

국내 지방하천의 유사량과 하상변동 특성에 관한 연구

A Study of Sediment Discharge and Bed Change Characteristics of the Local Rivers in Korea

손 호 근¹⁾ · 이 정 식[†] · 신 사 철²⁾ · 문 창 건³⁾

Hogeun Son · Jungsik Lee · Shachul Shin · Changgeon Moon

Received: February 20th, 2014; Revised: March 19th, 2014; Accepted: April 7th, 2014

ABSTRACT : The objective of this study is to suggest the proper sediment transport equation and short and long-term bed change for planning and implementing the river management in Korea. To analyze total sediment discharge and short and long-term bed change, existing sediment transport equations, HEC-RAS 4.1 and CCHE2D numerical models were applied in urban and mountainous rivers. The results of this study are as followings; Firstly, the modified Einstein equation showed the most appropriate result for the estimation of total sediment discharge in the local rivers. Secondly, The stage-discharge relation curve and the discharge-total sediment discharge relation curve were suggested to examine the characteristics of river bed change. Finally, it is founded that river bed change of mountainous river has occurred greater than that of the urban river, and the river bed of urban river now tends to be stabilized on the whole.

Keywords : Total sediment discharge, Short and long-term bed change, Discharge-total sediment discharge relation curve

요 지 : 본 연구는 하천 계획수립 및 활용을 위하여 국내 하천을 대상으로 적합한 유사량 추정공식과 장·단기 하상변동을 정량적으로 제시한다. 산지 및 도시하천을 대상으로 유사특성을 분석하고, 총유사량 과 장·단기 하상변동을 검토하기 위하여 기존의 유사량 추정공식과 HEC-RAS 4.1 모형 및 CCHE2D 모형을 적용하였다. 본 연구의 수행으로 인해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 수정 Einstein 공식을 적용하여 추정된 총유사량이 해당 하천에 가장 적합한 것으로 판단되었다. 둘째, 대상하천의 중·장기적인 하도관리를 위하여 수위-유량 관계곡선, 부유사량-유량 관계곡선과 총유사량-유량 관계곡선을 제시하였다. 셋째, 단기하상 변동 분석에서는 산지하천이 도시하천보다 하상변동이 크게 발생하였으며, 장기하상 분석에서 도시하천은 현재 안정하상에 도달한 것으로 나타났다.

주요어 : 총유사량, 장·단기 하상변동, 유량-총유사량 관계곡선

1. 서 론

하천의 중·장기적인 계획수립 및 활용 면에서 유역에 유입되는 유량 및 유사량의 변화를 정량적으로 파악하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 하천형태의 변화는 하상을 구성하고 있는 입자들의 움직임에 의해 좌우되며, 입자들이 흐름을 통하여 침식되거나 퇴적되기 때문에 발생하게 된다. 국내의 경우 대부분의 하천이 충적하천 유역으로부터 유입되는 유사로 인하여 다양한 문제가 발생하고 있지만, 이와 관련된 연구는 미흡한 상태이다. 특히 하천의 하상변동 예측에서 유사량은 가장 중요한 변수이므로 유사량의 정량적인 파악은 하천계획과 관리에 필수 요소라 할 수 있다. 실제 실무에서 직접 실측하는 방법이 가장 좋은 방법

이지만 인력과 비용 등의 문제로 기존의 유사량 추정공식을 통해 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 기존의 경험공식들은 방법에 따라 편차가 크고 대부분 해외 하천의 특성을 기초로 만들어진 것이기 때문에 우리나라에 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서 하천별로 적합한 유사량 추정공식의 선정과 실제 측정된 유사량을 사용한 신뢰성 있는 단기 및 장기하상변동예측이 필요한 실정이다.

하천에서의 유사량 산정방법에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 유사량 산정방법은 대표적으로 유사량 공식을 이용하는 간접적인 방법과 실측자료를 통한 직접적인 방법으로 나눌 수 있다. 간접적인 방법은 충적하천에서 총유사량을 산정하는 방법인 Einstein 공식과 Toffaleti 공식(Toffaleti, 1968), 소류력을 도입한 Engelund와 Hansen 공식들이 있으

1) School of Civil & Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

† School of Civil & Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology (Corresponding Author : jungsik@kumoh.ac.kr)

2) Department of Civil Engineering, Andong National University

3) School of Civil & Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

며, 직접적인 방법은 소류사량과 부유사량을 별도로 구하여 총유사량을 산정한 식으로는 실측한 부유사량으로부터 총유사량을 산정하는 수정 Einstein 공식을 들 수 있다. 국내에서는 Korea Institute of Construction Technology(1989)에서 유사량 산정공식을 소개하고 각 공식의 특성과 적용의 한계를 설명하였으며, 최근에는 Maeng et al.(2012)이 산지하천을 대상으로, Jang & Lee(2011)가 도시하천을 대상으로 실측자료를 이용하여 유사량 산정공식을 제시하였다.

하상변동에 관한 대표적인 1차원 모형은 미국 공병단에서 개발한 준정상류 모형인 HEC-6 모형, 2차원 모형으로는 미국 미시시피 대학 NCCHE(National Center for Computational Hydroscience and Engineering)가 개발한 CCHE2D 모형이 있다. 1차원 모형은 장기간 하상변동, 2차원 모형은 주로 단기간 하상변동 분석을 위하여 적용하고 있다. Korea Institute of Construction Technology(1991)에서는 HEC-6 모형을 사용하여 국내 하천의 장기적인 하상변동 효과를 예측하였으며, Jang et al.(2010)은 형성담 건설에 의한 하상변동을 예측하였다. 2차원 모형의 적용으로는 Kim et al.(2010)이 CCHE2D 모형을 이용하여 합류부에서의 흐름과 하상변동 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 국내의 지방하천을 대상으로 적합한 유사량 추정공식과 장·단기 하상변동을 정량적으로 제시하고자 한다. 이를 위하여 산지 및 도시하천을 대상으로 유사특성을 분석하고, Lee et al.(2009)이 개발한 유사량 산정시스템을 이용하여 총유사량을 산정한다. 또한 HEC-6 모형을 탑재한 HEC-RAS 4.1 모형과 2차원 모형인 CCHE2D 모형을 적용하여 장·단기 하상변동을 모의한다.

본 연구의 수행으로 향후 산지 및 도시하천의 정비에 따른 하도관리 및 보운영 등에 영향을 미치는 유입·유사량 및 하상토의 분석에 따라 준설하도 및 수공구조물을 유지·관리하는데 합리적인 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 기본이론

2.1 유사량 산정공식

하천에서의 유사량을 산정하기 위해 많은 공식들이 개발되었으며, 공식들의 계산결과는 실측자료 및 공식들 간에 큰 차이가 발생하고 있을 뿐만 아니라 하천특성에 따라 크게 변화하고 있어 실제 적용에 있어서는 신중함을 요구하고 있다. 본 연구에서는 국내 하천의 유사량 산정공식으로 널리 알려진 Engelund와 Hansen 공식, Ranga Raju 공식,

Shen과 Hung 공식, Yang 공식과 수정 Einstein 공식 등을 적용하여 유사량을 산정하였다(Korea Institute of Construction Technology, 1989).

2.1.1 Engelund와 Hansen 공식

Engelund와 Hansen은 에너지 개념에 바탕을 두고 흐름 저항식과 관련하여 Eq. (1)과 같은 유사량 공식을 제안하였다.

$$f_e \Phi_e = 0.1 \tau_*'^{5/2} \quad (1)$$

여기서 τ_* 는 무차원 소류력이며, f_e 와 Φ_e 는 각각 마찰계수, 무차원 유사량으로 Eq. (2)와 Eq. (3)과 같다.

$$f_e = 2g dS / V^2 \quad (2)$$

$$\Phi_e = \frac{q_t}{\gamma_s \sqrt{(s-1)g D^3}} \quad (3)$$

여기서 g 는 중력가속도, d 는 평균깊이, S 는 에너지경사, V 는 유속, q_t 는 단위폭당 중량으로 표시되는 유사량, γ_s 는 유사단위중량, s 는 유사비중, D 는 유사입경이며, Engelund와 Hansen은 침강입자의 중앙입경 D_{50} 을 사용하였다. Eq. (2)와 Eq. (3)을 Eq. (1)에 대입하여 정리하면 유사량 q_t 는 Eq. (4)와 같다.

$$q_t = 0.05 \gamma_s V^2 \frac{(dS)^{3/2}}{D_{50} \sqrt{g(s-1)^2}} \quad (4)$$

2.1.2 Ranga Raju 공식

Ranga Raju 등은 무차원 유사량 Φ 와 무차원 소류력 τ_*' 를 Eq. (5)와 Eq. (6)과 같이 제시하였다.

$$\Phi = \frac{q_t}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{1}{g D^3} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_*' = \frac{\tau_0'}{(\gamma_s - \gamma) D} \quad (6)$$

여기서 q_t 는 단위 소류사량, γ 는 물의 단위중량, γ_s 는 유사단위중량, g 는 중력가속도, D 는 평균깊이, τ_0' 는 하상에서의 평균사립 소류력이다.

2.1.3 Shen과 Hung 공식

유사운송과정은 매우 복잡한 현상으로, 모든 물리적 변수들의 고려가 불가능하여 주요 수리 및 하상토변수에 대한 간단한 회귀식과 같은 실용적인 방법이 제시되었다. Shen과 Hung은 모래 입자 범위 내의 시료실험을 통하여 Eq. (7), Eq. (8)과 같은 회귀식을 제안하였으며, 독립변수는 유사입자의 침강속도, 유속, 수심, 에너지경사이며 종속변수로 유사농도를 선택하였다.

$$\log C_t = -107,404.45938164 + 324,214.74734085 Y - 326,309.58908739 Y^2 + 109,503.87232539 Y^3 \quad (7)$$

$$Y = V^{0.00750189} S^{0.00428802} w^{-0.00239974} \quad (8)$$

여기서 C_t 는 유사농도(ppm), V 는 유속, S 는 에너지경사, w 는 유사입자의 침강속도이다.

2.1.4 Yang 공식

Yang은 하천에서 유사량은 물이 가지는 위치 에너지의 감소율에 관계한다고 전제하였으며, 단위 소류력을 변수로 하여 기존의 유사량 자료를 이용한 회귀식을 Eq. (9)와 같이 표시하였다.

$$\begin{aligned} \log C_t = & 5.435 - 0.286 \log \frac{w D_{50}}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_*}{w} \\ & + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{w D_{50}}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_*}{w} \right) \\ & \times \log \left(\frac{VS}{w} - \frac{V_c S}{w} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 C_t 는 무게로 나타낸 하상유사농도(ppm), w 는 입자크기 D_{50} 의 평균 침강속도, D_{50} 은 50%의 무게에 해당하는 입자크기, ν 는 동점성계수, u_* 는 전단속도, V 는 평균유속, S 는 하상경사, V_c 는 한계유속이다. Yang은 Eq. (9)에서 한계조건을 없애고 자료를 다시 회귀시켜 Eq. (10)과 같은 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \log C_t = & 5.165 - 0.153 \log \frac{w D}{\nu} - 0.297 \log \frac{u_*}{w} \\ & + \left(1.780 - 0.360 \log \frac{w D}{\nu} - 0.480 \log \frac{u_*}{w} \right) \\ & \times \log \left(\frac{VS}{w} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

2.1.5 수정 Einstein 공식

수정 Einstein 공식(Einstein, 1950)은 미국 지질조사국의 Colby와 Hembree가 제시한 방법으로 실측한 부유사량으로부터 미측정 구간의 총유사량을 산정하는 방법이다. 부유사량의 실측과 기존의 Einstein 공식을 일부 수정하여 하천의 총유사량을 산정하는 방법이며, Eq. (11)과 같이 각 입경별 단면의 부유사량을 이용하여 전체 유사량을 구한다.

$$q_{si}' = \sum q_{ssi}' = C_s' \int_a^{d_v} V dy = \frac{C_s' \gamma Q}{B} \quad (11)$$

여기서 q_{ssi}' 는 단면 유사량, C_s' 는 측정된 유사농도, V 는 평균유속, d_v 는 부유사가 채취되는 지점의 평균연직깊이, γ 는 물의 단위중량, B 는 하폭이다.

2.2 HEC-RAS 4.1 모형

HEC-RAS 모형은 미육군공병단의 수문연구센터에서 개발한 하천 해석 모형으로 수면곡선을 분석하는 HEC-2 모형의 확장된 시스템이다. Ver 4.0부터 하천과 저수지에서의 하상변동 계산을 위한 일차원 수치모형인 HEC-6 모형이 포함되었다. 지배방정식은 일차원 연속방정식과 에너지 방정식으로 구성되며, 수면형상은 표준축차법으로 구한다. 수리량 자료는 각 시간 단계에서 횡단면별로 계산되며, 하상변화를 모의하기 위한 기본방정식은 Eq. (12)와 같은 유사재료의 연속방정식이다.

$$\frac{\partial G}{\partial x} + B_o \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

여기서 B_o 는 이동상 하폭, t 는 시간, G 는 시간 간격 Δt 동안의 평균 유사량, Y_s 는 검사체적 내의 유사의 깊이이다.

2.3 CCHE2D 모형

CCHE2D 모형은 미국 미시시피 대학 NCCHE가 개발한 2차원 수심적분 모형이다. Jia & Wang(2001)에 따르면 이 모형은 FEM을 이용하여 지배방정식을 근사적으로 해석하며 지배방정식은 각각 수심적분된 2차원 난류 흐름에 대한 운동량 방정식과 수심적분된 연속방정식으로 구성된다. 비정상흐름의 이동경계조건을 다루기 위해 DRY 기법을 사용하였으며, 유사모의는 수심적분된 2차원 이송-확산 방정식을 사용하고, 하상변동은 유사연속방정식을 적용하였다. 소류사 구간은 두께가 수심에 비해 매우 작으므로 Eq. (13)과

같은 이송-확산 방정식을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x}[\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y}] + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xz}}{\partial z} \\ &+ E_{bk} - D_{bk} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 U 와 V 는 각각 x 와 y 방향의 수심평균 유속이며, S_{xx} 와 S_{xz} 는 분산항, C_k 는 수심적분 부유사농도, E_{bk} 와 D_{bk} 는 부유사 구간과 소류사 구간 경계에서의 k 번째 입경 등급의 부유율(상향) 및 퇴적률(하향)을 각각 나타낸다.

3. 대상구역 및 유사량 분석

3.1 대상구역

본 연구에서는 산지하천과 도시하천의 유사량과 하상변동특성을 분석하기 위하여 경상북도의 미천과 대구광역시 대명천을 대상구역으로 선정하였다.

미천은 낙동강 본류 좌안으로 합류되는 지방하천으로 유역면적은 23.39 km²이고 유로 연장은 11.15 km이며, 경북의 성군의 옥산면에 위치하며, 1개군 1개면에 걸쳐 유역이 형성되어 있다. 토지이용현황은 임야가 21.43 km²(77.5 %)로 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며, 농경지 5.33 km²(19.3 %), 주거지 0.33 km²(1.2 %) 순으로 나타났다(Gyeongsangbuk-do, 2013). 측정지점은 갈수기에도 유수의 흐름이 있으며, 수공 구조물에 배수위 영향이 없는 감계교 지점을 선정하였다. 감계교 지점은 미천의 중하류에 위치해 있으며, 건기 시에도 유수가 있어 건기 및 우기의 시기별로 측정이 가능하였다. 본 지점은 교통량이 적고, 시계가 사방으로 충분히 확보되어 있어 홍수 시 유사량 채취기 거치가 용이하며, 건기에는 수심이 낮아 하천에 직접 들어가서 부유사를 채취할 수 있다.

대명천은 대구광역시 남구 대명동 대덕산에서 발원하여 진천천의 우안부로 합류하는 하천으로 유역면적 53.34 km², 유로 연장 13.30 km인 지방하천이다(Daegu Metropolitan City,

2013). 유역의 토지이용을 살펴보면, 주거지가 12.99 km²(24.4 %)로 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며, 임야 11.01 km²(20.6 %), 공업지역 10.93 km²(20.5 %), 도로 7.52 km²(14.1 %), 상업지역 3.00 km²(5.6 %) 순으로 나타났다. 측정지점은 하류에 위치한 월암교지점을 선정하였다.

3.2 유사측정 및 분석

3.2.1 하상재료 조사

본 연구에서는 입도분석을 위한 시료를 하천설계기준상의 시료 채취기준에 따라 한 단면(횡단면)에 대하여 3개 지점 이상에서 채취하였다. 채취된 하상재료의 입경분포 분석을 위하여 모래와 자갈은 KSF(2504) 및 KSF(2503), 미립토사에 대해서는 KSF(2308)의 시험법에 따라 체분석과 입도분석을 실시하여 통과중량백분율, 균등 및 곡률계수 등을 산정하였다. 재료조사 지점으로는 미천의 경우 전체 하천종단면의 6개 지점, 대명천의 경우 전체 하천종단면의 9개 지점을 선정하였으며, 각 하천 유량측정 지점의 하상재료 통과백분율을 나타내면 Table 1과 같다.

하상재료 채취에 의한 하상구성 물질 조사결과, 미천의 경우 주로 입경이 작은 모래로 구성되어 있었으며, 대명천의 경우 모래와 자갈로 구성되어 있으며, 일부 실트질이 포함되어 있는 것으로 조사되었다.

3.2.2 유량 및 유사량 분석

본 연구에서는 대상하천의 유량을 측정하기 위하여 평·갈수기에는 도보형 유속계, 홍수기에는 전자파표면 유속계, 부유사 시료 채취의 경우에는 갈수기에는 도보형 채취기, 평·홍수기에는 크레인형 부유사 채취기를 사용하였으며, 세부적인 측정방법은 수문관측매뉴얼(Ministry of Construction and Transportation, 2004)을 준수하였다. 측정은 2012년의 강우사상을 대상으로 하였으며, 각 하천별 측정은 미천의 경우 총 23회, 대명천의 경우 총 22회를 시행하였다. 측정은 수위별 유량측정 및 부유사 시료 채취를 동시에 수행하였으며, 채취한 부유사 시료에 대하여 부유사 입도 및 농도를 분석하여 부유사량을 산정하였다. 분석방법으로는 부유사의 경우 입도분석방법은 B/W관, 농도분석방법은 진공펌프를

Table 1. Grain size analysis of soil

River	Percent passing (%)										
	53 mm	37.5 mm	26.5 mm	9.5 mm	#4 (4.75 mm)	#8 (2.36 mm)	#16 (1.18 mm)	#30 (0.60 mm)	#50 (0.30 mm)	#100 (0.15 mm)	#200 (0.075 mm)
Michun	-	-	-	100	45.7	30.7	21.0	14.0	8.1	4.9	3.1
Daemyeongchun	-	-	100	89.6	63.9	49.1	34.5	21.7	8.8	4.4	0.0

이용한 여과법을 적용하였으며, 총유수량 산정은 한국건설기술연구원에서 개발한 SCST 및 SDCS 모형을 적용하였다.

각 하천별 수위-유량 및 부유수량-유량 관계곡선은 Fig. 1~4와 같다.

미천 감계교 지점의 경우 측정 유량의 범위는 0.13~46.41 m³/s이고, 부유수량은 0.001~135.116 tons/day로 측정되었

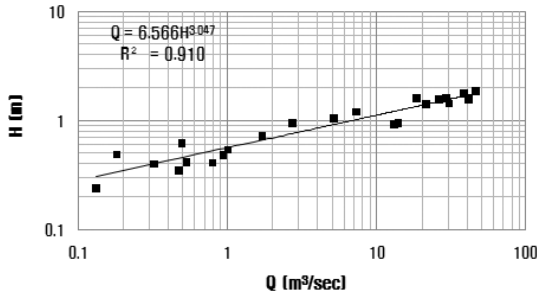


Fig. 1. Stage-Discharge relation curve in the Micheon

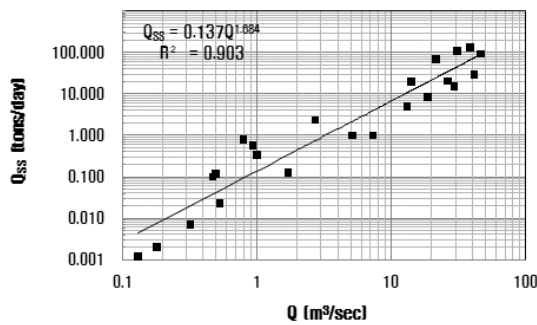


Fig. 2. Discharge-suspended sediment discharge relation curve in the Micheon

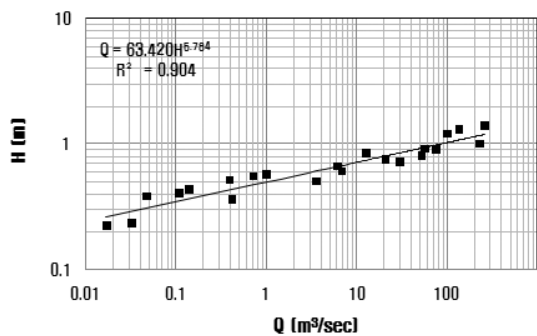


Fig. 3. Stage-Discharge relation curve in the Daemyeongcheon

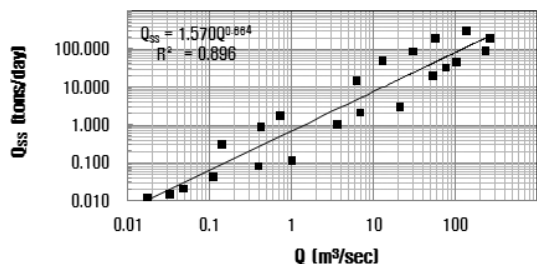


Fig. 4. Discharge-suspended sediment discharge relation curve in the Daemyeongcheon

다. 수위-유량 곡선을 도시한 결과, $Q=6.566H^{3.047}$ 이며 결정계수는 $R^2=0.910$ 이고, 관측된 자료를 이용하여 부유수량-유량 곡선을 도시하면, $Q_{SS}=0.137Q^{1.684}$ 이며 결정계수는 $R^2=0.903$ 이다.

대명천 월암교 지점의 경우 측정 유량의 범위는 0.017~260.87 m³/s이고, 부유수량은 0.012~306.952 tons/day로 측정되었다. 월암교 지점의 수위-유량 곡선을 도시한 결과, $Q=63.420H^{5.784}$ 이며 결정계수는 $R^2=0.904$ 이고, 관측된 자료를 이용하여 부유수량-유량 곡선을 도시하면, $Q_{SS}=1.570Q^{0.664}$ 이며 결정계수는 $R^2=0.896$ 이다.

3.3 총유수량 산정 및 비교·분석

본 연구에서는 각 하천별 총유수량을 산정하기 위하여 측정된 유량과 하상토 입경자료, 부유수량 입도 및 농도자료를 활용하였다. 한국건설기술연구원의 유사량 산정시스템인 SCST 및 SDCS 모형을 이용하여 수정 Einstein 공식, Engelund와 Hansen 공식, Shen과 Hung 공식, Yang 공식과 Ranga Raju 공식을 이용하여 총유수량을 산정하였다. 미천의 경우 수정 Einstein 공식은 0.006~969.731 tons/day, Engleud와 Hansen 공식은 0.057~721.474 tons/day, Shen과 Hung 공식은 0.051~899.623 tons/day, Yang 공식은 0.323~6,523.701 tons/day, Ranga Raju 공식은 0.017~452.612 tons/day로 총유수량이 산정되었다. 대명천의 경우 수정 Einstein 공식은 0.015~400.452 tons/day, Engleud와 Hansen 공식은 0.232~996.952 tons/day, Shen과 Hung 공식은 0.113~1,512.025 tons/day, Yang 공식은 0.138~512.478 tons/day, Ranga Raju 공식은 0.003~612.635 tons/day로 총유수량이 산정되었다.

여러 공식에 의해 산정된 총유수량은 상당한 편차를 보이고 있으며, 이 중 최적의 결과를 해석적으로 제시한다는 것은 불가능한 일이다. 따라서 측정된 부유수량을 기준으로 물리적 연관성을 통해 최적의 식을 도출하는 것이 일반적이다. 총유수량은 부유수량보다 적을 수 없으며 유사한 경향을 갖는 총유수량을 선정하게 된다. 대상 유역에서 관측된 유량과 부유수량, 하상토 자료를 고려하여 검토한 결과, 물리적 연관성이 확인되는 수정 Einstein 공식을 이용하여 산정한 총유수량이 가장 적합한 것으로 판단되었다. 미천의 경우, 총유수량 유량 추정식은 $Q_{TS}=0.8666Q^{1.7382}$, 결정계수는 $R^2=0.9125$ 이며, 대명천의 경우 추정식은 $Q_{TS}=1.6206Q^{0.9757}$, 결정계수는 $R^2=0.8925$ 이다. 각 하천별 총유수량-유량 관계를 나타내면 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

각 하천별 산정된 총유수량 결과를 살펴보면, 전체적으로 동일 유량에서 도시하천인 대명천 보다는 산지하천인 미천의 총유수량이 크게 발생하는 것으로 나타났다.

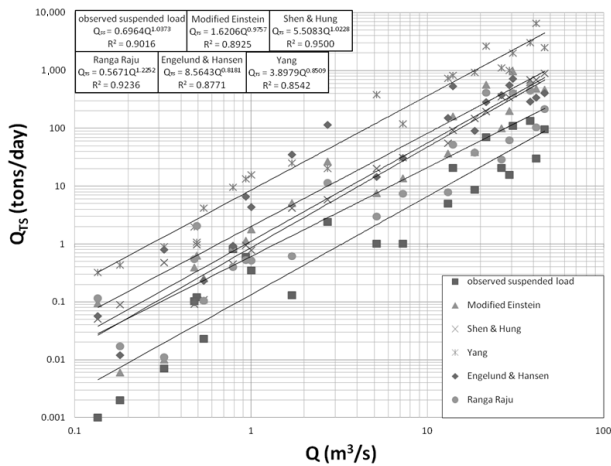


Fig. 5. Discharge–total sediment discharge relation curve in the Micheon

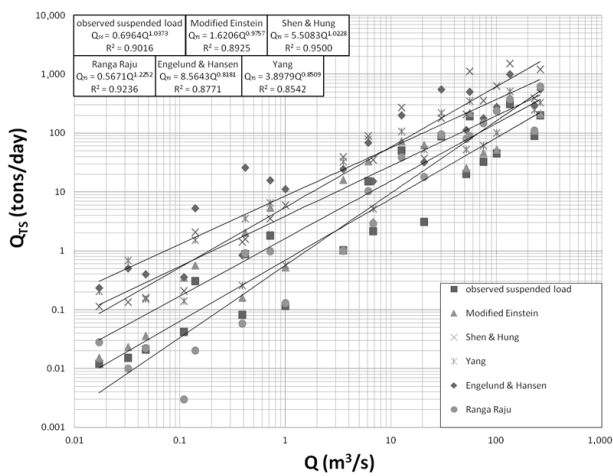


Fig. 6. Discharge–total sediment discharge relation curve in the Daemyeongcheon

4. 하상변동 분석

4.1 단기하상변동 분석

본 연구에서는 단기하상변동 분석을 위하여 CCHE2D 모형을 적용하였으며 격자는 200×400을 사용하여 모의 단면 계산의 세밀함을 높였고, 초기 모의조건으로 실측한 유량자료를 이용하였다. 하상변동 모의시간은 각각 86,400초와 172,800초를 적용하였으며 시간 간격은 1초, 난류모의는 정확도가 높은 $k-e$ 모형을 사용하였다. 상류수위는 유량측정대 측정한 수위를 적용하였으며, 하류수위는 HEC-RAS 모형을 이용하여 산정하였다. 하상변동을 모의하기 위한 유사량 공식은 모형에 적용되어 있는 공식 중 입경분포별 계산이 가능하고 총유사량 이송을 모의할 수 있는 Wu et al.(2000)을 적용하였다.

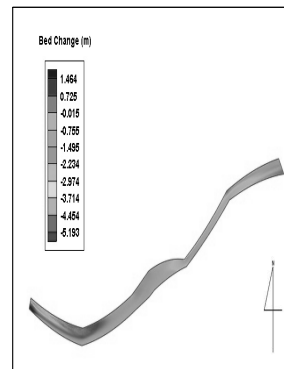


Fig. 7. Flood season analysis (86,400 sec)

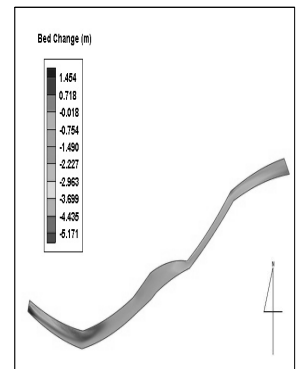


Fig. 8. Flood season analysis (172,800 sec)

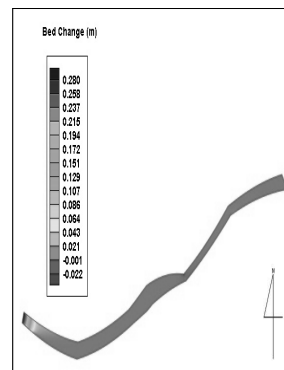


Fig. 9. Normal season analysis (86,400 sec)

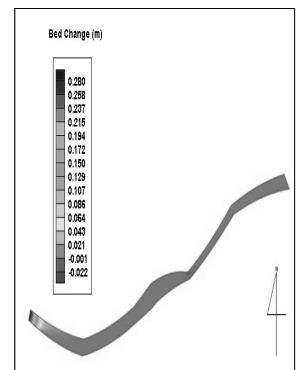


Fig. 10. Normal season analysis (172,800 sec)

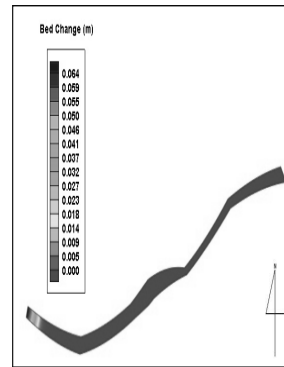


Fig. 11. Dry season analysis (86,400 sec)

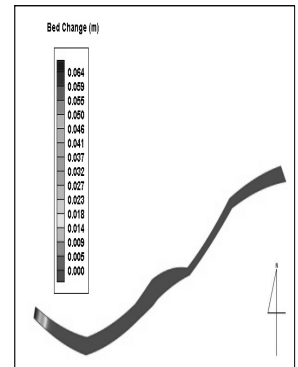


Fig. 12. Dry season analysis (172,800 sec)

4.1.1 미천 유역

미천 유역의 모의를 위하여 대상구간은 감계교 지점을 시점으로 취수보가 설치되어 있는 하류 방향 800 m로 지정하였다. 실측한 자료 중에서 홍수기 유량인 46.417 m³/s, 평수기 유량인 5.153 m³/s, 갈수기 유량인 0.135 m³/s가 사용되었으며, 총유사량은 홍수기 467.633 tons/day, 평수기 7.567 tons/day, 갈수기 0.096 tons/day가 적용되었다.

유량별 단기하상 검토결과를 나타내면 Fig. 7~12와 같다. 홍수기인 Fig. 7과 Fig. 8을 살펴보면, 미천 유역의 감계

교에서 홍수사상이 발생하면 많은 유사의 이동과 퇴적이 모의되었다. 하류 방향으로 200 m 지점에서는 유사의 퇴적이 심화되고 하도가 좁아지는 400 m에서 600 m 지점까지는 유사의 침식량이 커지면서 다시 800 m 지점까지 유사가 퇴적되는 것을 알 수가 있다. 1일과 2일 동안의 모의과정에서 큰 변화는 없었지만, 시간이 흐를수록 하류 방향으로 200~400 m 지점까지의 퇴적된 유사가 침식이 진행되면서 하상이 좀 더 평탄화 과정이 진행되는 것이 보인다. 이를 보아 시간이 경과함에 따라서 하상의 퇴적과 침식에는 유기적인 관계가 있어 일정량 이상의 변화를 보이다가 차츰 안정화된다는 사실을 알 수가 있다.

Fig. 9~12의 평·갈수기 하상분석을 살펴보면 발생하는 유량과 부유사량이 작은 관계로 대상 하천구간 내에서 침식과 퇴적의 진행이 이루어지지 않고 있으며, 감계교 시점의 일부 구간에서 소량으로 발생하였다. 따라서 하상변동을 2차원으로 해석하는 경우 짧은 시간과 작은 유량으로 결과를 유도하기에는 어려움이 있는 것으로 판단된다.

4.1.2 대명천 유역

대명천 유역의 모의를 위하여 대상구간은 월암교 지점을 시점으로 유역 출구점까지 하류 방향 2 km로 지정하였다. 실측한 자료 중에서 홍수기 유량인 260.870 m³/s, 평수기 유량인 52.120 m³/s, 갈수기 유량인 0.017 m³/s가 사용되었으며, 총 유사량은 홍수기 210.587 tons/day, 평수기 25.125 tons/day, 갈수기 0.015 tons/day가 적용되었다.

유량별 단기하상 검토결과를 나타내면 Fig. 13~18과 같다. 홍수기인 Fig. 13과 Fig. 14를 살펴보면, 전체적인 모의 결과에서는 유사의 이동과 하상의 변화량이 확연하게 많은 변화가 보였다. 월암교 지점 부근에서 1일 모의분석에서는 하상의 퇴적량이 커지는 경향을 보이고, 2일 모의분석에서는 하상이 오히려 침식되면서 하류부로 진행되면서 하상의 퇴적량이 증가된 모습을 볼 수가 있다. 또한 만곡부에서는 하상의 변화가 크게 발생하였으며, 2일의 모의결과는 하상 변화량이 0.091~0.621 m로 발생하였다. 평·갈수기인 Fig. 15~18을 살펴보면 유량과 총유사량의 값이 작은 관계로 대상구간 전반에 걸쳐 큰 변화가 없지만, 시점과 유역출구점에서는 약간의 하상의 변화가 보였다.

4.2 장기하상변동 예측

본 연구에서는 대상유역의 장기하상변동 특성을 검토하기 위하여 HEC-RAS 4.1 모형을 적용하였으며, 10년 및 20년경과 시 최심하상고의 변동양상을 분석하였다. 실제 하상의 변화를 정량적으로 파악하기 위해 2012년도 하천기본계

획 측량성과 자료를 이용하였다.

본 연구의 대상유역인 미천과 대명천의 초기하상고, 10년, 20년 후의 최심하상고 변화를 도시하면 Fig. 19와 Fig. 20과 같다. Fig. 19를 살펴보면 미천 유역은 부분적으로 하상변동이 발생하는 것으로 나타났으며 특히 보, 낙차공 직상류에 퇴적이 발생하고 직하류에 침식이 발생하는 것으로 예측되었다. 구간별 기간별 평균 하상고 변화량을 산정한 결과, 전 구간에 대해 향후 10~15년 후 0.031 m, 15~20년 후에는 0.010 m로 변화되며, 시간이 길어짐에 따라 하상고 변화량이 감소하며 안정하상에 도달하는 것으로 판단된다.

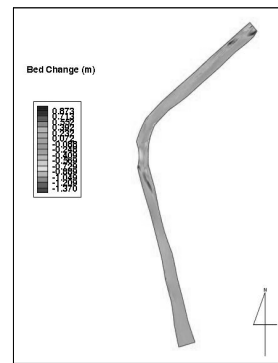


Fig. 13. Flood season analysis (86,400 sec)

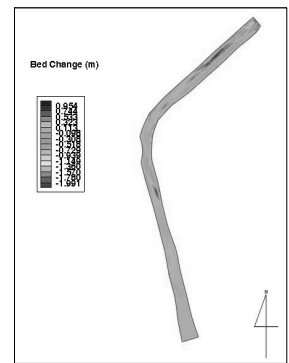


Fig. 14. Flood season analysis (172,800 sec)

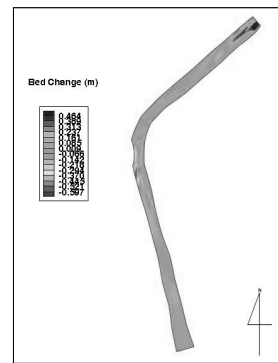


Fig. 15. Normal season analysis (86,400 sec)

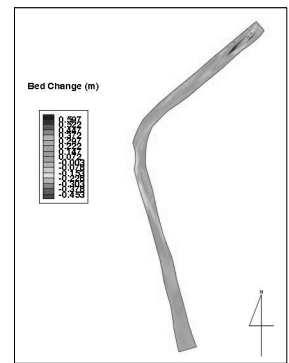


Fig. 16. Normal season analysis (172,800 sec)

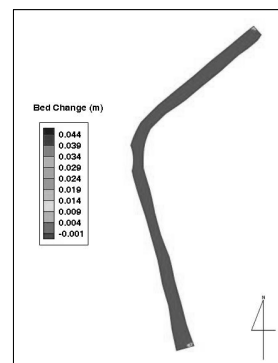


Fig. 17. Dry season analysis (86,400 sec)

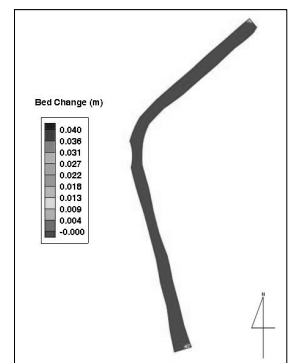


Fig. 18. Dry season analysis (172,800 sec)

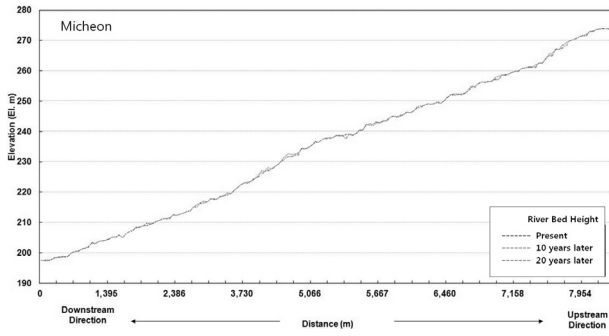


Fig. 19. Long-term bed level change analysis in the Micheon

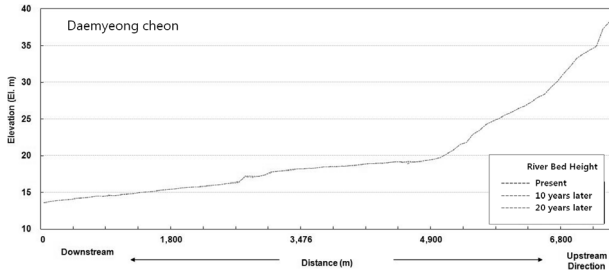


Fig. 20. Long-term bed level change analysis in the Daemyeongcheon

Fig. 20을 살펴보면 대명천 유역은 부분적으로 하상변동이 발생하는 것으로 나타났으며, 장래 대명천의 20년간 하상변동량을 살펴보면, 전 구간 변화량이 10년 후 약 0.01 m, 20년 후에는 시간이 진행함에 따라 하상변화량이 없는 것으로 나타나 현재 안정하상에 도달된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 지방하천의 유사량과 하상변동 특성을 분석하기 위하여 산지하천과 도시하천을 대상으로 유량과 부유사량을 측정하고 총유사량을 산정하였다. 또한 HEC-RAS 4.1 모형과 CCHE2D 모형을 대상유역에 적용하여 단·장기하상변동 특성을 분석하였다. 본 연구의 수행으로 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 대상유역에서 적용한 총유사량 산정공식인 Engelund와 Hansen 공식, Ranga Raju 공식, Shen과 Hung 공식, Yang 공식과 수정 Einstein 공식 중에서 수정 Einstein 공식이 실측치와 유사한 결과를 나타내었다.
- (2) 대상하천의 중·장기적인 하도 관리를 위하여 수위-유량 관계곡선, 부유사량-유량 관계곡선, 총유사량-유량 관계곡선을 제시하였다.
- (3) 수정 Einstein 공식에 의한 총유사량-유량 관계는 산지하천인 미천의 경우, $Q_{TS} = 0.879Q^{1.732}$, 결정계수는 $R^2 =$

0.911이며, 도시하천인 대명천의 경우, $Q_{TS} = 1.620Q^{0.975}$, 결정계수는 $R^2 = 0.892$ 로 나타났다.

- (4) 단기하상변동 분석의 경우 산지하천인 미천이 도시하천인 대명천 보다는 하상변동이 크게 발생하였으며, 홍수기에 비하여 평·갈수기의 하상변동은 미미한 것으로 나타났다.
- (5) 장기하상변동 분석의 경우 산지하천인 미천은 지속적인 하상변동이 진행되어 20년 경과 후에는 안정하상에 도달할 것으로 예상되며, 도시하천인 대명천은 현재 안정하상에 도달한 것으로 판단되어 도시하천이 상대적으로 산지하천에 비하여 하상변동이 작은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의해서 연구된 논문으로 지원에 감사드립니다.

References

1. Daegu Metropolitan City (2013), Master plan report for Daemyeongchun river. pp. 3-1~3-17 (in Korean).
2. Einstein, H. A. (1950), The bed load function in open channel flows, Technical Bulletin No.1026, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, pp. 1~74.
3. Gyeongsangbuk-do (2013), Master plan report for Michun river, pp. 3-1~3-17 (in Korean).
4. Jang, C. L., Jeong, K. W., Kim, J. H. and Yang, D. Y. (2010), Prediction of the river bed change by dam construction, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 3, pp. 175~178 (in Korean).
5. Jang, C. L. and Lee, K. S. (2011), Relationship between discharge and sediment at the Daejeon stream in Chungju, Conference of Korea Water Resources Association, pp. 341~345 (in Korean).
6. Jia, Y. F. and Wang, Sam S. Y. (2001), CCHE2D: two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loose bed, Technical Report, NCCHE-TR-2001-1, pp. 1~83.
7. Kim, Y. S., Jang, C. L., Lee, K. H. and Jeong, K. S. (2010), Investigation of flow characteristics of sharply curved channels by using CCHE2D model, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 10, No. 5, pp. 125~133 (in Korean).
8. Korea Institute of Construction Technology (1989), Development of a guideline for the selection of sediment transport formulas, pp. 1~426 (in Korean).
9. Korea Institute of Construction Technology (1991), A comparative analysis of alluvial channel models for the prediction of river-bed, pp. 1~380 (in Korean).
10. Lee, Y. K., Go, J. Y., Lee, J. W. and Jung, S. W. (2009), Development of sediment discharge computation system for characteristic

- analysis of river sediment discharge, Conference of Korea Water Resources Association, pp. 723~727 (in Korean).
11. Maeng, S. J., Kim, H. S., Kim, T. W., Sim, J. H. and Jeong, J. H. (2012), Analysis of discharge-sediment in small watershed during flood season, Conference of Korea Water Resources Association, 417 p. (in Korean).
 12. Ministry of Construction and Transportation (2004), Manual for hydro-observation, pp. 1~270.
 13. Toffaleti, F. B. (1968), A procedure for computation of the total river sand and detailed distribution, bed to surface, Technical Report No. 5, Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 177 p.
 14. Wu, W., Wang, S. S. Y. and Jia, Y. (2000), Nonuniform sediment transport in alluvial rivers, Journal of the Hydraulic Research, IAHR, Vol. 38, No. 6, pp. 427~434.