수치모형을 이용한 하상변동 시공간 평가 기법 개발 연구

A Study on Development of Assessment Model for Spatio-Temporal Changes in River Bed Using Numerical Models

김 철 문* / 이 정 주** / 최 수 원*** / 안 원 식****

Kim, Chul-Moon / Lee, Jeong-Ju / Choi, Su-Won / Ahn, Won-Sik

Abstract

In this study, to develop an assessment method for spatio-temporal riverbed changes, a 1-dimensional model (HEC-RAS) and a 2-dimensional model (CCHE2D) were built and applied. As for the analysis of a riverbed's long-term change in a real stream, three new assessment methods were developed, which are called the "Sediment section cumulative curve", "Sediment section moment", and "Sediment probability distribution function." These methods were used to assess the characteristics of riverbed changes using a consistent valuation standard and to understand changes in quantities intuitively. From the results of this study, sediment characteristics of cross sections can be detected effectively by applying the "Sediment section cumulative curve" method to determine whether there is any sedimentation or erosion in total emission. The amount of sedimentation or erosion occurring in the right or left banks, which divided by center column, could be presented as one criterion by applying the "Sediment section moment" method. This approach could be utilized as an indicator for sediment predictions. Spatio-temporal sediment variables can be presented quantitatively by determining the mean and uncertain boundaries through the "Sediment probability distribution function", and finally, the results can be illustrated for each cross section to provide intuitive recognition.

Keywords : assessment riverbed change, sediment section cumulative curve, sediment section moment, sediment probability distribution function, HEC-RAS, CCHE2D

요 지

본 연구에서는 하상의 시공간적 변동에 대한 평가 기법을 개발하고자, 1차원 HEC-RAS 모델과 2차원 CCHE2D 모델을 이용해 하상변동을 평가하였다. 실제하천의 장기간 하상변동의 결과를 해석함에 있어서 변동 특성을 일관적인 기준으로 평가하고, 변화량을 직관적으로 알 수 있는 평가방법을 개발하고자 유사단면누가곡선, 유사단면모멘트, 유사확률분포함수의 세 가지 평가 방법을 개발하였다. 본 연구를 수행한 결과 유사단면 누가곡선법은 단면의 총량적 개념의 침식 또는 퇴적 여부를 판별하는데 효과적이며, 유사단면 모멘트법은 하천의 좌, 우안을 나누는 기준선을 중심으로 좌, 우안의 퇴적 또는 침식 정도를 하나의 척도로 제시하는 것이 가능하였다. 이러한 방법은 하천의 곡률 등과 연계한 하상변동 예측에 있어서 하나의 영향지표로 활용할 수 있을 것이다. 유사확률분포함수의 경우 하천 단면 구간에 대한 시간의 변화에 따른

*수원대학교 토목공학과 박사과정 (e-mail: stgate@korea.kr)

Ph.D., Course, Dept. of Civil Engrg., The University of Suwon, Gyeonggi-do 445-743, Korea

**교신저자, 한국수자원공사 조사기획처·공학박사 (e-mail: jeongju@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Ph.D., Water Resources Investigation & Planning Dept., K-water, Daejeon 306-711, Korea

***수원대학교 토목공학과 박사과정수료 (e-mail: csw1770@naver.com)

Ph.D., Candidate, Dept. of Civil Engrg., The University of Suwon, Gyeonggi-do 445-743, Korea

****수원대학교 토목공학과 교수 (e-mail: wsan@mail.suwon.ac.kr)

Ph.D., Professor, Dept. of Civil Engrg., The University of Suwon, Gyeonggi-do 445-743, Korea

변동 모의 결과를 직관적으로 도시하고, 해당 구간의 시공간적 변동 특성을 통계적 특성치인 평균과 신뢰 구간을 통해 정량화 할 수 있었다.

핵심용어 : 하상변동평가, 유사단면누가곡선, 유사단면모멘트, 유사확률분포함수, HEC-RAS, CCHE2D

1. 서 론

최근 4대강 살리기 사업 등으로 하천에 큰 변화가 있었고 하천의 이용, 개발, 보존 및 관리에 대하여 그 어느 때보다 관심이 높아졌다. 이 중 하천의 하상변화는 하천의 물리적 생태적 환경에 영향을 미치는 중요한 요소이기 때문에 하천의 세심한 관리를 위하여 매우 중요하게 다루어져야 할 사항이며, 댐·보 등 다양한 목적의 수공구조물과 하도준설이 하천의 하상변화에 미치는 영향은 향후 하천을 보존하고 관리하는데 필수적으로 고려해야 할 사항이 되었다. 따라서 하천의 하상변화를 정량적으로 파악하는 과정이 반드시 필요하다. 지금까지 하상변동은 일반적으로 하천의 중형단 표고변화를 도식적인 방법으로 표현하고 일부 정량적인 평가와 정성적인 해석으로 하천하상의 변화를 표현하고 있다. 하상의 변화 또는 변동은 주기(단기, 장기)에 따라 다르며, 공간적 범위(중단, 횡단)에 따라 다르다. 가장 정확한 방법은 대상하천의 중형단을 지속적으로 관측하는 것이 될 수 있으나 이는 현실적으로 불가능하다. 현재 실무에서 적용하고 있는 하상변동평가의 대표적인 방법은 하천기본계획을 통해 하천의 중형단 측량을 통하여 단면의 변화를 평가하고 있는데, 이러한 계획이 법적으로 10년에 한 번씩 수행되고 있으니 10년 전의 특정시점(측량시점)에 측정된 하상표고와 10년 후의 시점에 측정된 하상표고의 차이가 단순히 비교되고 있는 것이다. 이러한 결과의 단순비교로 하상변동을 평가하는 것에는 한계가 있다. 그 하천의 하상이 시기별로 어떤 특성을 갖고 상승하는지 또는 하강하는지, 현재시점의 변화량이 전체적인 변동과정에서 어느 정도에 위치하는지 알기 어려운 것이다. 그러므로 하상변동은 장단기의 해석기간과 공간적 범위를 정확하게 규정하는 전제하에 언급하는 것이 바람직하다. 실제관측에 의한 시공간적 하상변화를 해석하는 것은 어려우므로 하천의 하상변화를 시간적, 공간적으로 예측, 평가하기 위하여 1차원, 2차원 및 3차원 수치해석 모델을 이용하는 것이 필요하다. 그러나 현실적으로 1차원 해석은 횡단면 공간에 대한 변동 해석이 어렵고 2차원, 3차원의 경우 장기간 해석을 할 경우 많은 계산시간이 요구되기 때문에 실무 적용에 주의를 요한다. 따

라서 이러한 한계를 극복하기 위하여 검·보정된 수치모델을 구축하고 이를 통한 시공간적 특성을 파악하는 것이 필요하다. 수치모델을 이용할 경우 1차원모델의 경우 중단특성을, 2차원모델의 경우 중단 및 횡단 특성을 파악할 수 있다. 그리고 각 모델의 분석기간에 따라 시간적인 하상 변동 변화량을 파악할 수 있기 때문에 수치모델을 이용한 하상변동 모의는 빈번하게 이루어지고 있다. 문제는 이러한 수치모델로부터 얻어진 결과를 평가하고 제시하는 방법과 기준이 모호하다는 것이다. 대부분의 연구결과들은 해석기간 종료 후 수치모델로부터 얻어진 최심하상고를 도시하거나 구간별 유속, 하상표고 등을 공간적으로 도시하는 정도에서 결과를 평가하였다. 즉, 대략적인 변화 정도를 직관적으로 인지할 수는 있으나, 임의 단면에서의 횡단면 변화특성까지 모의할 수 있는 2차원모델의 장점을 결과로 제시하는데 있어서 미흡한 부분이 있었다. 따라서 본 연구를 통해 2차원모델의 해석과정에서 얻어지는 하상 변동 특성을 지표화하여 표현할 수 있는 일관적이고 정량적인 분석기법을 개발하고자 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 유사거동 특성 변화의 원인이 되는 댐 건설로 인한 하류 하상변동 예측을 위한 기존의 연구로는 유권규와 우효섭(1993)이 HEC-6 모델을 이용하여 대청댐 하류 75 km 정도의 긴 구간에 대한 추후 40년간의 하상변동을 모의한 연구사례가 있으며, 장창래 등(2000)도 횡성댐 건설에 따른 하류 하천구간의 하상변동을 예측하기 위해 마찬가지로 HEC-6 모델을 이용하여 10년 동안의 하상변동을 예측하고, 댐 건설 이후 유사 유입 지하효과에 의한 퇴적량 감소보다는 댐의 유량조절 효과로 인해 침식이 줄어들어 하상저하가 작아지는 것을 확인하였다. 물론 이러한 효과는 하도구간 전체에 공통으로 적용되는 것은 아니며, 위의 연구에서도 구간에 따라 침식 또는 퇴적량이 다른 것으로 모의하였다.

본 연구에서 이용하고자 하는 1, 2차원모델을 이용한 기존의 하상변동 관련 연구들을 모델별, 해석기간별로 나누어 살펴보면, 1차원 장기하상변동 연구 사례로는 이종석 등(1999)이 1차원 수치모형인 FLUVIAL-12 모델을 이용하여 충주댐 상류 사행하천 구간의 단기하상변동을 모의하기 위해 지속시간 8시간의 실제 수위자료를 유량으

로 환산하여 모델에 적용한바가 있다. 하상변동 모의를 위한 대표적인 1차원 모형은 HEC-6, CHARIMA 모형 등이 있으며, 모두 하폭 전체에 걸쳐 일정한 침식 및 퇴적량을 계산하기 때문에, 횡방향 유사 모의는 할 수 없는 것이 특징이다. 반면 연산과정과 제시결과와 단순함으로 장기 간 모의에 적합하기 때문에 적용사례들이 비교적 많이 존재하고 있다. 윤여승과 안경수 (2007)는 미호천과 금강에 대해, 박기두 등 (2008)은 안양천의 장기하상변동 모의를 위해 HEC-6 모형을 이용한 사례가 있다. 최호균 등 (2009)은 하상 이동성과 형태와의 상관성에 관한 하도수리학적 평가를 통해 상류 유황의 변화, 유사 이송량의 변화 및 골재채취와 같은 인위적인 하상교란에 의한 유사 유입이 유심부의 이동과 더불어 하도형태 변화의 주요 원인이 될 수 있음을 지적하였다.

2차원 하상변동 모형 사례는 주로 단기간 분석 사례가 많다. 김연수 등 (2010)은 수조실험과 CCHE2D 모형의 결과 비교를 통한 수치모형의 수리특성 계산결과를 검토한 후 급만곡부를 갖는 실제 하천에 적용하고 평가하였다. 모형의 조건을 동일하게 하고, CCHE2D 모형에서 선택할 수 있는 유사량 공식들의 선택에 따른 결과를 단순히 비교해서 실제와 비교해 본 사례도 있다 (지운 등, 2010).

2차원 모형을 이용한 장기간 유사 거동에 관한 연구 사례는 많지 않으나, 준 2차원 하상변동 모형을 이용한 연구 사례로 서일원 등 (1995)이 GSTARS를 이용하여 금강의 대청댐 하류에 대한 8년간의 장기영향을 평가하고 단기 변동 모의결과와 비교하였으며, 단일 홍수사상에 대한 단기 예측에 있어 해당 모형이 적합함을 언급하였다. 박영진 등 (2007)은 SMS프로그램의 RMA2와 SED2D 모형을 이용하여 영천댐 저수지 내의 하상변동을 향후 100년 까지 모의한 바 있으며, RMA2 모형 수행에만 하루 이상의 시간이 소요되는 어려움이 있음을 언급하였다. Negm et al. (2010)은 CCHE2D 모형을 이용하여 Aswan High Dam 저수지의 퇴적에 의한 생애주기 분석을 수행한 바 있다. Zeng and Beck (2003)은 Sediment-Transport-Associated Nutrient Dynamics (STAND)를 이용하여 하상변동을 모의하고 HEC-6에 의한 결과와 비교하였다. 그 외에도 CCHE2D 모형을 이용하여 2차원 하상변동 모의의 장점을 적용시킨 여러 연구들이 있다 (Duan and Nanda, 2006; Nassar, 2011). 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 연구들이 주로 지점별 최종변동 깊이 예측에 초점이 맞추어져 있는 것을 개선하고자, 특정 지점의 최종 변동 깊이만이 아니라 하천 구간의 물리적 조건에 의한 하상변동성을 일관된 기준으로 평가할 수 있는 기법을 개발

하고, 실제 하천을 모델로 구성된 1, 2차원 장기 하상변동 해석 결과의 시공간적 변동성을 통계적 기법으로 평가할 수 있는 하상변동 평가방법을 개발하고자 한다.

2. 대상유역 및 모델 평가

2.1 대상하천 선정

본 연구에서 대상으로 하는 하천 구간은 낙동강의 제1지류인 내성천 구간이고, 최근 영주댐 건설로 이슈화된 자연경관이 뛰어난 하천 관광지인 회룡포 구간이다 (Fig. 1). 내성천의 유역면적은 1,806.7 km²이고, 내성천 하구에서 국가하천, 지방1급 및 지방2급 하천 구간을 통과하여 발원지인 선달산 남쪽 계곡에 이르며 유로연장은 108 km이다. 현재 4대강사업을 통하여 영주댐이 건설 중이며, 하류에 월포, 죽전, 향석 관측소가 위치하고 있다. 주요 관심 구간인 회룡포는 깨끗한 백사장으로 이루어진 하천 경관으로 인해 지역의 관광자원이 된 곳이며, 영주댐 건설지로부터 48.4 km 하류에 위치하고 있다. 이 지역은 암반의 돌출로 인한 하천의 만곡이 생기는 감입곡류 하천으로서 마을을 350° 휘돌아 흐른다. 장기적인 하상변동 분석이 필요함에 따라 계산시간을 고려해 해석구간을 선정하였으며, 회룡포 상류 죽전수위표 지점으로부터 하류 향석 수위표 지점까지 5.8 km 구간에 대해 모형을 적용하고 평가하였다.

2.2 수치모의 선정 및 수치모의 조건

1차원, 2차원 장기하상변동 분석은 공학적 설계의 실행 가능성 평가나 최적화를 위한 계획과 의사결정 등을 위해 장·단기간 영향예측 모의기법으로 활용되고 있다. 본 연구에 적용할 수치모형의 선정은 1차원 및 2차원 수치모형에 대하여 주로 사용되는 모델들을 비교, 검토하여 선정하였다. 하천에서 하상변동 예측을 위하여 사용할 수치모형의 흐름에 따라 정상류, 준부정류, 부정류 모형으로 구분하게 되는데, 장기하상변동 모형은 주로 1차원 정상류 모형을 이용한다. 부정류 모형은 흐름해석의 수치안정성을 확보하는 것이 쉽지 않기 때문에 주로 단기간 해석에 이용된다. 본 연구에서는 준 부정류에 의한 장기적 해석을 목적으로 모델들을 비교 검토 하였다.

1차원 유사이동 모형은 1970년대부터 본격적으로 개발되기 시작했으며, 국내외에서 다양하게 적용되는 주요 수치모형은 HEC, MOBED, CHARIMA, GSTRS 등이 있다. 본 연구에서는 회룡포의 급 만곡부 하천 유사특성과 수치기법, 편의성을 고려하여 HEC-RAS 모형을 선정하였다. 2

Fig. 1. Location of Study Area

Fig. 2. Profile of Riverbed Elevation for One-dimensional Model

차원 유사이동 모형은 평면 2차원 모형과 연직 2차원 모형으로 구분할 수 있으며, 1980년대부터 본격적으로 연구 개발이 시작되었다. 국내외에서 적용되는 주요 수치모형들은 SMS (SED2D), RAMS (RAM6), CCHE2D, RIC-Nays 등이 있다. 본 연구에서는 하상도 입도분포를 입력자료로 이용이 가능하며, Ackers and Whit (1973), Engelund and

Hansen (1967), Wu et al. (2000), SEDTRA Module (Garbrecht et al. 1995) 등의 방법으로 소류사와 부유사, 총유사 이송형태 모의가 가능한 CCHE2D 모형을 선택하였다.

1·2차원 흐름 및 하상변동 모의를 위한 지형자료는 2010년 내성천 하천 기본계획의 측량자료를 이용하였다. 1차원해석은 월포지점에서 향석지점까지 총 105개 단면, 약 20 km에 대해서 구성하였으며, 2차원 해석을 위해서 Mesh의 구성은 길이방향 5.8 km, 하폭 200~350 m에 대하여 길이방향 71개, 하폭 20개로 분할하였다.

경계조건은 2010년 1월부터 12월까지를 모의 기간으로 하여 일유량과 수위 값에 대하여, 시간간격은 36 sec로 2400회/day를 모의하였다. 수위와 유량 자료는 1차원모형의 경우 2011년 유사량 관측 자료를 활용하기 위하여 상류 월포 관측소의 유량 자료를 입력하였고, 이 경우 하류 향석관측소까지 전체 하도구간은 약 25 km 정도이다. 2차원모형의 경우 계산 소요시간의 단축을 위하여 상류 죽전 관측소로부터 하류 향석관측소까지 5.8 km 구간을 해석하였다. 하상도의 입경분포 자료는 내성천하천기본계획 및 수자원공사에서 2011년부터 관측하고 있는 월포에서 향석까지의 최근 관측 자료를 활용하였다. 2011년 관측을 통하여 제시된 월포지점의 부유사 추정식은 Eq. (1)과 같다.

(a) Divided mesh grid

(b) Riverbed elevation

Fig. 3. Topography of Two-dimensional Model

Fig. 4. Transportation Curve at Wolpo Station

$$Q_s = 0.067 Q^{1.982} \quad (1)$$

모형입력 경계조건으로 이용될 총유사량 추정 값을 결정하기 위하여 총유사량 추정식들을 검토한 결과 (Fig. 4), 부유사의 관측데이터 경향을 가장 잘 반영하는 Yang (1979) 공식을 이용하여 총유사량 추정식을 Eq. (2)와 같이 개발하였으며, 관계식을 통해 월포지점의 해당 유량에 대한 비유사량을 산정하여 모형에 적용하였다.

$$Q_{ts} = 12.48 Q^{1.6} \quad (2)$$

2.3 하상변동 분석 결과의 검토

과거의 위성사진을 보면 다음과 같이 암반 돌출부까지

Fig. 5. Inflow Discharge and Total Load

하천이 다양하게 변화하지만 급 만곡부 이후 회룡포 백사장 지역은 큰 변화가 없는 것으로 보인다.

회룡포 구간의 10년간의 측량 자료 분석 결과 국소구간에서 -0.5m의 침식이 진행하지만, 그 범위가 작고, 전체적으로 0.5~1.7m 가량의 퇴적이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

2.3.1 일차원 모형의 주요 단면별 분석 결과

본 연구에 적용한 1차원 수치모형의 조도계수는 하천정비기본계획에서 구간별로 제시한 0.029~0.031을 입력하였으며, 하상변동 계산 방법은 HEC-RAS모형 Sediment Data의 Initial Conditions and Transport Parameters에서 Table 1과 같이 적용하였다. 1번 지점 (STA 3.997)은 평·갈수기 +10일에 단면변화가 거의 없었으며, 홍수기+231일

Fig. 6. Comparison of Plain View Through Timing Different Satellite Images

Fig. 7. Overview of Riverbed Changes Through Survey

Table 1. Selected One-dimensional Model Parameter and Equation

Roughness coefficient	Sediment Transport Function	Sorting Method	Fall Velocity Method
0.029~0.031	Yang (1984)	Active Layer	Van Rijn

에는 -0.03 m 침식이 진행되었다. 2번 지점 (STA 5.309)도 평·갈수기 +10에 단면변화가 거의 없었으며, 홍수기+231 일에는 -0.03 m 침식이 진행되었다. 3번 지점 (STA 6.823)은 평·갈수기 +10에 0.01 m 퇴적이 진행되다가 홍수기 +231 일에는 0.2 m 가량 퇴적이 진행되었다. 4번 지점 (STA 7.794)은 평·갈수기 +10에는 단면변화가 거의 없었으며, 홍수기 +231 일에는 -0.05 m 침식이 진행되었다. 5번 지점 (STA

8.554)은 평·갈수기 +10에는 거의 변화가 없었으며, 홍수기 +231일에 0.01 m 가량 퇴적이 진행되었다.

2.3.2 이차원 모형의 주요 단면별 분석 결과

본 연구에 적용한 2차원 수치모형의 조도계수는 1차원 수치모형에 적용한 값을 기초로 홍수터와 주 수로를 구분 하여 입력하였으며, 총유사 이송형태와 만곡부의 효과를

Fig. 8. Riverbed Change Simulation Result on Representative Sections by HEC-RAS

Table 2. Selected Two-dimensional Model Parameter and Equation

Roughness coefficient	Turbulence Model	Sediment Transport Mode	Curvature Effects
0.029~0.031	Mixing Length Model	Total Load (Wu et al. Formula)	Average channel Width (300 m)

Table 2와 같이 선택하여 계산하였다.

2차원 분석은 평·갈수기와 홍수기의 하상변동 양상의 차이점이 나타났다. 1번 지점 (STA 3.997)은 평·갈수기인 +10일에 -0.06 m 침식이 일어난 반면, 홍수기인 +231일에는 +0.2m 퇴적이 진행되었다. 2번 지점 (STA 5.309)은 평·갈수기인 +10에 0.06 m 퇴적되다가 홍수기인 +231일에는 큰 변화량은 없는 것으로 나타났다. 3번 지점 (STA 6.823)은 평·갈수기인 +10에 큰 변화가 없다가 홍수기인 +231일에는 0.2m 가량 퇴적이 진행되었다. 4번 지점 (STA 7.794)은 평·갈수기인 +10에는 0.06 m 퇴적이 진행되다가 홍수기인 +231일에 -0.4m 정도 침식이 진행되었다. 5번 지점 (STA 8.554)은 평·갈수기인 +10에는 거의 변화가 없었으며, 홍수기인 +231일에 -0.2m 가량 침식이 진행되었다. 본 연구를 통해 모의한 일차원 및 이차원 모형의 분석 결과는 과거 측량성과와 같은 양상을 보이고 있는 것으로 나타났으며, 특히 이차원 모형의 해석 결과는 만족부의

사주형성 과정을 잘 반영하고 있었다.

3. 하상변동 평가 기법

기존의 하상변동 평가는 주로 지점별 하상변동 현황을 수치로 제시하는 수준이다. 하천기본계획에서는 하천의 종 방향으로 최심 하상고를 기준으로 퇴적 및 세굴을 평가하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 평가 방법은 하천 단면의 횡방향 하상변동 특성을 평가할 수 없는 단점이 있다. 즉 HEC-RAS 또는 HEC-6 등의 1차원 모형을 이용한 하상변동 모의는 횡단면 전체 또는 유수구간이 최심 하상고의 변화에 따라 일률적으로 세굴 또는 퇴적의 특성을 갖게 된다. 즉, 최심 하상고는 세굴 되어 낮아지더라도 하천 양안에 퇴적이 더 많이 된다면 동 지점의 하상변동을 어떻게 평가하여야 하는지 명확한 구분이 없다. 이러한 단점은 2차원 모형을 이용하여 보완될 수 있지만, 각각의

(a) Velocity at day +10 (normal season)

(b) Velocity at day +231 (flood season)

(c) Tractive force at day +10 (normal season)

(d) Tractive force at day +231 (flood season)

(e) Bed change at day +10 (normal season)

(f) Bed change at day +231 (flood season)

(g) Mean velocity of representative sections

Fig. 9. Modeling Result on Representative Sections by CCHE2D

단면에 대해 해석된 결과를 일관된 기준에 의해 해석하는 방법이 없기 때문에, 해석된 단면의 결과 그래프를 제시하거나 국지적인 변화량을 제시하는 등 1차원 모형과 별반 다르지 않은 평가가 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원 모형을 이용한 장기 하상변동 모의 결과를 평가하기 위한 기법을 개발하고자 하며, 하천의 각 단면별 시·공간적 변동특성을 일관된 기준에 의해 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시하는 하상변동 특성 평가 기법은 횡단면에 대해서 ① 유사누가곡선, ② 유사단면모멘트법, ③ 유사확률분포함수에 의한 세 가지 평가로 이루어져 있다.

3.1 유사단면누가곡선

유사단면누가곡선은 횡단면에 대한 특정기간의 변화량을 산정하는 것으로 대상 단면의 횡단을 따라 분석기간 전·후 단면의 차이를 구하고, 좌안 또는 우안을 기준으로 퇴적(+) 또는 침식(-)량을 누적하여 전체 변화량이 퇴적인지 침식인지를 판별하는 방법으로, 1차원 모형은 전체

가 퇴적 또는 침식의 특성을 갖지만, 2차원모형의 경우 한 단면 안에서도 구간에 따라 퇴적, 침식이 다르게 발생할 수 있기 때문에, 단면 전체의 변화가 어떤 특성을 갖는지 종합적으로 평가해볼 수 있는 방법의 필요에 의해 제시한 방법이다.

3.2 유사모멘트법

대상 지점에 대한 횡단면에 대하여 하천 중심점 또는 최심부를 기준으로 단면 1차 Moment를 통해 변화가 퇴적인지, 침식인지 여부와 그 변화정도를 정량화하는 방법이다. 하천의 중심선 또는 최심부를 기준으로 좌우를 나누어 기존 하상과 변화된 하상의 차이에 의한 구간별 면적과 해당면적까지의 거리를 곱한 단면1차모멘트를 구한 후 폭으로 나누게 되면, 좌우구간의 전체 길이에 퇴적 또는 침식량이 등분포하는 형태의 면적에 해당하는 값을 구할 수 있게 된다. 이를 통해 퇴적 또는 침식량의 정도를 하나의 지표로 알 수 있게 되며, 2차원모형의 결과에 적용하여 하상변화의 횡단특성에 대하여 분석하는 방법이다.

Fig. 10. Sediment Section Cumulative Curve

Fig. 11. Sediment Section Moment

Fig. 11에서 하천중심 또는 최심하상을 기준으로 설정한 중심선 h 를 기준으로 좌안과 우안을 구분하여 h 축에 대한 단면 1차 모멘트 G 를 각각 Eqs. (3) and (4)와 같이 계산한다. 좌안과 우안에 대해 계산된 단면 1차 모멘트를 Eq. (5)와 같이 좌·우안 쪽으로 나누면, 위에서 설명한 퇴적 또는 침식 정도를 나타내는 하나의 지표 (sediment section moment index: SSMI)를 구할 수 있다.

$$G_{Inner Levee} = \int_{-y}^0 y \cdot dA = \int_{-y}^0 y \cdot h \cdot dy \quad (3)$$

$$G_{Outer Levee} = \int_0^y y \cdot dA = \int_0^y y \cdot h \cdot dy \quad (4)$$

$$SSMI = G / Width \quad (5)$$

3.3 유사확률분포 함수법

유사확률분포 함수법은 횡단면 구간(격자)에 대하여 퇴적 또는 침식의 편차 시계열자료를 확률밀도함수로 표현하고 하상변동을 확률적으로 표현하는 방법이다. 이 방법은 각 시간 단위별 변화량을 종합적으로 평가하는 방법이다. 어떤 한 구간의 하상 변동은 시계열로 주어지는 유량에 의해 침식이 일어날 수도, 퇴적이 일어날 수도 있기 때문에, 모의 기간 전체에 걸쳐 퇴적과 침식량 자료를 이용한 통계처리를 통해 평균적인 거동과 불확실성 구간을 도출할 수 있는 방법을 제시하였다. 하천의 한 단면을 이루고 있는 단면구간 중 하나의 구간에서 모델링 시간간격마다 퇴적(+)되거나 침식(-)되는 높이를 x 라고 하면, 모의된 전체 기간에 해당하는 각 구간의 x 를 추출할 수 있

다. x 는 시계열 자료로서 해석할 수도 있고, 유량에 종속된 독립변수로 취급할 수도 있을 것이다. 유사확률분포함수의 개념을 도입한 이유는 한 구간의 하상변동 특성을 정의할 때, 단순히 시계열의 평균을 이용하여 하나의 값을 제시할 경우 그 특성이 왜곡될 가능성이 있기 때문이다. 예를 들어 어떤 단면의 한 구간이 365일 중 350일 정도는 몇 cm 범위 이내에서 변동하다가 길지 않은 홍수기에 대부분의 하상변동을 일으키고, 그 변화량이 수십 cm를 초과할 경우, 전체 평균값이 침투 값 쪽으로 치우치게 되는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 즉, 결과적으로는 퇴적이 발생한 지점이라도, 대부분의 자료들이 가지고 있는 특성이 변동이 없거나 약간의 침식들로 이루어져 있다면, 이러한 사상들의 분포를 이용하여 신뢰구간을 제시함으로써 평균과는 또 다른 자료들의 거동 범위를 도출할 수 있을 것이다. 한 구간에서 취득된 전체 모의 기간동안의 변동량 x_i 를 독립된 자료로 본다면, 하상 변동량 계급 구간에 따른 빈도의 개념으로 자료의 확률분포를 구할 수 있고, 확률분포로부터 산정된 최빈값과 분산을 이용하여 자료 특성을 정의할 수 있다. 한 구간 내의 침식 또는 퇴적량을 나타내는 x_i 들을 확률분포 X 로 표현하면, 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$X = N(\mu, \sigma^2) \quad (3)$$

여기서, N 은 가우시안분포(정규분포), μ 는 평균, σ^2 은 표준편차이다. 정규분포의 확률밀도함수 $f(x)$ 와 누적확률밀도함수 $F(x)$ 는 아래와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (4)$$

Fig. 12. Various Mean and Variance of Sediment Probability Distribution Developed for Each Divided Sector Through Time Flow

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right] \quad (5)$$

확률분포의 매개변수는 모멘트법, 최우도법, L-모멘트법 등 여러 방법에 의해 산정할 수 있으며, 본 연구에서는 L-모멘트법에 의해 매개변수를 추정하였다. Fig. 12는 횡단면의 각 소구간별로 시간에 따라 변화되는 침식 또는 퇴적량 자료들을 이용한 유사확률분포를 생성하는 과정을 도시한 개념도이다.

4. 하상변동 평가기법 적용 및 고찰

본 절에서는 앞 절에서 제시한 세 가지 평가기법을 실제 모델링 결과에 적용하고자 한다. 1차원 모형은 HEC-RAS를 이용하였으며, 2차원 모형은 CCHE2D를 이용하였다. 모형에 입력된 유량자료는 2010년 1년간의 일단위 관측유량이며, 두 모형의 모의 결과를 비교하기 위하여 하천의 만곡을 고려한 5개의 대표 단면(section 1~5)을 동일한 위치에 설정하였다. 우선 두 모형의 전체 기간 모의 결과에 의한 하상 변동량을 5개의 각 단면별로 비교해보면 Fig. 13(a)~13(e)와 같다. 그림의 세로축은 유사 모의가 끝난 최종 하상표고와 최초의 하상표고간의 편차를 의미하며, 가로축은 CCHE2D 모형에서 횡단구간을 나눈 20개의 격자망 번호를 의미한다. 단면별로 격자망의 개수는 동일(등간격)하지만 하폭이 다르기 때문에 각 단면별 격자의 길이는 다르다. HEC-RAS의 경우 가로축이 각 단면의 횡방향 거리가 되지만, 두 모형을 비교하기 위해서 거리를 격자 개수로 나눈 상대거리로 환산하여 모델 결과가 같은 축척에서 비교될 수 있도록 하였다. 그림에서 회색 막대로 표현된 부분은 CCHE2D 모형을 통해 모의된 구간별 최종 퇴적 또는 침식 편차이며, 검은 실선은 HEC-RAS에 의해 모의된 최종 변화량 편차이다. 세로축의 0을 기준으로 양의 값은 퇴적을 의미하고, 음의 값은 침식을 의미한다. 2차원 모형의 결과를 토대로 각 대표단면의 유사모의 결과를 평가해보면, 가장 하류에 해당하는 1번 단면의 경우 하천 중심부에서 약간의 침식이 발생하고, 중심의 우측에서는 약간의 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 2번 단면의 경우 우측에서 퇴적이 발생하였고,

3번 단면은 좌안 측에서 약간의 퇴적과 침식이 교차하여 발생했다. 4번 단면은 우안쪽에서 많은 침식이 발생했으며, 5번 단면의 경우도 우안쪽에서 많은 침식과 퇴적이 교차하여 발생한 것으로 모의되었다. 두 모형의 결과가 단면구간의 위치에 따라서는 비슷한 양상을 보이지만 침식 또는 퇴적량은 차이가 큰 것을 볼 수 있다.

유사단면누가곡선에 의한 2차원 모형의 모의결과 평가는 Fig. 13(f)에 도시하였다. 그림의 각 선은 다섯 개의 대표단면을 구분한 것이며, 단면별로 계산된 유사단면누가량은 세로축에 해당한다. 가로축은 각 단면을 나눈 20개의 소구간 격자 번호이다. 결과적으로 그림의 소구간 1에서부터 편차를 누가하여 20번까지 누적하여 계산된 결과에 의해 해당 단면의 전체적인 하상변동량이 퇴적인지 침식인지를 평가하게 된다. 각 단면의 최종 유사단면누가량은 Table 3과 같다. Table 3으로부터 각 단면에 대한 전체적인 침식, 퇴적 특성을 살펴보면, 1번 단면은 변동이 크지 않으며, 2번 단면에서 퇴적이 많이 발생하고, 3번 단면은 약간의 침식, 4번과 5번 단면은 침식단면이라고 평가할 수 있으며, 특히 4번 단면의 경우 침식량이 매우 큰 것을 볼 수 있다.

유사단면모멘트법을 적용하기 위하여 2차원 모형인 CCHE2D 모형의 한 단면을 구성하고 있는 20개의 구간 중심점 좌표를 추출하고, 각 구간 중심까지의 거리를 산정하였다. 앞에서 도시한 하상변동 모의결과 막대그래프의 면적 중심점으로부터 해당 단면까지의 거리를 곱하여 전 구간을 합산하면, 단면1차모멘트를 산정할 수 있다. 산정된 단면1차모멘트를 해당 좌우 하폭으로 나누면, 최종적으로 한 단면의 좌안과 우안에 대한 유사모멘트를 구할 수 있다. Fig. 14는 각 단면에 대해 하천 중심을 기준으로 산정된 좌, 우안 단면의 유사모멘트를 도시한 것이다. 그림에서 회색 막대 그래프는 좌안에 대한 유사단면모멘트 계산 결과이고, 흰색 막대그래프를 우안에 대한 유사단면모멘트 계산결과이다. 1번과 2번 단면은 우측 단면에서 약간의 퇴적을, 3번 단면은 좌측 단면에서 약간의 침식을, 4번과 5번 단면은 우측 단면에서 많은 침식이 일어남을 알 수 있다. 그림의 결과는 Fig. 13에서 각 단면별로 나타난 횡단 위치별 하상변동 편차를 하나의 지표로 나타낸 것으로 해석할 수 있다.

Table 3. Sediment Section Cumulative Curve Result for Each Representative Section

Control Section	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5
Cumulative Sum	0.1563	1.5230	-0.1863	-5.1109	-1.1847

(a) Deviation of riverbed change on each small sector of model mesh (cross section 1)

(b) Deviation of riverbed change on each small sector of model mesh (cross section 2)

(c) Deviation of riverbed change on each small sector of model mesh (cross section 3)

(d) Deviation of riverbed change on each small sector of model mesh (cross section 4)

(e) Deviation of riverbed change on each small sector of model mesh (cross section 5)

(f) Cumulative sediment curve of each representative section

Fig. 13. Deviation of Each Small Sector on Representative Section between Day 1 and Day 365. (f) Shows the Cumulative Sediment Curve Result Calculated with Deviation of Small Sector Number 1 to 20

마지막으로 유사확률분포 함수법을 적용하기에 앞서 CCHE2D 모델 결과로부터 추출한 구간별 하상의 일일 변화량을 이용하여 시공간적 변동성을 볼 수 있는 형태로 도시하면, Fig. 15(a)와 같다. 그림은 변화량이 비교적 큰 4번 단면을 예로써 도시한 것이다. 가로축은 횡단면을 소구간으로 나눈 20개의 격자번호를 의미하며, 세로축은 1일부터 365일까지 시간 축에 해당한다. 등고선의 형태로 표현되는 높이는 전일 기준 일단위 하상변동량 편차를 나타낸다. 즉, Fig. 15(a)를 통해 단면의 어느 구간이 어떤 시기에 얼마나 변동하는지 직관적으로 알 수 있는 하상변동모델링 결과의 시공간적 도시가 가능하다. 그림에서 타 원으로 표시한 부분은 365일 중 7월(182~212일)에 해당하는 부분을 대략 표시한 것이며, 해당 부분을 Fig. 15(b)에 확대 도시하였다. 세로축의 스케일이 가로축보다 너무

Fig. 14. Sediment Section Moment Result of Each Representative Section

크기 때문에 그림의 등고선을 확인하기 위해서는 월 간격 정도로 분리하여 도시할 필요가 있다. Fig. 15(b)를 통해 4번 단면의 7월중 하상변동은 하천의 우측 구간에서 7월 초와 7월 10일, 14일 경 침식이 일어나는 것을 확인할 수 있으며, 시공간적인 변화 양상을 동시에 해석하는 것이 가능하다.

유사확률분포 함수법에 의한 평가 결과는 앞의 Fig. 15(a)를 도시하기 위해 사용된 데이터, 즉 횡단면의 소구간별 365개의 하상변동량 자료 분포를 이용하여 대표단면 각 소구간별로 시간의 흐름에 따른 평균적인 변화정도와 변동의 불확실성 구간을 도시한 Fig. 16(a)~(e)를 통해 확인할 수 있다. 그림은 두 가지 데이터를 이용한 결과를 동시에 보여주고 있다. 우선 하나는 365개의 일별 하상 변화량 데이터 전체를 이용한 결과이며, 다른 하나는 변동의 영향을 좀 더 반영하기 위해 Threshold를 정하고 Threshold를 넘어가는 변동량만 채워둬서 같은 분석을 수행한 결과이다. Threshold 값은 ± 0.002 로 하루에 2mm 이상 퇴적되거나 침식되지 않으면 변화가 없는 것으로 간주하여 데이터를 채워둬하였다. 그림에서 실선은 원래의 전체 데이터를 이용한 구간별 변화량들을 이용하여 정규분포에 적합 시킨 결과 얻어진 평균을 의미한다. 반면 점선은 앞에서 설명한 Threshold를 초과하는 변동 값들만을 이용한 평균으로, 그 거동의 치우침이 더 큰 것을 볼 수 있다. 그림에서 음영으로 표현된 부분은 횡단면의 소구간별로 구해진 확률분포로부터 계산된 유의수준 5%에 해당하는 신뢰구간(confidence interval; CI)을 도시한 것이다. 전체 자료를 이용한 신뢰구간은 짙은 음영으로, Threshold 적용 자료를 이용한 신뢰구간은 옅은 음영으로 표현하였다.

(a) Spatio-temporal change of riverbed (1-365 day)

(b) Spatio-temporal change of riverbed (July)

Fig. 15. Spatio-temporal Riverbed Change Deviation Behavior

(a) Distribution of representative section 1

(b) Distribution of representative section 2

(c) Distribution of representative section 3

(d) Distribution of representative section 4

(e) Distribution of representative section 5

Fig. 16. Mean of Riverbed Change Deviation and Confidence Interval Shown as Line and Shaded Area Derived from Sediment Probability Distribution Function

자료의 개수가 많은 전체 자료 분포의 신뢰구간 폭이 더 좁게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Threshold를 적용하여 추출한 자료의 경우 자료 수에 비해 변화정도가 상대적으로 크므로, 평균의 거동은 민감해지는 반면 신뢰구간의 폭으로 대변되는 하상변동의 불확실성은 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림은 다섯 개의 대표단면에 대한 유사확률분포함수 적용 결과를 보여주고 있으며, 가로축은 각 대표단면의 소단면 격자번호를 의미한다. 각 소단면에 대한 유사확률분포함수를 도출하여 그 평균과 신뢰구간을 이용한 도시를 하였으며, 이를 통해 변동의 양과 일관성에 대한 정보를 직관적으로 파악할 수 있다. Fig. 16(d)의 4번 단면과 Fig. 16(e)의 5번 단면에 대한 결과를 예로 들면, 17번 소단면에서 평균적으로 침식이 빈번하게 발생했으며, 퇴적구간의 불확실성구간 폭이 넓은 것으로 미루어 퇴적이 발생한 자료도 어느 정도 섞여 있다고 판단할 수 있다. 유사확률분포의 단면에 대한 공간적 도시를 통해 각 하천 단면에서 어느 구간의 하상 변동성이 큰지, 평균적으로는 어느 정도의 퇴적 또는 침식이 발생했는지 등을 직관적으로 알 수 있게 해준다.

5. 결 론

본 연구에서는 하상의 시공간적 변동에 대한 평가 기법을 개발하고자, 낙동강유역 내성천의 회룡포 지점을 대상으로 1차원, 2차원 하상변동 모델을 이용한 장기간 하상변동을 모의하고, 모델에 따른 하상변동 모의 결과의 차이를 분석하였다. 2차원 모델에 의한 하천 단면의 횡 방향 하상변동 모의 결과를 해석함에 있어서 변동 특성을 일관적인 기준으로 평가하고, 변화 정도를 직관적으로 알 수 있는 평가방법으로써 유사단면누가곡선, 유사단면모멘트, 유사확률분포함수의 세 가지 평가 방법을 개발하여 제시하였으며, 회룡포 구간의 5개 대표 단면에 적용하여 평가하였다. 그 결과 유사누가곡선은 하천 횡 방향으로 구간에 따라 침식과 퇴적이 교차하기도 하는 2차원 모형의 결과를 이용한 해당 단면의 총량적 개념의 침식 또는 퇴적 여부를 판별하는데 효과적이며, 유사단면모멘트법은 하천의 좌, 우안을 나누는 기준선을 중심으로 좌, 우안의 퇴적 또는 침식 정도를 하나의 척도로 제시하는 것이 가능하였다. 이 방법은 추후 하천의 곡률 등과 연계한 하상변동 예측에 있어서 하나의 영향지표로 이용할 수 있을 것이다. 마지막으로 유사확률분포함수의 경우 한 하천단면에서 모델링을 위해 나눈 각각의 단면 구간에 대해 시간의 변화에 따른 변동 모의 결과를 직관적으로 도시하고, 해

당 구간의 시공간적 변동 특성을 통계적 특성치인 평균과 신뢰구간을 통해 직관적으로 도시하는 것이 가능하였다. 즉, 횡단면의 어느 구간이 얼마만큼 침식 또는 퇴적을 하며, 그 변동성은 어느 정도인가를 하나의 결과 그림을 통해 파악하는 것이 가능하다. 본 연구 결과를 통해 제시된 평가 기법들을 이용하여 하상변동의 분석 목적에 따라 정량적인 평가와 직관적인 도시가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김연수, 장창래, 이기하, 정관수 (2010). "CCHE2D모형을 이용한 급만곡부의 흐름특성 분석." **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제10권, 5호, pp. 125-133.
- 박기두, 이길성, 강원구 (2008). "안양천의 장기하상변동 모의." **제34회 대한토목학회 정기 학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1763-1766.
- 박영진, 조진규, 임장혁 (2007). "중소규모 댐 상류의 SED-2D 모형을 이용한 장기간 유사 거동 모의 연구." **환경관리학회지**, 한국환경관리학회, 제13권, 제4호, pp. 241-248.
- 서일원, 김대근, 이재형 (1995). "GSTARS모형을 이용한 하상변동 해석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제6호, pp. 1679-1687.
- 유권규, 우효섭 (1993). "HEC-6를 이용한 대청댐 하류의 하상변동예측." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제5호, pp. 157-163.
- 윤여승, 안경수 (2007). "하도특성량과 수치모형에 의한 하상변동 예측." **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제9권, 제3호, pp. 51-61.
- 이종석, 차영기, 김이현 (1999). "FLUVIAL-12 모형에 의한 침식성 사행수로의 하상변동 해석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-3호, pp. 275-283.
- 장창래, 정관수, 김재한, 양동운 (2000). "댐건설에 의한 하상변동 예측." **2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, 제3권, pp. 175-178.
- 지운, 여운광, 한승원 (2010). "낙동강하구둑 상류 접근수로에서의 유사량 공식 및 유사 이송형태에 따른 하상변동 수치모의에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제6호, pp. 543-557.
- 최호균, 김원일, 이삼희, 안원식 (2009). "하천 협소부에서 하상 이동성과 형태와의 상관성에 관한 하도수리학적 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제2호, pp. 141-148.

- Acker, P., and White, W.R. (1973). "Sediment transport new approach and analysis." *Journal of Hydraulic Engineering Division*, ASCE, Vol. 99, HY 11, pp. 2041-2060.
- Duan, J.G., and Nanda, S.K. (2006). "Two-dimensional Depth-averaged Model Simulation of Suspended Sediment Concentration Distribution in a Groyne Field." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 327, pp. 426-437.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport to alluvial streams*. Copenhagen, Teknik Vorlag, Copenhagen, Denmark.
- Garbrecht, J., Kuhnle, R.A., and Alonso, C.V. (1995). "A sediment transport capacity formulation for large channel networks." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 50, No. 5, pp. 527-529.
- Nassar, M.A. (2011). "Multi-parametric Sensitivity Analysis of CCHE2D for Channel Flow Simulations in Nile River." *Journal of Hydro-environment Research*, Elsevier, Vol. 5, pp. 187-195.
- Negm, M.A., Abdulaziz, T., Nassar, M., and Fathy, I. (2010). "Predication of Life Time Span of High Aswan Dam Reservoir Using CCHE2D Simulation Model." *Proceeding 14th International Water Technology Conference*, pp. 611-626.
- Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000). "Nonuniform Sediment transport in alluvial river." *Journal of Hydraulic Engineering Research*, IAHR, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434.
- Yang, C.T. (1979). "Unit Stream Power Equation for Total Load." *Journal of Hydrology*, Vol. 40, pp. 123-138.
- Yang, C.T. (1984). "Unit Stream Power Equation for Gravel." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 1783-1797.
- Zeng, W., and Beck, M.B. (2003). "STAND, a Dynamic Model for Sediment Transport and Water Quality." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 277, pp. 125-133.

논문번호: 11-113	접수: 2011.10.13
수정일자: 2011.10.28/11.01	심사완료: 2011.11.01