



Numerical analysis of lateral geomorphology changes by channel bed deposition and bank erosion at the river confluence section

Ji, Un^{a, b} · Jang, Eun Kyung^{a*}

^aHydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 10223, Korea

^bDept. of Construction Environment Engineering, University of Science & Technology

Paper number: 15-105

Received: 28 December 2015; Revised: 8 March 2016 / 11 March 2016; Accepted: 11 March 2016

Abstract

The confluence section of rivers forms complex flow pattern due to inflow discharge variation at the mainstream and tributary. Due to complex flow characteristics, bed change and bank erosion at the local section produce lateral geomorphology changes in rivers. In this study, bankline change by bank erosion and bed change were simulated using CCHE2D of 2-dimensional numerical model for quantitative analysis of lateral changes in the confluence section of South Han River and Geumdang Stream. As a result, bankline at the left-side channel of the mainstream was largely changed in the downstream section of the confluence compared to the upstream section. Also, bank erosion in the tributary was hardly occurred and bankline at the left-side tributary and right-side main stream moved to riverside land due to decreased velocity and deposition.

Keywords: Bank Erosion, Bed Change, CCHE2D, Numerical Modeling, River Confluence

합류부 구간에서의 하상퇴적과 하안침식에 의한 평면적 하도변화 수치모의 연구

지운^{a, b} · 장은경^{a*}

^a한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, ^b과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

요 지

하천의 합류부 구간은 본류와 지류에서 유입되는 유량의 크기가 달라 복잡한 흐름을 형성하게 되며 이러한 흐름으로 인한 국부적인 구간에서의 하상변동 및 하안침식은 하도의 평면적 변화를 야기할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 합류부 구간에서의 평면적 하도변화를 분석하기 위해 남한강과 금당천 합류부 지점을 대상으로 하상 퇴적 및 하안침식에 의한 하안선 이동을 2차원 수치모형인 CCHE2D를 활용하여 모의하였다. 모의결과, 본류의 좌안에서는 합류 전 구간에 비해 합류 후 구간에서의 하안선 이동 현상이 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있었다. 또한 지류에서의 하안침식은 거의 발생하지 않으며, 지류 좌안과 합류 전 본류 우안에서는 유속 저하와 퇴적으로 인해 하안선이 제외지 쪽으로 이동하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 수치모의, 하상변동, 하안침식, 하천 합류부, CCHE2D

1. 서 론

본류와 지류가 만나는 합류부 지점의 경우 하안의 침식과 퇴적이 하상변동과 함께 국부적으로 발생하여 평면적

인 하도 변화가 나타나는 대표적인 구간이다. 합류부에서의 복잡한 흐름 특성은 합류부 하상 및 하안의 지형학적 변화(하도 변화)에 많은 영향을 미치게 되고 합류부 하류 지역으로의 유사공급이 증가하여 하류구간에서 유사퇴적 문제가 발생할 수 있다. 이처럼 합류부 구간의 흐름특성 변화는 하상 및 하안의 지형학적 변화에 영향을 미칠 수 있으며 국부적인 구간에서의 급격한 하상변동은 하도

*Corresponding Author.

E-mail: silveryeun@gmail.com (E. K. Jang)

의 안정을 위협하는 문제를 야기할 수 있다(Ji and Jang, 2014).

합류부 구간의 하도변화에 관한 연구로는 Roy et al. (1988)이 현장조사를 통해 합류부 구간의 지형 변화를 연구한 바 있으며, 지류의 곡률 변화가 합류부 형상에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 것으로 제시하였다. 또한 Leite Ribeiro (2011)는 합류각이 90도이고 5 mm 이상의 자갈로 구성된 합류부에서의 지형변화를 수리실험을 통해 분석하였으며, 분석 결과 본류와 지류의 유량비가 클수록 합류부에서의 퇴적이 큰 것으로 나타났다. Roca et al. (2009)은 FESWMS-2DH (Finite-element surface-water modeling system for two-dimensional flow in the horizontal plane) 모형을 활용하여 집중호우 사상에 대해 합류부 구간에서의 흐름 특성을 연구하였으며, 조도 계수와 유량은 수위 변화에 영향을 미치는 변수이지만 본류와 지류의 유량비 보다는 영향이 적은 것으로 나타났다. 이러한 수치모형을 이용한 합류부 구간 연구의 경우 합류부 하상에서의 흐름 및 하상변화에 대한 일정한 패턴을 도출하기 위해 하폭의 변화 및 하안선의 경계를 고정시키고 분석하는 경우가 많다. 그러나 하상과 하안의 변화는 각각 독립적인 것이 아니며 하상의 지속적인 변화는 하안의 침식과 퇴적에 영향을 미치고 이는 하폭이나 흐름의 변화를 초래하여 결국 하상변동에 다시 영향을 미치게 된다 (Kwon, 2012). 특히 하안침식으로 인한 하폭의 확대는 하천변을 따라 설치된 하천시설물을 포함하여 하천변과 근접한 주거 시설의 안전을 위협할 수 있는 요인이다. 따라서 하안의 침식과 퇴적에 의해 변화되는 하안선의 이동을 정량적으로 분석하여 하천관리에 적극 활용할 필요가 있다.

하안침식에 대한 연구는 하안침식이 발생하는데 영향을 미치는 요소에 대한 연구(Wolman, 1959)를 비롯하여 Klaassen and Masselink (1992)는 하도의 지형학적 특성이 하안침식에 영향을 미치는 주된 요소라고 제시한 바 있다. Thorne (1982), Lawler et al. (1999), Yumoto et al. (2006)은 하안침식 과정이 Fluvial Entrainment, Bank Failure, Weakening of the Bank Face의 3가지 지형학적 변화로 나타난다고 제시하였다. Duan et al. (2001)은 CCHE2D (Center for Computational Hydroscience and Engineering 2-Dimension) 모형을 이용하여 총적하천의 변화 과정을 모의하고 실제 수리모형 실험 결과값과 비교를 통해 모형 검증용 실시하였으며, 하안침식 모의 결과와 하폭 확대 및 축소, 사행 진행 현상이 실제 실험값과 거의 일치하는 결과를 제시한 바 있다. Lai et al. (2012)은 2차원 하상변동 모의가 가능한 SRH-2D (Sedimentation and River

Hydraulics - Two-Dimensional model) 모형과 BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) 모형의 연계를 통해 Mississippi 강의 지류에서 발생하는 하안침식을 모의하였으며, 침투 과정과 균열, 불확실한 지하수위로 인한 오류의 개선 필요성을 강조하였다. Nagata et al. (2000)은 하안침식을 포함한 하도 변화 예측 모형 개발을 위해 하안붕괴 방정식을 분석한 후 모형의 정확도를 수리실험을 통해 검증하였으며, 사주의 이동속도 및 유사 농도, 하안침식 위치 등을 고려했을 때 개발된 모형의 정확도가 비교적 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이와 같은 기존의 연구결과를 고려하여 하안의 침식과 하상변동이 상호작용하여 하천의 지형학적 변화를 야기할 것으로 예상되는 합류부 구간에 대해 2차원 수치모형인 CCHE2D를 활용하여 하상퇴적과 하안침식에 의한 하폭 변화 및 하안선의 이동에 대한 분석을 수행하고자 한다. 본 연구의 대상 구간은 4대강 살리기 사업 후 금당천 지류 방향 두부침식 현상으로 인해 하상유지공 유실 및 하안침식 문제가 발생하고 있는 남한강과 금당천 합류부 구간이며, 궁극적으로는 합류부 지점에서의 평면적 지형변화를 실제 현상과 유사하게 재현할 수 있는 수치모의 활용방법에 대해 검토하고자 한다.

2. 대상 구간 및 수치모의 조건

2.1 대상구간의 개요

남한강은 강원도 삼척시 대덕산에서 발원하여 충청북도 동북부와 경기도 남부를 흘러 북한강과 합류하여 한강으로 흘러드는 하천이며, 유로연장 375 km, 유역면적은 12,577 km²에 이른다(Doopedia). 금당천은 강원도 평창군에서 발원하여 남한강과 합류하는 소하천이며 유로연장은 1 km, 유역면적은 0.4 km²이다. 합류부 구간의 본류와 지류가 이루는 합류각은 약 110°이며, 남한강 본류의 하상경사는 0.0006, 금당천의 하상경사는 0.0028로 남한강이 금당천에 비해 완만하다. 남한강 합류부 구간은 4대강 살리기 사업 후 합류부 지점에서의 하상저하 현상이 지류 하천 상류 방향으로 전이되는 두부침식 현상이 발생한 지점이며 이로 인해 하상유지공 유실 문제가 발생하였다(The Kyunghyang Shinmun, 2011). 이와 같은 하상저하 현상은 저수로 하폭 및 하안의 경사를 변화시켜 하안붕괴 위험성이 커지므로 궁극적으로 하안침식의 위험성이 높을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 금당천과 남한강 합류 구간(Fig. 1)을 대상구간으로 선정

하고 하상의 퇴적과 하안침식에 의한 하안선의 이동 및 하폭 변화에 대한 2차원 하안침식 수치모의를 수행하였다.

2.2 하안침식 모의를 위한 CCHE2D 모형의 개요

하천에서의 흐름과 하상변동을 예측하기 위해 주로 활용되는 수치모형은 일반적으로 상당히 긴 구간의 종단적인 하상변동을 예측하는 1차원 수치모형(HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), GSTARS (Generalized Stream Tube computer models for Alluvial River Simulation) 등)과 국부적인 평면적 하상변동을 예측하는 2차원 수치모형(River2D, SED2D 등) 등이 있다. 지금까지는 이러한 수치모형을 이용하여 하상에서 발생하는 침식과 퇴적의 양상을 파악할 수 있었으나 하안침식 등을 고려한 하안선의 이동 또는 하도의 평면적 변화를 모의하는 데는 한계가 있었다. 그러나 하안과 하상이 접하는 부분에서 하상의 침식이 지속적으로 발생하게 되면 하안의 안식각이 증가하고 하안이 붕괴되어 급격한 하도 변화가 발생할 수 있다. 본 연구의 대상구간과 같이 지류에서의 지속적인 하상저하로 인해 하안침식의 위험성이 있으며 본류와 지류하천이 만나는 합류부에서의 급격한 흐름 변화로 인해 발생할 수 있는 하폭변화를 분석하기 위해서는 하상변동 모의와 함께 하안에서의 침식과 퇴적을 고려한 하도의 평면적 변화를 분석할 필요가 있다.

하안침식 변화 분석이 가능한 수치모형으로는 CCHE2D, BSTEM, SRH-2D 모형 등이 있으며 본 연구에서는 CCHE2D 모형을 수치모형으로 선정하였다. 이 모형은 특히 하상변동 모의시 하상도 입도분포 입력이 가능하며, 유사이송 형태는 소류사와 부유사, 총유사 이송 형태에 대해서 각각 모의가 가능하고, 유사량 공식을 Ackers and White (1973), Engelund and Hansen (1967), Wu et al. (2000), SEDTRA Module (Garbrecht et al., 1995) 중 하나를 선택할 수 있는 장점이 있다. CCHE2D 모형은 하천의

흐름 특성과 하상변동을 파악하기 위해 Mississippi 대학의 NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering)에서 개발한 2차원 수치모형(Jia et al., 2001; Wu, 2001)으로 모의구간에 대한 지형을 구축하는 CCHE2D MESH Generator 프로그램과 구축한 지형과 계산에 필요한 입력조건을 이용하여 계산 및 결과를 보여주는 CCHE_GUI 프로그램으로 구성되어 있다. CCHE2D 모형은 흐름에 대한 연속방정식 외에 개수로 흐름이 천이류 흐름이라고 가정하고 수심 적분된 2차원 난류 흐름에 대한 천수방정식을 지배방정식으로 채택하고 있으며, 유사모의는 수심 적분된 2차원 이송-확산방정식 및 유사이송방정식을 적용한다(Jia et al., 2001; Wu, 2001).

CCHE2D 모형의 하안침식 모의에 대한 내용은 Duan et al. (2001), Jia et al. (2001), Wu (2001) 등의 문헌을 참고할 수 있다. 하안침식은 유수에 의해 하안에 미치는 힘이 임계 전단 응력보다 커질 때 발생한다. 따라서 하안 근처에서의 연직 방향 운동량 방정식을 분석하면 하안에 가해지는 전단 응력을 산정할 수 있으며 임계 전단 응력을 초과하면 하안을 구성하는 물질들이 침식된다. 또한 상류에서 침식된 하안 유사 공급이 이루어지면서 하안 근처에 퇴적물이 쌓이고 하안의 전진(제외지 방향으로 이동)이 발생한다. 반면, 하안이 침식된 지점의 경우 하안 후퇴(제내지 방향으로 이동)가 일어나며 침식된 유사는 유수에 의해 이동된다. 하안의 전진과 후퇴는 하안 근처에서의 유사 유입량의 균형에 따라 좌우된다. 특히 만곡부의 경우 내측 하안의 하류에서는 종방향 유사이송률이 감소되는 이유뿐만 아니라 이차류에 의해 이송된 유사도 이곳에 퇴적되기 때문에 하류방향으로 하안이 전진하게 된다. 또한 하안 밑단에서의 기저 침식이 하안 상부를 불안정하게 만든다는 것도 하안 파괴의 기본 메커니즘 중의 하나이다.



Fig. 1. Study reach of the river confluence of south Han River and Geumdang Stream (Daum map)

2.3 수치모의 입력 조건

수치모의를 위한 지형자료는 4대강 살리기 사업 완료 후 측량된 지형자료를 활용하였으며, 지도상의 등고선을 고려하여 요소망의 각 절점에서 선형 보간하여 지형을 구축하였다. 선형 보간은 CCHE2D 상에서 사용할 수 있는 보간 기법들 중 모형의 매뉴얼 상에서 추천하는 Structured 기법을 적용하였다. 모형의 mesh 격자는 모형의 구동 시간과 안정적 수치 계산을 고려하여 20 m 간격으로 구성하였고, mesh 개수는 본류 2,250개, 지류 1,050개, 총 3,300개이다. 구축된 지형의 본류 총 하도 길이는 2.8 km이며, 하폭은 273 m이고, 지류는 하도 길이 0.9 km, 하폭은 93 m이다. 난류 모형 조건으로는 Parabolic Eddy Viscosity Model을 사용하였고 수치해석 기법 중 Wall Slipness Coefficient는 0.5, 그리고 마름상태의 지형이 많은 경우 오류가 발생함을 감안하여 마름상태 지형의 허용 기준수위는 0.04 m를 적용하였다. 모의시간 간격은 60초 간격(1,440회/day)을 적용하였으며, 유입유수량 또한 60초 간격으로 유입되게 설정하였다. 흐름과 하상변동 모의는 비연계 방법(uncoupled method)의 준정류(quasi-steady) 조건으로 수행하였으며 1일 동안의 하상변동을 계산한 후 하상고를 새롭게 변화한 다음 시간간격의 흐름계산에 반영하였다.

흐름 모의 조건은 Ji et al. (2014)의 동일한 대상구간에서의 하상 침식 및 퇴적 모의 자료를 참고하여 결정하였다. Ji et al. (2014)은 남한강과 금당천 합류부 구간에 대해 지류에서 유입되는 유량(Q_t)이 없는 조건(CASE A)과 본류와 지류 각각의 유역 면적비를 고려하여 지류 유입유량이 본류 유입유량(Q_m)의 1/10에 해당하는 조건(CASE B), 본류 유입유량의 단위 폭 당 유량을 지류의 하폭에 고려한(지류 유입유량이 본류 유입유량의 1/3에 해당) 조건(CASE C)으로 구분하여 흐름 및 하상변동 모의를 수행하였다. CASE A 모의결과(Fig. 2(a))에서는 합류 후 본류에서는 최심하상고를 따라 주하도에서 하상저하가 발생하였으며, CASE B 모의결과(Fig. 2(b))에서는 지류에서는 흐름 집중현상으로 인해 마름영역이 확대되고 주흐름 하도에서 침식이 발생하였으며 본류와 지류가 만나는 구간에서는 퇴적현상이 발생하였다. 또한 CASE C 모의결과(Fig. 2(c))에서는 지류에서 침식된 유사가 합류 구간에 퇴적되는 현상이 더 두드러졌으며 이로 인한 본류 좌안쪽의 하도로 흐름이 집중 되어 본류 좌안쪽의 주수로 하상고가 저하되고 이와 더불어 하안침식 가능성이 예상되었다. 따라서 본 연구에서는 하안침식 가능성이 높은 것으로 예상되는 Ji et al. (2014)의 CASE C의 조건을 동일하게 적용하여 하안침식 모의를 수행하였다.

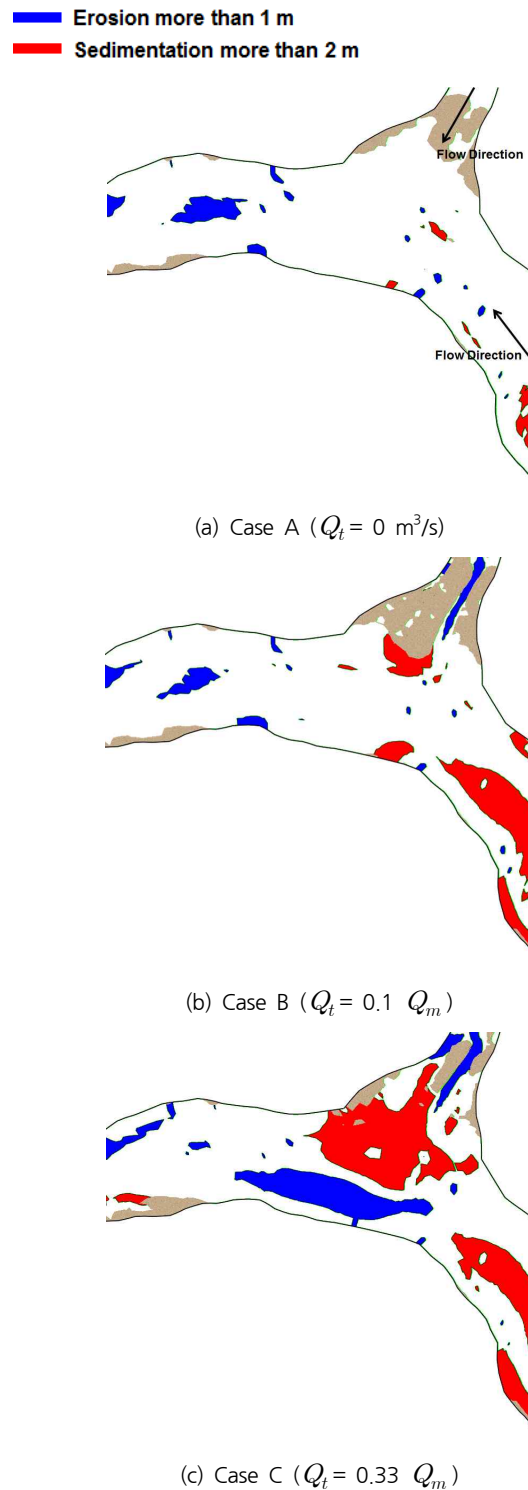


Fig. 2. Analysis of bed change patterns at the confluence section(Ji et al., 2014)

CASE C 모의 조건의 경우 4대강 사업 후 해당구간에서 발생한 가장 큰 홍수 사상인 Fig. 3과 같이 2013년 7월

20일부터 29일에 발생한 유량조건(최대 유량: 2,447.5 m^3/s)을 본류에서 유입되는 유입유량으로 선정하였고, 지류에서 유입되는 유량에 대한 실측자료는 없기 때문에 본류 유입유량의 단위 폭 당 유량을 지류의 하쪽에 고려한 유량이 유입된다고 가정한 조건으로 모의를 수행하였다 (Table 1). 모의구간의 하상토 대표입경은 1.08 mm (Minister of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), 2009)이며, 비중은 2.675를 적용하였다. 유입 유수량 계산을 위한 유량-유수량 관계식은 합류부 구간에서 약 9.3 km 떨어진 청미천 원부교 지점의 현재까지 구축된 데이터 중 가장 최근의 자료(Fig. 4)를 사용하였고, 유사이송 형태와 공식은 총유수량 조건(Wu et al. (2000) 공식)을 선택하였다. 하안침식 모의에 필요한 입력자료로 하안의 높이는 0.5 m, 하안의 사면경사는 10°, 한계전단응력은 1.047 Pa, 하안을 이루고 있는 재료의 비중은 23,600 N/m^3 을 사용하였다(MLIT, 2009).

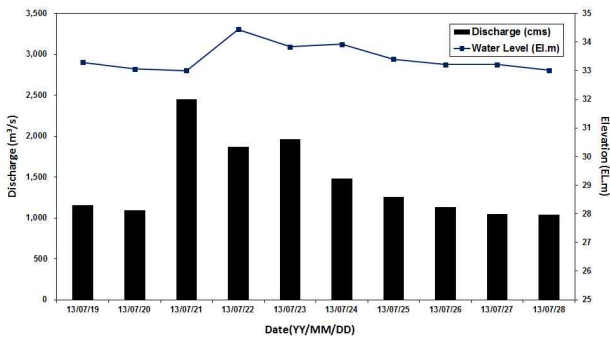


Fig. 3. Discharge at the Uman station and water surface level at the Yeosu station

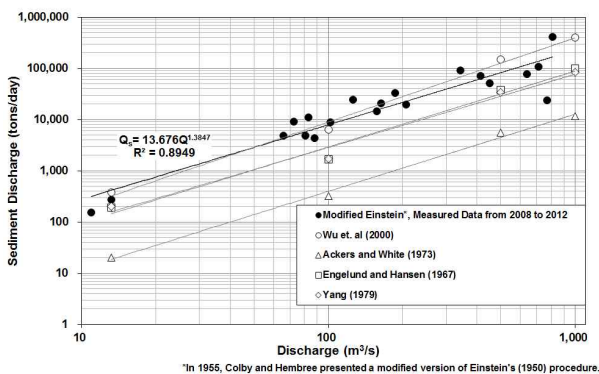


Fig. 4. Sediment discharge data of the Wonbu station in Cheongmi stream (MLIT, 2012)

Table 1. Simulation conditions of flow discharge and incoming sediment discharge

Date (YY-MM-DD)	Q(m^3/s)		Q _s (tons/day)	
	Main Stream	Tributary Stream	Main Stream	Tributary Stream
13-07-20	1158.3	361.97	239018.8	47748.47
13-07-21	1092.41	341.38	220400.1	44029.03
13-07-22	2447.5	764.85	673478	134539.8
13-07-23	1871.13	584.74	464345.7	92761.73
13-07-24	1962.26	613.21	495951.4	99075.55
13-07-25	1479.75	462.43	335520.4	67026.46
13-07-26	1254.26	391.96	266867.9	53311.85
13-07-27	1134.12	354.42	232137.6	46373.81
13-07-28	1050.37	328.25	208742.9	41700.3
13-07-29	1037.76	324.30	205280.9	41008.69

2.4 수치모의 조건 선정 및 모형의 보정

CCHE2D 모형을 이용하여 하안침식을 모의할 경우 좌안과 우안을 동시에 침식이 가능한 경계선으로 설정할 수 없는 모형의 한계가 있기 때문에 본 과제에서는 합류부의 세 가지 하안선을 독립적인 모의 조건으로 구분하고 각각의 시간에 따른 하안 침식에 의한 하안선의 이동을 모의하였다. 본 연구에서는 본류의 좌안(CASE 1), 지류의 우안과 합류 후 본류 우안(CASE 2), 합류전 본류의 우안과 지류의 좌안(CASE 3)이 각각 침식 가능한 경계인 것으로 구분하여 총 3가지 조건(Fig. 1)에 대해 모의를 수행하였다.

수치모의를 위한 흐름 보정은 조도계수를 변화시켜가며 관측수위자료와 비교하며 보정하였으며 유사이송 및 하상변동 모의에 대한 모형 보정은 대상하천 구간에서 일정 기간 간격으로 하상변화를 측량한 자료가 부재하기 때문에 관측유수량 자료를 활용하여 가장 유사한 값을 도출하는 유사이송공식을 선택하였다. 흐름모의 보정의 경우, 본 연구의 2차원 모의 구간 내에는 실측 수위자료가 없기 때문에 대상구간 밖에 존재하는 실제 수위관측소와 대상구간을 포함하는 상당히 긴 하도 구간에 대해 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) 1차원 모형을 구축한 후 조도계수를 산정하였으며, 대상구간 근처의 수위관측소가 상류 우만지점과 하류 여주지점으로 두 지점을 모형보정에 활용하였다. 하류단 여주수위표의 수위를 기준으로 반복적인 HEC-RAS 1차원 모의를 수행한 후 보정된 모형의 조도계수 값을 2차원 CCHE2D 모형에 적용하여 검토하였다. 보정 결과, 1차원 수치모의에서 수위 33.07 El.m 일 때 유속 0.96 m/s, 2차원 수치모형 모의 결과에서 수위 33.09 El.m 일 때 유속 1.01 m/s인 것으로 나타나 최종 적용 조도계수를 0.027로 선정하였다. 이는 한강하천정비기본

계획(MLIT, 2009)에서 사용한 조도계수 값과 동일한 값이다. 또한 유사이송에 대한 모형 보정의 경우, 유사이송공식 선정을 위해 관측유사량 자료를 기존의 경험적 유사이송공식들과 비교(Fig. 4)하여 유사이송량의 실측치와 가장 유사한 값을 제시하는 Wu et al. (2000) 공식을 하상변동 모의에 적용하였다.

3. 하안침식과 퇴적에 따른 하안선 이동 모의 분석

본 논문에서 활용한 본류 유입유량 조건인 2013년 7월 홍수사상으로 인해 대상구간 내 저수로 폭을 넘는 유량이 발생하였으며 따라서 수치모의 시 좌안과 우안의 홍수터틀 포함한 제방까지 격자로 구성하여 수치모의를 수행하였다. 본 장의 Fig. 5에서 Fig. 7에 제시된 결과는 시간적 변화 과정이 반영된 결과이나 시간적 변화 과정이 크게 나타나지 않아 최종 하폭 변화량만을 수치로 제시하였다. 하안선 이동 분석을 위한 CASE 1의 모의 결과(Fig. 5), 합류지점 본류 좌안은 하안침식에 의해 평균 5 m 정도의 하안선 이동이 발생하였다. 최대 하폭변화가 발생한 지점에서는 원하상 하폭이 214.8 m에서 7.9 m 확대된 222.7 m인 것으로 나타났으며, 이는 초기 하폭에 비해 약 3.7% 확대되는 것으로 나타났다. 또한 합류 전 구간에 비해 합류 후 구간에서의 하안선 이동 현상이 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있었다.

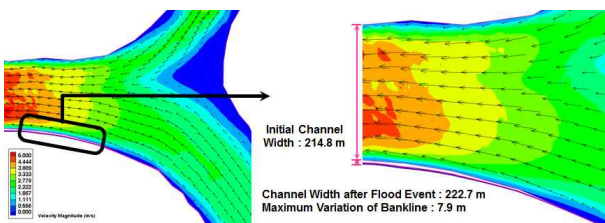


Fig. 5. Bankline change simulation of Case 1

지류의 우안과 합류 후 본류 우안에서의 하안선 이동 분석을 위한 CASE 2의 모의 결과(Fig. 6), 지류에서의 하안침식은 거의 발생하지 않으며, 합류 후 구간에서 최대 하폭 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 최대 하폭 변화가 발생한 구간에서는 원하상 하폭 264 m에서 홍수 후 3.9 m 확대된 267.9 m로 나타났다. 또한 하폭이 상대적으로 좁은 지점에서는 홍수 이후 원하상 하폭 210.7 m에서 3.6 m 확대된 214.3 m가 되는 것으로 나타났으며, CASE 1의 본류 좌안을 모의했을 경우보다는 하안침식으로 인한

하안선 이동이 작은 것을 알 수 있었다.

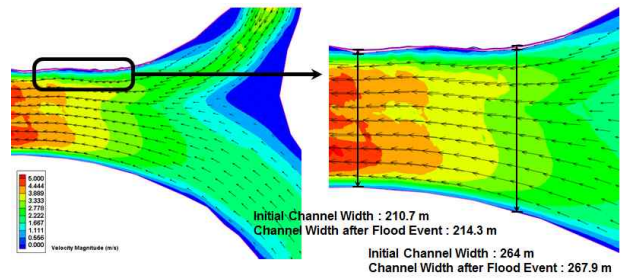


Fig. 6. Bankline change simulation of Case 2

합류전 본류의 우안과 지류 좌안에서의 하안선 변화 분석을 위한 CASE 3의 모의 결과(Fig. 7), 합류 전 우안과 지류 좌안 모두 하안침식이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 합류부 일부 구간에서 CASE 1과 2와는 반대로 오히려 하안퇴적에 의해 하폭이 축소되는 것을 확인하였으며 최대 축소 폭은 0.47 m인 것으로 나타났다. 이는 하안 근처 유속이 매우 느리고, 지류의 초기 지형 형태도 좌안의 초기 하상고가 높아 지류 우안으로 흐름이 집중되도록 형성되어 있어 이러한 초기 지형의 영향이 반영된 결과로 해석할 수 있다.

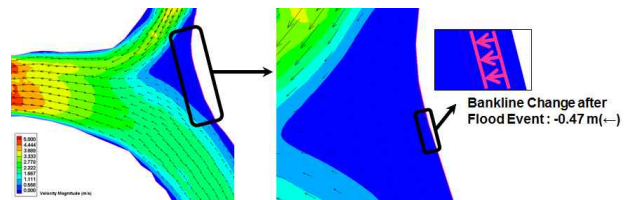


Fig. 7. Bankline change simulation of Case 3

CASE 3과 같이 홍수 후 하안 경계에서의 유사퇴적이 발생하여 하폭 축소가 나타나는 구간에서의 정량적인 분석을 위해 저유속 및 마름영역에 대한 추가 분석이 필요하다. Fig. 8은 CASE 3의 하폭 축소가 나타나는 구간에 대해 저유속 및 마름영역에 대해 분석한 결과이며, 홍수 발생 직후(1시간 후) 0.1 m/s 이하의 저유속 구간이 합류 구간에서 나타나는 것을 확인했으며 홍수가 끝난 후에는 유사퇴적으로 인해 이 구간 대부분의 영역이 마름구간이 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 하안퇴적에 의한 하폭 축소가 나타나는 지점에 대해서는 홍수전후 하상변동을 고려한 저유속 및 마름영역 분석을 추가로 수행함으로써 보다 구체적인 하안선 이동 추이를 파악할 수 있다.

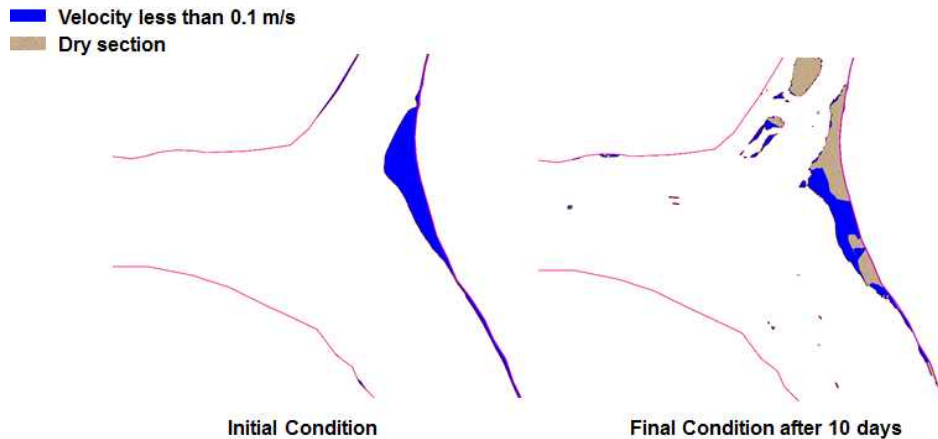


Fig. 8. Analysis of dry area and low velocity section at the confluence

4. 결론

본 연구에서는 남한강과 금당천 합류부 구간을 대상으로 하상의 퇴적과 하안의 침식에 의한 하안선 이동 변화 및 하폭 변화를 2차원 수치모의를 통해 분석하였다. 분석 결과, 남한강-금당천 합류부의 경우 지류와 만나는 본류 구간의 좌안에 위치하는 하안에서 하안침식으로 인한 하폭변화가 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이 구간은 하안선의 경계를 고정하고 하상변동 2차원 수치모의 수행한 사전 결과에서 지속적인 하상침식이 나타나 하안침식의 가능성을 간접적으로 제시한 구간과 동일한 지점이었다. 또한 지류 유입 구간에서 흐름이 우안 쪽으로 집중되는 현상 때문에 지류 좌안에서는 퇴적이 발생하여 하안선이 제외지 방향으로 이동하는 것을 수치모의를 통해 확인할 수 있었다. 이러한 합류부 하도 구간에서의 하안 근처의 퇴적과 하안침식 여부에 대한 수치모의 결과는 적절한 하도안정화 대책과 방법을 실제 하도 구간에 대해 제시하고 적용하는데 적극 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

Ackers, P., and White, W.R. (1973). "Sediment transport: New

approach and analysis" *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 11, pp. 2041-2060.

Daum Map. <http://map.daum.net/>

Doopedia. <http://www.doopedia.co.kr/>

Duan, J.G., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2001). "The applications of the enhanced CCHE2D model to study the alluvial channel migration processes" *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 469-480.

Engelund, F.A., and Hansen, E. (1967). Monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag.

Garbrecht, J., Kuhnle, R.A., and Alonso, C.V. (1995). "A sediment transport formulation for large channel networks", *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 50, No. 5, pp. 517-579.

Ji, U., and Jang, E.K. (2014). "Numerical Analysis of Flow and Bed Changes due to Tributary Inflow Variation at the Confluence of the Namhan River and the Geumdang Stream", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 1027-1037.

Jia, Y., and Wang, S.S.Y. (2001). *CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed*. NCCHE-TR-2001-1, School of Engineering The University of Mississippi, USA.

Klaassen, G.J., and Masselink, G. (1992). "Planform changes of a braided river with fine sand as bed and bank material." *5th Int. Symp. on River Sedimentation*, Karlsruhe, FRG, pp. 13.

Kwon, Y.S. (2012). *Numerical analysis on Bed Changes Considering Variation of Channel Width and Bank Erosion*, M.S. Thesis, Myoungji University, Yongin, Korea.

Lai, Y.G., Thomas, R.E., Ozeren, Y., Simon, A., Greimann, B.P., and Wu, K. (2012). "Coupling a two-dimensional model with a deterministic bank stability model." *ASCE World Environmental & Water Resources Congress.*, ASCE 2012, pp. 1290-1300.

Lawler, D.M., Grove, J.R., Couperthwaite, J.S., and Leeks, G.J.L. (1999). "Downstream change in river bank erosion rates in

- the Swale-Ouse system, northern England." *Hydrological Processes*, Vol. 13, No. 7, pp. 977-992.
- Leite Riveiro, M. (2011). *Influence of tributary widening on confluence morphodynamics*. Ph. D. dissertation, Ecole polytechnique federale de Lausanne, France.
- Midgley, T.L., Fox, G.A., and Heeren, D.M. (2012). "Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks." *Geomorphology*, Vol. 145, No. 146, pp. 107-114.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2009). *Basic plan for river maintenance of han river*. Minister of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2012). *International hydrological programme report*, Minister of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- The Kyunghyang Shinmun [Seoul] (2011). Head cutting of geumdang stream, because 4-river project not flood. August 12.
- Thorne, C.R. (1982). *Process and mechanisms of river bank erosion*. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C., Thorne, C.R. Eds., *Gravel-Bed Rivers*. Wiley, Chichester, England, pp. 227-271.
- Wolman, M.G. (1959). "Factors influencing erosion of a cohesive river bank." *American Journal of Science*, Vol. 257, No. 3, pp. 204-216.
- Wu, W. (2001). *CCHE2D sediment transport model(version 2.1)*, NCCHE-TR-2001-3, School of Engineering The University of Mississippi, USA.
- Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000). "Nonuniform sediment transport in alluvial river." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434.
- Yumoto, M., Ogata, T., Matsuoka, N., and Matsumoto, E. (2006). "Riverbank freeze-thaw erosion along a small mountain stream, Nikko volcanic area, central Japan." *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 17, No. 4, pp. 325-339.