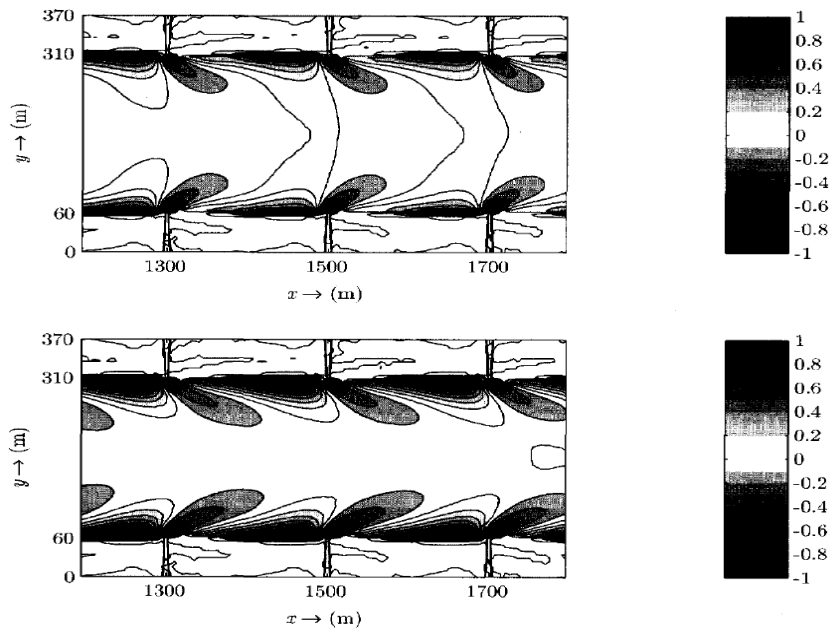


Figure. 12. Erosion deposition pattern after one month (upper panel) and after two months (lower panel); (computation with HLES).

2) HLES 미적용시

HLES 적용시와 비교하여 HLES 미적용시에도 동일한 와점성($0.1m^2/s$)을 적용했다. 그러나 HELS를 적용하지 않았을 경우에는 대와류(large eddies)가 해석되지 않았다. 따라서 흐름패턴도 HLES 적용시와 비교하여 다른결과를 나타냈고, T_p도 하상변화에 아무런 영향을 주지 않았다.

Fig. 13과 같이 수제불꽃은 동일해보이고 하도의 양쪽은 대칭적으로 나타났다. 그리고 3개월 후 높이 0.5m의 퇴적물 쌓인 지역은 법선에서 20m까지 국한되었다. 또한 Fig. 14에서 보는 바와 같이 하상 변화시간도 HLES를 적용했을때 보다 길어지게 된다는 것을 확인할 수 있었다.



Fugure. 13. Erosion deposition pattern after: one mouth (upper panel), three months (lower panel); (computation without HLES).

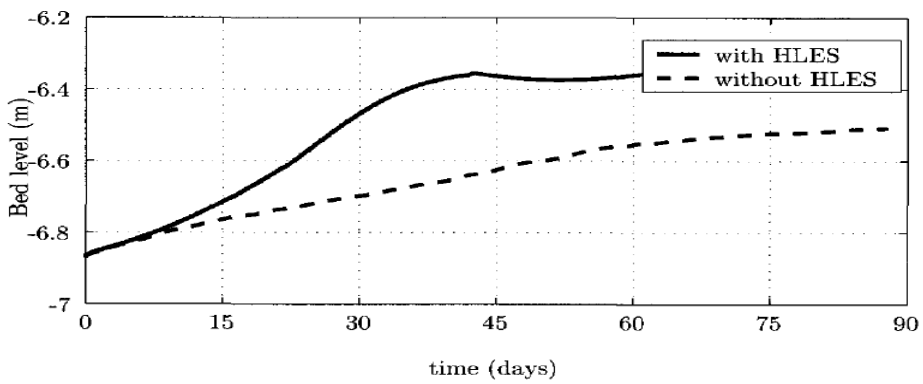


Figure. 14. Comparison between bed level development with and without HLES, at the point with coordinates(1665,90)

5. 해석결과의 고찰

이 연구에서 언급하는 시뮬레이션 결과의 주된 목적는 다른 조건 하에서 수제장의 하상학적 특성을 평가하는 것이다. 여기서 주어진 기준상황은 수제장 지역에서 하상학적 반응이 일어나지 않았기 때문에 목적에 도달하지 않았다. 수제장의 유사는 등류조건(normal flow condition)에서 일어나게 된다. 하지만, 유사뿐만 아니라 침식도 수제군 지역에서 나타난다. 이것을 explanation이라고 한다.

비월류 수제군 하천의 경우, HLES와 결합된 DELFT3D-FLOW는 주요하도와 수제장 두 곳에서의 흐름패턴을 잘 재현하고 수력학(hydrodynamic)을 합리적으로 해석한다. 주요 하도에서의 하상학적 응답은 실제 장에서의 관측값과 비교할만하다. 그러나, 수제장에서의 하상학적 거동은 주어진 초기 하상과 비교하여 실질적인 변화가 없는 것으로 예측됐다. 이것은 주요 하도의 관점에서는 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 주요 하도와 수제장 사이에서의 유사교환을 검토할 때 전체 유사 밸런스에서 문제가 나타나게 된다.

먼저, 비월류수제 부근에서의 흐름패턴은 주요하도에서 수제장 방향 하류부분으로 주요 순환 셀 방향을 따라 이류 유사이송성분(advective sediment transport component)이 존재하게 된다. 이러한 특성은 시뮬레이션에서는 확인할 수 없었던 특성이다. 여기서 쟁점은 이것이 하도와 수제장사이에 유사유동(sediment flux)을 방해하는 단계가 있다는 증거이다. 이것은 의미있는 논쟁이지만, 단계가 없는 이동상실험을 모의한 Rupprecht(2004)에 의해 실행된 상세모의는 같은 결과(수제장의 이송이 없음)로 나타났다.

다음으로, 주요 하도의 유사농도가 수제장 안쪽에 비해 비교적 높다. 이것은 주요하도에서 수제장 영역으로 유사확산이 전달됨을 의미한다. 그럼에도 불구하고 부유사농도는 수제장으로 들어올 때 혼합층을 넘어 횡방향으로 상당히 감소했다. 그리고 유사는 수제장 영역으로 거의 들어오지 않았다. 유사확산계수(ε_s)를 증가시켜도 결과는 개선되지 않았다. 즉 수제장 안쪽의 유사농도는 증가하지 않았다. 더욱이 전체 계산영역에서 유사확산계수(ε_s)를 증가시키면, 비현실적인 하상학적 패턴이 발생하고 수제 끝의 국부적인 세굴공이 사라지게 되고, 퇴적물이 법선을 따라 발생하게 된다. 유사확산계수(ε_s)를 증가시키기 위한 좀더 발전된 방법은 난류강도구역에 따라 공간변화 확산계수를 적용하는 것이다. 공간변화 확산계수는 SGS 모델에서 구해진 수평와점성(ν_H) 결과로부터 추정된다. 시간변화 와점성은 평균값(off-line)에 근접하고 factor 5가 강화되는 것으로 추정되었다. 이때 공간변화 확산계수장의 이송모듈이 제공되었다. 비록 이것이 수제장 하상변화의 주요한 개선방안이 아니라고 해도 적용했다.

마직막으로, 부유사는 주수로 구역에서 수제 장으로 이송되는 중요한 요인들은 양쪽 지역의 기준유사농도, 부유사 함유물의 적정시간/길이축척, 혼합층의 유사이송량이다.

DELFT3D-MOR에서 계산되는 기준농도는 수심평균 유속의 기능이 있다. 수제와 법선 주변에서 속도는 주요 하도 보다 느리다. 따라서 유사이송량은 상당히 떨어지게된다. 게다가 수제영역안에서 유속운동은 한계점과 가까워져 수송량은 수제영역안에서 '0'에 가까워진다. 따라서 법선에서 경사가 급해지고 전체 소류사에 갑작스런 퇴적물이 발생하게 된다. 앞의 문단에서 설명한 바와 같이 국부평형 조건에서 부유사의 반응은 지체효과에 의해서 지연된다. DELFT3D에서 계산되는 대응시간과 길이는 유속의 함수이다. 흐름영역 내부의 회류역(circulation zone)에서 유속은 상당히 감소하고 Galappatti와 Vreugdenhil의 모델의 유효한 범위 밑으로 내려가게 된다. 이 경우에는 매우 짧은 대응길이가 적용된다. 그 결과 농도는 국부 평형 농도의 짧은 거리까지 떨어진다. 따라서 소류사와 유사하게 전체 부유사는 법선을 가로질러 침전되게 된다.

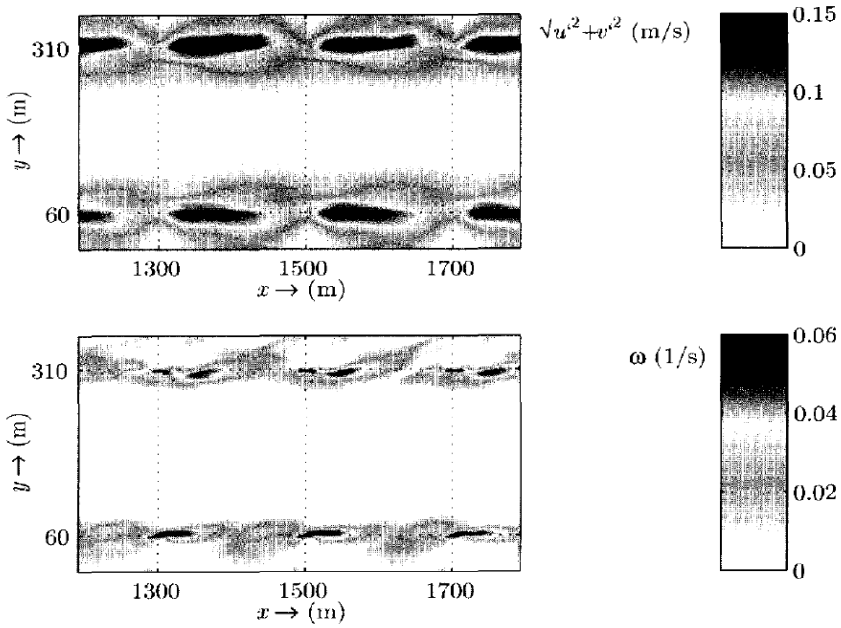


Figure. 15. Distribution of: total turbulence intensity (upper panel), and vorticity (lower panel)

현저하게 수제와 법선 근처 지역에서 높은 난류강도와 높은 소용돌이가 나타난다(Fig. 15). 소용돌이는 상류 수제 끝에서 발생하여 주요 와류의 흐르는 방향을 따라 하류로 이동한다. 이 소용돌이는 유로상의 혼합층에서 높은 침전물 집중을 야기하는 유사 흡기현상이 증가한다. 유사이송 공식이 적용가능 하지만, 증가된 와류수준(turbulence level)을 무시한다.

6. 결 론

지금까지의 연구를 통해서 대수평와류(large horizontal eddies) 해석이 가능한 수학적 모델을 이용하여 하천의 수제불꽃(groynes flame)을 재현할 수 있음을 알아냈다. 이러한 하상학적 패턴을 잘 재현하기 위한 첫 번째 조건은 시간 의존성 흐름장(time-dependent flow field)을 정확히 해석하는 것이다. HLES를 적용하고 시간축적을 적용하여 하상변화를 해석한 경우 실제 관측한 하상과 유사한 것으로 나타났다.

그러나 HLES를 이용하지 않은 평균유속 모델을 사용하는 경우, 하상형태는 현실성이 떨어지고, 하상학적 변화시간이 길어진다. 이러한 느린 진행은 시간적으로 변화하는 와류(eddy)의 형상과 관련된 강력한 유속변화를 무시한 결과이다. 이는 주 하도와 수제장 사이에서 발생하는 대와류가 정형적인 하상패턴을 포함한 수제에서는 중요한 매카니즘임을 추정할 수 있다.

DELFT 3D 모델을 이용한 수제 장의 하상변화 예측은 아직 보완해야 할 부분이 많다. 현재 이러한 연구는 HLES를 이용한 2D model을 이용하고 있다.

따라서 수리학적 모델의 현재 해석능력은 유사이송모델링의 수직운동과 증가하는 난류강도(turbulence level)에 대한 개발이 절실히 필요하다.

사 사 문

본 연구는 “2008~2009년 영남대학교 산학연

구처의 교비 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사한다."

참 고 문 헌

1. 김근영, 지홍기(2010). 식생수제를 이용한 친환경하천 유도, 대한토목학회 2010년도 정기학술대회 논문집, pp. 904-907
2. 정성순, 지홍기(2010). 수제에 의한 호안기법, 대한토목학회 2010년도 정기학술대회 논문집, pp. 1601-1605
3. 김근영, 지홍기(2009). 수제를 이용한 생태하천 창출기법, 한국수자원학회 학술발표회 초록집, pp. 2093-2097
4. 김근영, 지홍기(2009). 충적하천의 수충부에서 월류수제에 의한 2차원흐름특성 분석, 대한토목학회 2009년도 정기학술대회 논문집, pp. 1535-1538
5. 전도석, 김근영, 박효길, 지홍기(2009). 충적하천의 수충부에서 수제에 의한 저수로 유도기법, 한국수자원학회 학술발표회 초록집, pp. 560-564
6. 안선복, 박효길, 전도석, 지홍기, 이순탁(2008). 만곡하도에서 수제주변의 2차원흐름특성 해석, 대한토목학회 2008년도 정기학술대회 논문집, pp. 702-705
7. 강준구, 김성중, 여홍구(2009). 경사수제 주변 흐름특성 분석에 관한 실험연구, 한국수자원학회논문집 v.42, no9, pp. 715-724
8. 여홍구, 강준구, 김성중, 윤병모(2009). 수제의 투영길이에 관한 실험연구, 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집, pp. 1802-1806
9. 강준구, 김성중, 여홍구(2008). L형 수제주변 흐름특성 변화에 대한 실험연구, 한국수자원학회논문집, v.41, no.7, pp. 653-667
10. 여홍구, 강준구, 김성중(2007). 수리 및 3차원 수치모형을 이용한 경사형 수제주변 흐름해석, 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집, pp. 1229-1233
11. 여홍구, 강준구, 노영신, 김성중(2006). 월류수제 주변의 국부세굴특성에 관한 실험연구, 한국수자원학회 2006년도 학술발표회 논문집, pp. 1561-1565
12. 여홍구, 강준구, 김성중, 노영신(2006). 투과율과 설치각도에 대한 수제주변 세굴영역에 관한 실험 연구, 한국수자원학회논문집, pp. 583-592
13. 여홍구, 강준구, 노영신, 김성중(2006). 수심변화에 따른 경사수제 주변 흐름특성의 변화, 한국수자원학회 2006년도 학술발표회 논문집, pp. 1561-1565
14. 강준구, 여홍구, 김성중(2005). 단일 횡수제 조건에 따른 선단부 유속과 재순환 영역에 대한 실험 연구, 한국수자원학회논문집, pp. 143-153
15. 우효섭(2001), 하천수리학, pp. 763-820
16. 한국수자원학회(2005). 하천설계기준 · 해설, pp. 547-566
17. Mohsen, B., Ramin, F., Ahmad, D. A., Mirkhalegh, Z. A. (2008). Experimental Investigation of Local Scouring Around a Serise of L-Head Groynes, 8th ICHE, Nagoya, Japan, pp. 383-384
18. Teraguchi, H., Zhang, H. (2008). Study on Flow and Bed Deformation Around Impermeable and Permeable and Permeable Groins, 8th ICHE, Nagoya, Japan, pp. 367-370
19. McCoy, A., Constantinescu, G., Koken, M., Weber, L. (2007). Effect of relative submergence on the flow and mass exchange processes in a channel with two lateral groynes, 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, pp. 699
20. Errema, R., Muste, M.(2004). "Scale Effects in Flume Experiments on Flow around a Spur Dike in Flatbed channel." J. Hydr. Eng., Vol. 130, 635-646

21. Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. van Kester and G. S. Stelling, 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering 51 : 883-915. 379
22. Muste, M., Xiong, Z., Bradlet, A., and Kruger, A.(2000). "Large-Scale Particle Image Velocimetry. a Reliable Tool for Physical Modeling, "Proceedings of ASCE 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, MN
23. Martinez, E., Ettema, R., Lachhab, A. (2002). Scour Experimnets on Dike Angle, Porosity, and Hook for a Thin Dike, 1st ICSF-1, pp. 364-372
24. Jagers, H. R. A. and S. A. H. van Schijndel, 2000. 3D computations around structures. Tech. Rep. Q2487, WL/Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. In Dutch(3D rekenen rondom constructies). 536
25. Fujita, I. Muste, M, and Kruger, A (1998). "Large-Scale Particle Image Velocity for Flow Analysis in Hydraulic Applications," Journal of Hydraulic Research, 36(3), pp. 397-414
26. Uittenbogaard, R. E., 1998. Model for eddy diffusivity and viscosity related to sub-grid velocity and bed topography. tech. rep., WL/Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 532
27. Wallingford HR (1997). "Guidelines on the geometry of groynes for river training" Refort SR 493
28. Lloyd, M.P., and Stansby, P.K. (1995). "Unsteady Surface-Velocimetry Field Measure-ment Using Particle Tracking Velocimetry," Journal of Hydraulic Research, 33(4), pp. 519-534
29. Schmidt, J. C., Rutin, D. H., and Ikeda, H. (1993). "Flume Simulation of recirculating flow computation near groyne." Water Resour. Res., 29(8), pp. 2925-2939
30. Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. (1990). "2D depth-averaged flow computation near groyne." J. Hydr. Eng., 116(1), pp. 71-86
31. Stelling, G. S., 1984. On the construction of computational methods for shallow water flow problems. Tech. Rep.35, Rijkswaterstaat. 94, 216, 282, 286, 287, 288, 289, 292, 293, 295, 306, 383, 384, 536
32. Rijn, L. C. van, 1984a. Sediment transport, Part I : bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering 110(10) : 1431-1456. 365
33. Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B.(1983). "Flow near groyne-dike structures." J. Hydr. Div., ASCE 109(HY3), pp. 463-480
34. Francis, J.R.,Pattanick, A., and Wearne, S. (1968). "Observation of flow patterns around some simplified groyne structures in channels" Technical Note No. 8, Proc., Inst. of Civil Engineers, London, England, Dec., pp. 829-846

○논문접수일 : 11년 01월 24일
○심사의뢰일 : 11년 01월 25일
○심사완료일 : 11년 02월 24일