

한강 여주대교 지점에서 총유사량 특성

김도언¹ · 최성욱^{2*}¹연세대학교 건설환경공학과 석사과정, ²연세대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

Characteristics of Total Sediment Load at Yeoju Station in Han-gang River

Do Eon Kim¹ and Sung-Uk Choi^{2*}¹Master Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

Received 2 April 2025, revised 27 May 2025, accepted 13 June 2025, published online 30 June 2025

ABSTRACT: In Korea, a significant amount of sediment transport occurs in the rivers only during flood seasons. Sediment transport in the river affects the change in geomorphology and ecosystem of the river. Therefore, accurate prediction of sediment transport is very important to the management of the river in the era of climate change. This study was performed to investigate the hydraulic characteristics of sediment load using the measured data at Yeoju Station in the Han-gang River. First, the annual change of the bed sediment and the impact of the flood on the distribution of bed sediment are investigated. Then, the relationship between the total sediment load and discharge is established. It is found that the total sediment load increases proportionally to the 2.189 power of the discharge, regardless of the year. Lastly, five total sediment load formulas, widely used currently, are applied, and the results are compared with the measured data. The present study will be useful in predicting the total sediment load in rivers in Korea.

KEYWORDS: Bed sediment, Measured sediment load, Sediment transport, Total load formula, Total sediment load

요 약: 우리나라 하천에서 유사이송은 주로 장마철 홍수기에 발생하며, 하천지형학적 변화와 생태계에 영향을 미친다. 따라서 기후변화 시대에 유사량의 정확한 예측은 하천관리에 매우 필수적이다. 본 연구는 우리나라 한강의 여주 지점에서 측정된 유사량 자료를 이용하여 유사량의 수리 특성을 분석하기 위하여 수행하였다. 먼저, 하상토 분포의 경년 변화와 홍수가 하상토 분포에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 측정자료를 이용하여 유량과 총유사량과의 관계를 구축하였다. 특정한 해에 상관없이 총유사량은 유량의 2.189승에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 마지막으로 기존에 널리 사용되는 5개의 총유사량 공식을 적용하여 측정자료와 비교하였다. 이 연구는 향후 우리나라 하천에서 총유사량을 예측하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심어: 하상토, 측정유사량, 유사이송, 총유사량 공식, 총유사량

1. 서 론

일반적으로 하천에서의 유사이송은 하천지형학적 인 변화를 야기한다. 이는 공간적으로 하천단면의 변화(혹은 1차원 흐름에서 하상변동) 및 하상토 구성의 변화

를 발생시킨다. 따라서 하천에서의 유사이송은 하천단 면의 통수능과 직접 관련이 있으며 하천 횡단시설물의 안전 그리고 하천에 서식하는 동식물의 생태서식처에 영향을 미친다. 그리고 하천 식생의 활착과 번성에 영향을 주는데 하천에서 식생의 번성 정도는 유사이송에 다

*Corresponding author: schoi@yonsei.ac.kr, ORCID 0000-0002-0802-7705

시 영향을 미치게 되어 상호작용을 하게 된다.

최근 들어 우리나라는 기후변화의 영향으로 가뭄과 홍수가 번갈아 가며 발생하고 있으며, 장마철 하천에서의 홍수량도 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다 (Jeong et al. 2008). 일반적으로 Woo and Yu (1993)에 의하면 유량(Q)과 총유수량(Q_s) 관계는 형태이며, 여기서 지수 β 는 모래하천의 경우 1.5 - 3.0 사이로 보고된 바 있다. 따라서 하천에서 홍수량이 증가하면 총유수량은 1.5에서 3.0의 거듭제곱의 형태로 증가하게 되므로 기후변화에 의한 총유수량의 증가는 유량의 변화를 훨씬 능가할 것으로 전망된다. 그러므로 하천에서 유수량을 정확히 예측하고 이를 하천관리에 활용하는 것은 매우 핵심적인 과제이다.

McLean et al. (1999)은 Canada의 Fraser River 하류 부 3개 지점에서 1966년부터 1986까지 측정된 유수량 자료를 분석하였다. 3개 지점의 총유수량이 거의 비슷하게 산정되었고, 부유사가 총유수량의 1/3을 차지하며 소류사는 1% 밖에 되지 않는 것을 확인하였다. 그리고 유수량의 상당 부분이 모래로 구성된 세류사로 발생하는 것으로 추산되었다. Rankl (2004)은 미국 Wyoming주의 5개 간헐천에서 침투유량과 유수량과의 회귀식을 제시하였다. 회귀식의 상수(α)와 기울기(β)는 각 0.62 - 33.88과 1.07 - 1.29 사이에 분포하였으며 결정계수는 0.89 - 0.91 사이에 분포하는 것으로 나타났다. Boukhrissa et al. (2013)은 Algeria의 El Kebir River에서 부유수량을 예측하기 위하여 유량-유수량 관계곡선과 ANN 기반 모형을 제시하였다. 유량-유수량 관계곡선은 특정 조건하에서 부정확한 예측을 하였으나, ANN 기반 모형은 비교적 정확한 예측을 수행하였다.

우리나라 하천에서 유수량에 관한 연구는 많지 않다. Choi and Lee (2015a)는 Lateral Distribution Method를 이용하여 하천에서 총유수량을 계산하였다. 소류수량과 부유수량을 산정하기 위하여 Meyer-Peter and Muller 공식과 Rouse 분포를 각각 이용하였다. 제안된 산정방법을 자갈하천인 Slovakia Danube River와 모래하천인 우리나라 한강의 여주 지점에 적용하여 계산된 총유수량의 특성을 검토하였다. Choi and Lee (2015b)는 우리나라 한강, 금강, 낙동강에 Lateral Distribution Method를 적용하여 총유수량을 산정하였다. 기존 사용되던 1차원 방식의 계산결과와 비교하

여 제안된 방법의 적용성을 검토하였다. Yang and Julien (2019)는 MEP (Modified Einstein Procedure)와 SEMEP (Series Expansion of Modified Einstein Procedure)를 이용하여 측정유수량과 총유수량의 비 그리고 부유수량과 총유수량의 비가 두 개의 무차원수로 표현될 수 있음을 보였다. 한국 하천의 측정 유수량 자료를 이용하여 측정유수량과 총유수량의 비가 수십만의 함수로 나타낼 수 있음을 보였다. Jang and Ji (2021)는 한국의 4개 하천인 한강, 낙동강, 금강, 영산강에서 유수량 특성을 조사하였다. MEP 기법을 이용하여 총유수량으로 환산하였으며 4개 하천에 적용 가능한 회귀식을 제시하였다. 그리고 월별 회귀식을 통해 하천에서 계절에 따른 총유수량의 변화가 큰 것을 확인하였다. 총유수량 자료에 5개의 공식을 적용한 결과, Ackers-White 공식이 비교적 잘 맞는 것으로 확인되었으나 실제 적용에는 주의를 요하는 것으로 판단하였다.

기존의 국내 연구는 대부분 특정 시기 혹은 단기 자료를 바탕으로 한 총유수량 산정에 그친 반면, 본 연구는 국내 측정 지점 중에서도 장기 측정자료가 확보된 여주 지점의 자료를 이용하여, 총유수량의 경년적 특성과 총유수량 공식의 적용 가능성을 분석하였다는 점에서 차별화된다.

우리나라 하천에서 유수량 측정은 1960-70년대부터 시작되었으나 자료로서 의미가 있는 것은 2001년부터 2005년 동안 수행된 유역조사 보고서에 수록된 내용이다. 이후 한국수자원조사기술원은 2006년부터 4대강 홍수통제소 관할 유수량관측소 4개 지점을 포함하여 총 6개 지점에서 홍수기 유수량 측정을 시작하였다. 그리고 2023년에는 5대강 25개 지점으로 유수량 측정 범위를 확대하였다. 주요 하천에서 유수량을 측정하여 자료를 축적하였으나, 이에 대한 정량적 분석 및 장기적 특성 분석 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구의 목적은 한국수자원조사기술원에서 제공하는 한강 여주 지점의 측정 유수량 자료를 이용하여 우리나라 한강 여주지점에서의 유수량의 특성을 조사하는 것이다. 이를 위하여 하상토의 경년 변화 및 홍수에 따른 입도분포의 변화를 살펴보았다. 그리고 2007년부터 2019년까지 측정된 유수량 자료를 이용하여 유량-유수량 관계식(sediment rating relationship)을 구축하였다. 마지막으로 실무에서 많이 사용되는 5개의 공식을 적용하여 한강의 여주 지점 총유수량 예측에 적합한 공식을 제시하였다.

2. 대상지점 및 유사량 자료 수집

2.1 대상지점

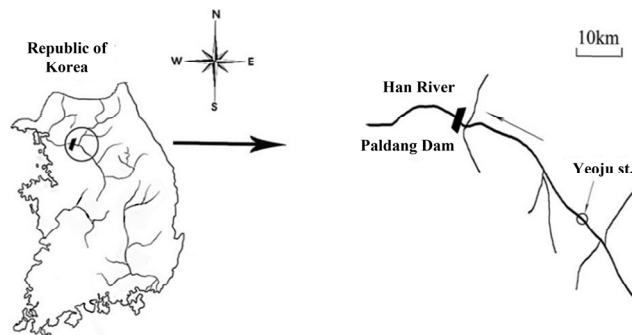
본 연구는 한국수자원조사기술원에서 수행한 2007년부터 2019년까지 한강의 여주 수위관측소 자료를 활용하여, 홍수기 총유사량의 특성을 분석하였다. 여주지점은 상류의 충주댐 및 횡성댐 그리고 하류의 팔당댐, 여주보 및 강천보 사이에 위치하여 수문조절의 영향을 직접적으로 받는 구간이며(Fig. 1(a) 참조), 한강에서 유량 및 유사량의 특성을 보이는 것으로 판단하였다. 또한, 우리나라 모래하천의 대표적인 지점으로 측정 유사량 자료가 오랜 기간 축적되어 있어 유사이송 특성을 분석하기에 적합한 지점이다.

2.2 유사량 자료

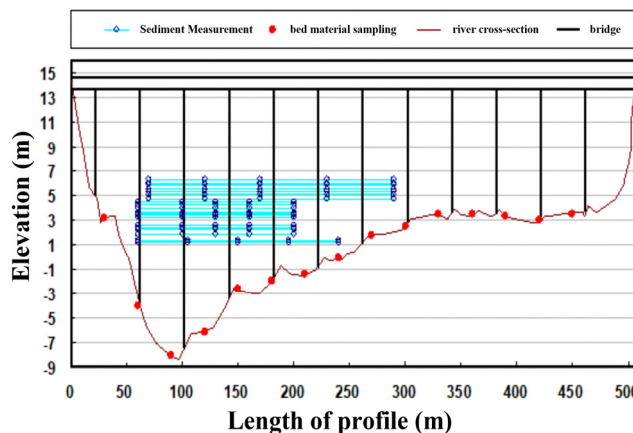
수자원조사기술원의 보고서(Hydrological Survey Center 2007-2020)에 따르면, 유량측정을 위해서 저수

위 및 평수위 시는 교량에서 프라이스 유속계를 이용하였고, 홍수기에는 부자를 이용하였다. 유사량은 신여주대교와 구여주대교의 사이 브릿지보드에 D-74를 연결하여 측정하였다. 2007년부터 2019년까지 측정된 유사량 데이터의 개수는 112개이다. 하상토의 채취는 홍수기 이후에 BM-54를 이용하여 신여주대교에서 하류 방향으로 좌안으로부터 30 m 등간격으로 15개의 시료를 채취하였다(Fig. 1(b) 참조).

일반적으로 총유사량은 이송형태에 따라 부유사와 소류사로 구분되며 채취 가능성에 따라 측정 유사와 미측정 유사로 구분된다(Woo 2001). 한국수자원조사기술원의 보고서에 따르면, 유사량의 측정자료로부터 MEP를 적용하여 미측정 유사량을 추정하여 총유사량을 산정하였다. 따라서 추정된 미측정 유사량은 측정되지 않은 부유사량과 소류사량을 포함한다. 참고로, 우리나라 하천에서 유사이송은 주로 장마철 홍수기에 유의미하게 발생하며 이송형태는 대부분이 부유사라고 알려져 있다(Seo et al. 1996).



(a) Location of the station



(b) Cross section of the station (Hydrological Survey Center 2007)

Fig. 1. Location and cross section of the station.

3. 총유사량 공식

본 연구에서는 기존에 제시되어 많이 사용되고 있는 대표적인 5개의 유사량 공식의 적용성을 검토하였다. 총유사량 공식은 단위 폭 당 유사량 $q_t [L^2/T]$ 혹은 흐름률 기반 총유사량의 질량농도 $C_s [M/L^3]$ 로 표현되며 각각은 다음 Eq. 1에 의해 서로 환산될 수 있다.

$$q_t = \frac{1}{(R+1)} - \frac{C_s}{(1-C_s)} q \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 R 은 유사입자의 수중단위중량이며 q 는 단위 폭 당 유량이다. 아래의 총유사량 공식에서 자세한 변수의 설명은 Choi and Lee (2015a)를 참고하기 바란다.

2.2.1 Engelund-Hansen (EH) 공식

Engelund and Hansen (1967)은 무차원의 총유사량으로 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{q_t}{\sqrt{R_g D_{50} D_{50}}} = \frac{1}{C_f} \cdot 0.05(\tau^*)^{\frac{5}{2}} \quad (\text{Eq. 2})$$

EH 공식은 주로 실험 데이터를 기반으로 개발되었으며, $D_{50} < 0.15 \text{ mm}$ 와 같은 세립토에 적용하는 것은 적합하지 않다(Wu 2008).

2.2.2 Ackers-White (AW) 공식

Ackers and White (1973)는 총유사량 농도로 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$C_s = c \frac{\rho_s D_{50}}{\rho R_h} \left(\frac{U}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_{gr}}{A_{aw}} - 1 \right)^m \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{R_g D_{50}}} \left[\frac{U}{\sqrt{32 \log(10 \hat{H})}} \right]^{1-n} \quad (\text{Eq. 4})$$

AW 공식은 DuBoys 유형의 총유사량 공식으로 Eq. 2에서 A_{aw} 는 하상의 입자가 움직이기 시작하는 임계값으로 정의된다. AW 공식은 실험 데이터를 기반으로 개

발되었으며, 특히 $D_{50} > 0.2 \text{ mm}$ 의 큰 입자에 적합한 것으로 알려져 있다(Wu 2008).

2.2.3 Yang (YA) 공식

Yang (1979)은 다음과 같이 총유사량 농도를 제시하였다.

$$\log(C_s \cdot 10^6) = a_1 + a_2 \log\left(\frac{US}{v_s}\right) \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 a_1 과 a_2 는 실험 데이터로부터 도출된 계수로, 침강속도, 입자크기, 동점성계수 등의 함수이다. YA 공식은 Stream Power (US)와 유사의 이송특성을 기반으로 농도를 계산한다.

2.2.4 Brownlie (BR) 공식

Brownlie (1981)에 따르면 총유사량 농도는 다음과 같다.

$$C_s = 7.115 \cdot 10^{-3} c_f (\hat{U} - \hat{U}_c)^{1.978} S^{0.6601} (\hat{H})^{-0.3301} \quad (\text{Eq. 6})$$

위에서 C_f 의 값은 실험실과 현장 자료의 경우 각각 1과 1.268이다. BR 공식은 실험실과 현장의 유사량 측정 자료에 기반하며 회귀분석을 통해 얻어진 결과이다.

2.2.5 Karim (KA) 공식

Karim (1998)은 단위 폭 당 총유사량으로 다음과 같은 공식을 제시하였다.

$$\frac{q_t}{\sqrt{R_g D_{50} D_{50}}} = 0.00139 \left(\frac{U}{\sqrt{R_g D_{50}}} \right)^{2.97} \left(\frac{u_*}{v_s} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

위의 공식은 이전에 발표된 Karim-Kennedy 공식을 단순화시켜 제시한 것이다.

4. 유사량 자료 분석 및 결과

4.1 하상토 입도분포 경년 변화

Fig. 2는 2006년부터 2019년까지 한강 여주지점에서 하상토 입도분포를 도시한 것이다. 하상토는 매우 잔

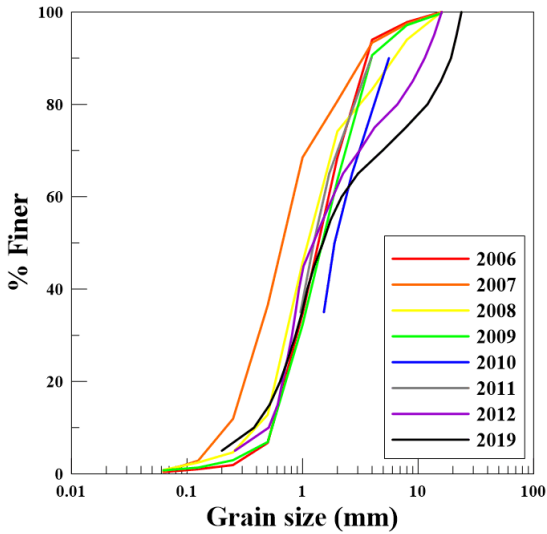


Fig. 2. Change in distribution of bed sediment from 2006 to 2019.

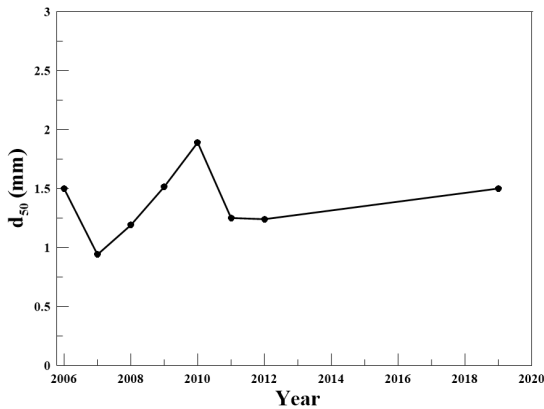


Fig. 3. Change in the median size of bed sediment.

모래(very fine sand)인 0.1 mm부터 중간자갈(medium gravel)인 10.0 mm 까지로 구성되어 있다. 한강 여주지점에서의 입도분포는 모래하천의 전형적인 특성인 기울기가 급한 S자형을 보여주며 입도는 매우 균일한 것으로 나타났다. 그림에 따르면 2007년 자료를 제외하면 시간 경과에 따른 입도분포의 변화는 크지 않은 것으로 보인다.

Fig. 3는 2006년부터 2019년까지 한강 여주지점에서 하상토 중앙입경의 경년변화를 나타낸다. 중앙입경은 0.94 (coarse sand) – 1.89 mm (very coarse sand) 사이에 분포하고 있다. 중앙입경의 평균값은 1.38 mm (very coarse sand)로서 해당 지점이 모래하천인 것을 나타낸다. Fig. 2의 결과와 일관되게, 그림에 따르면

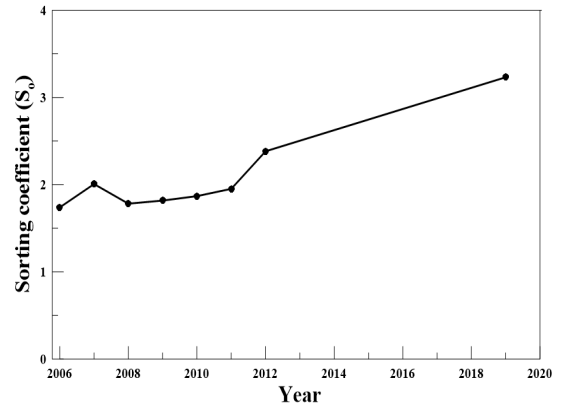


Fig. 4. Change in the sorting coefficient of bed sediment.

2007년과 2010년을 제외하면 하상토 중앙입경의 경년 변화는 매우 작은 것으로 나타났다.

Fig. 4는 2006년부터 2019년까지 한강 여주지점에서 하상토의 분급계수 변화를 도시한 것으로 분급계수는 다음과 같이 정의된다.

$$S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (\text{Eq. 8})$$

여기서 d_a = 중량 백분율 $\alpha(\%)$ 에 해당하는 유사의 직경 (mm)이며 입도분포 곡선으로부터 구한다. 위의 식에서 S_0 가 1에 가까우면 입자가 매우 균일한 구성임을 알 수 있다. 일반적으로 자연적인 모래하천에서 분급계수는 2.0 - 4.5 사이인 것으로 알려져 있다(Woo 2001). 그림에 의하면 해당 지점에서의 하상토 분급계수는 지속적으로 증가하며 이는 유수에 의한 장강화현상에 기인하는 것으로 판단된다. 그림에서 분급계수의 평균값은 2.1이며 이는 자연하천에서 분급계수의 범위 안에 있으나, 최근 값은 3.0을 초과하여 입도 분포가 점차 불균일해지고 있는 것으로 판단된다.

4.2 측선에 따른 하상토 입도분포의 변화

Fig. 5(a)와 5(b)는 각각 2007년 홍수 전후 하상토의 입도분포를 도시한 것이다. 그림에서는 Fig. 1의 횡방향 측선에 따라 하상토 분포를 나타내었다. Fig. 5(a)에 따르면 홍수 전 하상토의 횡방향 입도분포는 측선 위치에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 홍수 이후, 단면의 최심부(thalweg)를 기준으로(검정색으로

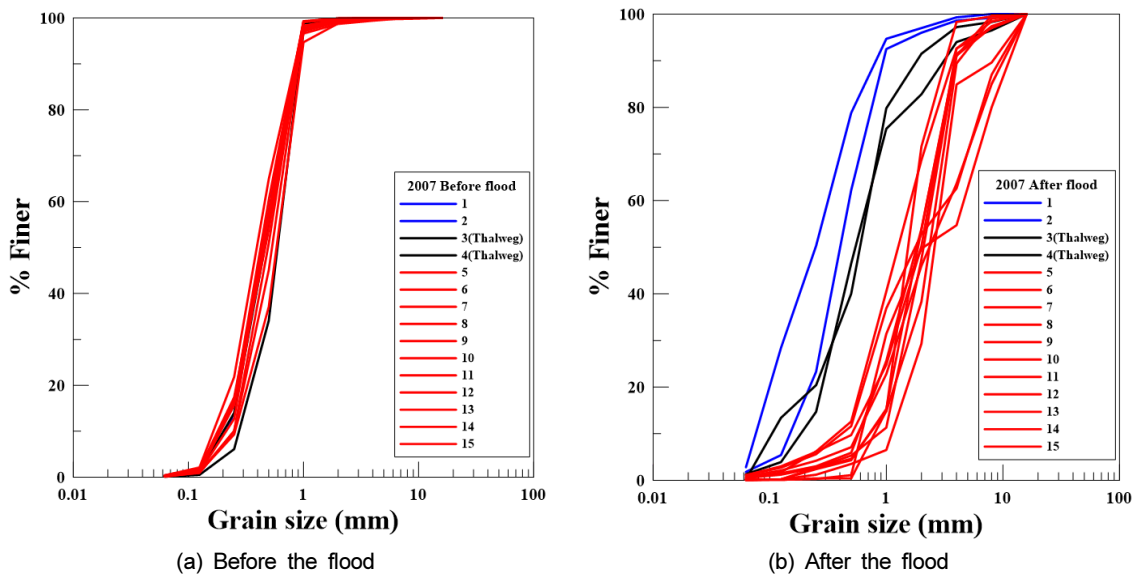


Fig. 5. Distributions of bed sediment at various transects.

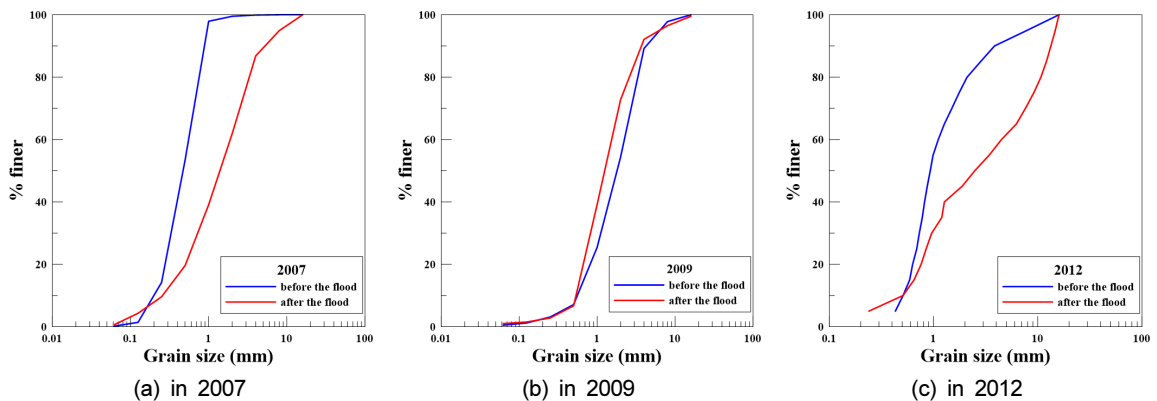


Fig. 6. Distributions of bed sediment before and after flood.

도시) 좌안 방향에서는(파란색으로 도시) 약간의 세립 토 퇴적이 발생하였고 우안 고수부지 방향으로(빨간색 으로 도시) 조립토가 퇴적되는 경향이 관찰되었다. 우 안의 고수부지에서 홍수 하강기에 주수로보다 작은 유 속으로 인해 퇴적이 발생한 것으로 판단된다.

4.3 홍수에 따른 하상토 입도분포의 변화

Fig. 6는 홍수 전후 하상토 입도분포의 변화를 도시 한 것으로 Fig. 1에 제시된 측선에 따른 분포를 평균한 것이다. 먼저 Fig. 6(b)를 살펴보면, 2009년의 경우, 홍 수 이후 하상토에서 세립토 비율이 조금 증가한 것을 확 인할 수 있다. 이것은 일반적인 현상으로 홍수의 상승기

에는 자갈 등 조립토가 이송되나 하강기에는 모래같은 세립토가 이송되다가 퇴적된다. 그러나 Figs. 6(a)와 6(c)에 따르면 2007년과 2012년의 경우, 홍수 이후 조 립토가 증가한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 낙동강 의 왜관 지점에서도 확인되었다(Hydrological Survey Center 2007-2019). 그러므로 홍수량 유과에 의한 하상 토의 변화는 유역의 유사 특성, 하도 단면의 특성, 그리 고 유량의 규모 등에 관계하는 것으로 생각할 수 있다.

4.4 유량-유사량 관계곡선 구축

유량-유사량 관계곡선은 실무에서 수위-유량 관계 곡선과 함께 하천에서 유사량을 예측하는데 널리 사용

된다. Woo (2001)은 다른 어떤 방법보다 측정자료에 기반한 유량-유사량 곡선을 우선 사용할 것을 권장하고 있다. 일반적으로 유량-유사량 관계는 $Q_s = \alpha Q^\beta$ 형태로 나타내며, 여기서 지수 β 는 하천의 특성에 따라 유사량의 절대량을 결정짓는 중요한 인자이다. 모래하천의 경우 β 의 값은 1.5 - 3.0 사이로 알려져 있다(Woo and Yu 1993).

Fig. 7은 2007년부터 2019년까지 한강 여주지점에서 관측된 유량-총유사량 데이터와 회귀된 관계식을 제시하였다. 연도별 결정계수 R^2 의 값은 0.72에서 0.97 사이로 나타나, 대체로 회귀결과가 양호한 것으로 나타났다. 그림에 제시된 회귀식은 수자원조사기술원의 보고서(Hydrological Survey Center 2007-2020)에 제시된 회귀식과 비슷하거나(2007 - 2009) 거의 동일하다

(2011 - 2019). 유량-유사량 관계에 대한 회귀분석을 다시 수행한 것은 일관된 방법으로 회귀식을 구하고 아래에 제시된 상수 및 지수의 경년변화를 검토하기 위함이다.

Fig. 8은 2007년부터 2019년까지 한강의 여주지점에서 유량-유사량 관계식의 α , β 그리고 결정계수(R^2)의 연도별 변화를 나타내었다. Fig. 8(a)에서 계수 α 값은 $4.1 \times 10^{-5} - 0.258$ 범위에 있으며 연도별로 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다. 계수 β 의 값은 1.55에서 2.73의 범위에 분포하며, 이는 모래하천의 일반적인 범위 1.5 - 3.0에 포함된다. 결정계수 R^2 의 값은 0.72 - 0.97 사이에 있어, 대체로 제시된 식이 자료를 양호하게 회귀하는 것을 나타낸다. 이상의 결과에 따르면 측정자료를 근거한 유량-유사량 관계식은 비교적 높은 결정계수로 회귀되었으나, 상수 및 지수의 변동성이 크기 때문에 수

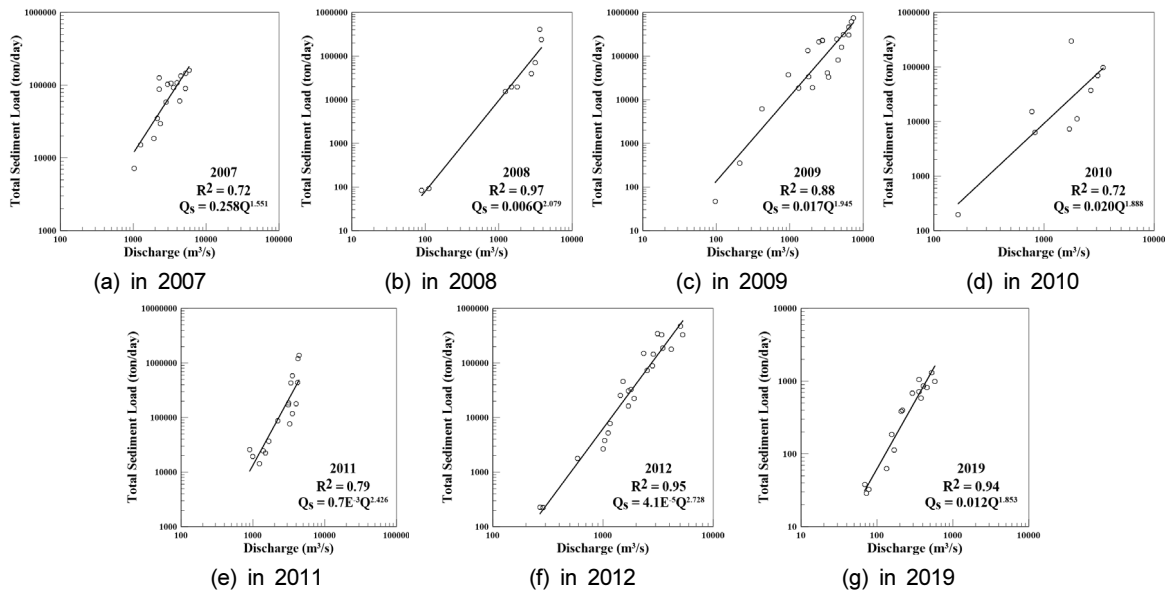


Fig. 7. Total sediment load as a function of water discharge for Han-gang River between 2007 - 2019.

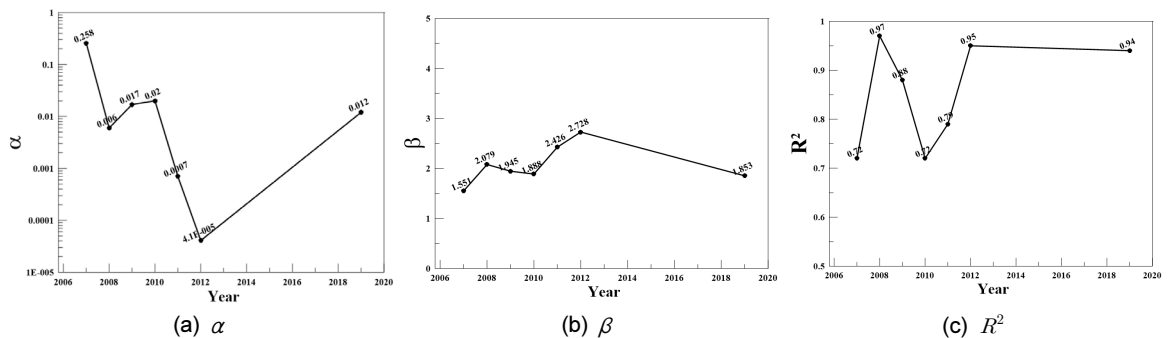


Fig. 8. Change in α , β , R^2 .

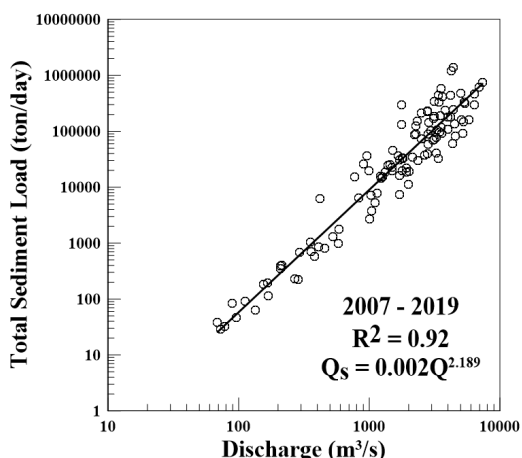


Fig. 9. Total sediment load as a function of water discharge for Han-gang River.

문 특성에 따른 경향성을 보이는 것은 아닌 것으로 판단된다.

2007년부터 2019년까지 연도에 상관없이 Fig. 8의 데이터들을 모아서 유량-유사량 관계를 구축한 것을 Fig. 9에 제시하였다. 분석결과에 따르면 한강 여주지점에서 유량-총유사량 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$Q_s = 0.002Q^{2.189} \quad (\text{Eq. 9})$$

위의 관계식에서 지수 β 는 2.189로서 모래하천의 범위에 있음을 알 수 있다. 그리고 결정계수가 0.92로서 회귀결과가 우수한 것으로 나타났다. 이는 한강 여주지점에서 총유사량이 유량의 제곱 이상으로 증가한다는 것을 의미하며 위의 식은 연도에 상관없이 적용 가능한 것을 의미한다.

4.5 총유사량공식의 선정

여기에서는 EH, AW, YA, BR, KA 공식을 이용하여 총유사량을 예측한 결과를 검토하였으며, 예측의 정확도를 불일치율(Discrepancy Ratio), 기하평균(Geometric Mean: GM), 그리고 기하표준편차(Geometric Standard Deviation: GSD)를 통해 평가하였다.

Fig. 10은 2007년부터 2019년까지 한강 여주지점에서 측정된 총유사량과 유량의 관계를 도시하였다. 그림에서 Fig. 9의 유량-유사량 관계식과 3절에서 소개한 총유사량 공식에 의한 회귀식을 제시하였다. 그림을 보면

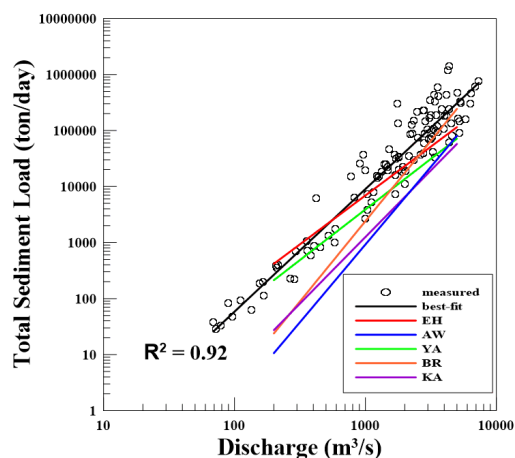


Fig. 10. Application of total sediment load formulas.

EH 공식과 YA 공식은 총유사량을 비교적 정확히 예측한 반면, AW, BR, KA 공식은 저유량 조건에서 총유사량을 심각하게 과소 평가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 11은 각 유사량 공식에 의한 계산된 총유사량의 불일치율 분포를 나타낸다. 그림에 의하면 EH 공식과 YA 공식이 비교적 측정값과 유사하게 예측하는 결과를 보였으며, 불일치율(r)이 0.5 - 2.0 사이에 분포하는 비율은 각각 52%와 42%로 나타났다. 반면, AW, BR, KA 공식은 총유사량을 심각하게 과소평가하는 경향이 있으며 불일치율이 0.5 미만인 경우가 많은 것을 알 수 있다.

Table 1에 5개의 유사량 공식에 대한 기하평균, 기하표준편차, 결정계수를 제시하였다. 기하평균의 경우 EH 공식과 YA 공식이 총유사량을 비교적 잘 예측하는 것으로 보이며, 기하표준편차에 의하면 AW 공식과 BR 공식에 의한 예측 결과에 의한 분산은 큰 것으로 나타났다. Fig. 10에 제시된 유사량 공식의 회귀식에 대한 결정계수는 0.966 - 0.994 사이에 분포하여 그림에 제시된 직선이 유사량 공식을 잘 표현하는 것으로 나타났다.

5. 결론

우리나라 하천에서 본격적인 유사량의 측정은 한국수자원조사기술원이 2006년에 4대강의 유사량 관측소에서 유사량을 측정함으로 시작되었다. 본 연구는 한국수자원조사기술원에서 제공하는 한강 여주 지점의 측정 유사량 자료를 이용하여 유사량의 특성을 조사하는 것이다.

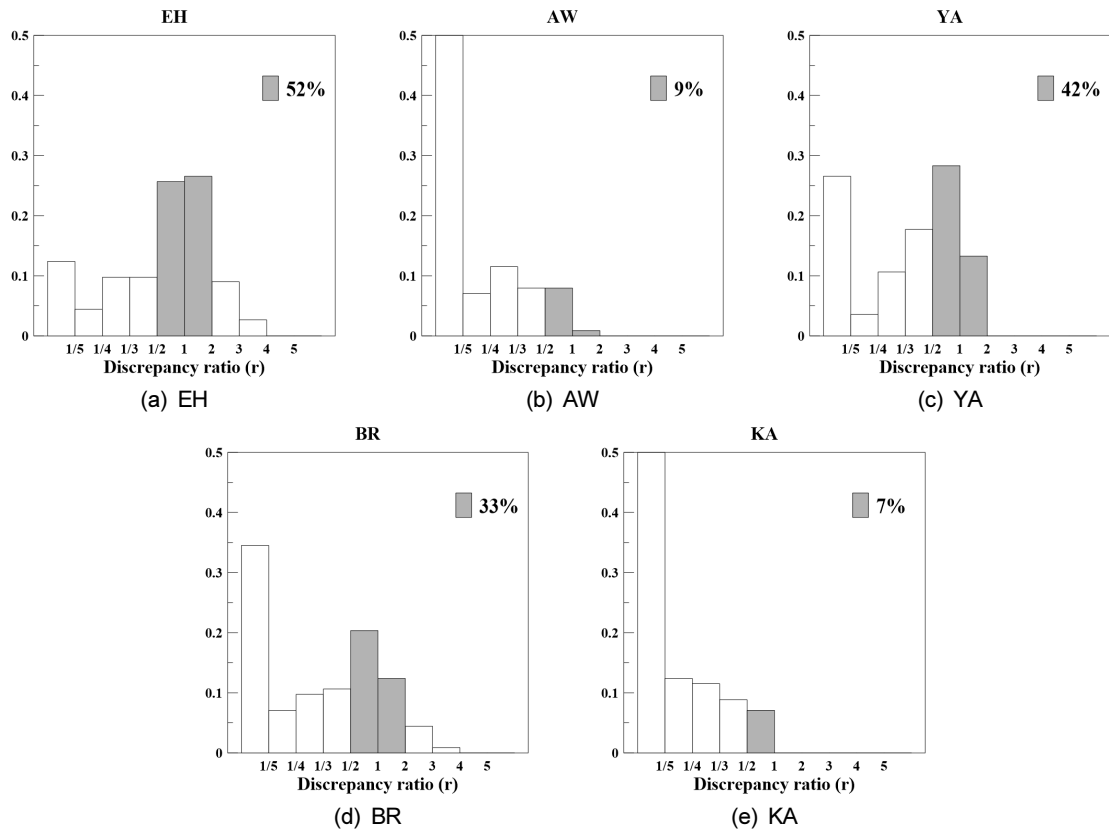


Fig. 11. Discrepancy ratios for total sediment load formulas.

Table 1. Geometric mean, geometric standard deviation, and coefficient of determination for various formulas

	EH	AW	YA	BR	KA
GM	0.65	0.11	0.37	0.29	0.15
GSD	1.49	1.65	1.46	1.76	1.41
R^2	0.994	0.992	0.993	0.966	0.992

먼저 2006년부터 2019년까지 시간 경과에 따른 하상토 분포의 변화를 살펴보았다. 측정자료에 따르면 하상토 분포의 경년변화는 크지 않은 것으로 나타났으며 평균입径의 변화는 크지 않으나 서서히 증가하는 양상을 보였다. 그러나 분급계수는 뚜렷하게 증가하는 양상을 보여 하상의 장갑화가 진행되고 있음을 알 수 있었다.

다음으로 2007년 홍수 전후의 하상토의 횡방향 분포 특성을 살펴보았다. 홍수 전 하상토의 횡방향 분포는 매우 균일함을 보여 홍수 전에는 단면의 어느 지점에서 측정해도 비슷한 분포를 얻을 수 있음을 보였다. 그러나 홍수 이후에는 최심부를 기준으로 좌우측에 각각 세립토와 조립토가 퇴적되는 결과를 얻었다. 또한 홍수 전후

단면 평균된 하상토의 분포를 비교하여 홍수량 유과에 따른 하상토의 변화는 유역의 유사 특성, 하도 단면의 특성, 그리고 유량의 규모 등에 관계하는 것으로 판단하였다.

한강 여주지점의 측정자료를 이용하여 연도별 유량-유사량 관계를 구축하였다. 회귀된 상수와 지수의 범위는 각각 $4.1 \times 10^{-5} - 0.258$ 와 $1.55 - 2.73$ 으로 나타났다. 회귀분석에 의한 결정계수의 범위는 $0.72 - 0.97$ 로서 구축된 관계식의 회귀결과가 양호한 것으로 나타났다. 그러나 각 연도에 구축된 관계식의 상수 및 지수가 일관성 혹은 경향성을 보이지 않아 유역 및 지점에 따른 수문 특성을 반영한다고 하기 어려울 것으로 판단된다. 동일한 기간에 전체 데이터의 회귀분석을 실시한 결과, $Q_s = 0.002Q^{2.189}$ 를 얻었으며 이에 대한 결정계수는 0.92 로서 연도에 상관없이 이 관계식을 적용할 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 하천의 총유사량 예측에 많이 사용되는 5개 공식을 선정하여 적용해 보았다. 적용된 공식은

Engelund-Hansen 공식, Ackers-White 공식, Yang 공식, Brownlie 공식, 그리고 Karim 공식이다. 각 공식의 정확도를 판단하기 위하여 불일치율, 기하평균, 그리고 기하표준편차를 계산하였다. 적용 결과에 따르면 한강 여주시점에서 총유사량의 예측은 Engelund-Hansen 공식이 가장 잘 예측하였으며 다음으로 Yang 공식이 비교적 정확한 결과를 나타냈다.

이상의 결과에 의하면 한강 여주시점의 총유사량은 유량의 2.189승에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 분석결과는 기후변화에 의해 홍수량이 증가할 경우 총유사량의 증가를 예측할 수 있어 하천관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

한강 여주시점에서 제시된 유량-총유사량 관계식은 연도에 관계없이 적용 가능할 정도로 높은 결정계수 (0.92)를 가지며, 장래 홍수 예측 및 유사이송량 산정 시 기준 관계식으로 활용 가능하다. 또한, EH 및 YA 공식이 현장 측정값과 가장 유사한 경향을 보여, 향후 유사량 측정이 어려운 지점에 대한 경험적 예측에 우선 적용 가능한 기준공식으로 제안할 수 있다. 이러한 결과는 총유사량 산정 기준의 표준화 및 하천관리 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

This work was supported by the Ministry of Environment (MOE), Korea, through the 2023 project titled “Development of Standard Procedures for Riverbed Variation Investigation.”

References

- Ackers, P. and White, W.R. 1973. Sediment transport: New approach and analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers 99: 2041-2060.
- Boukhrissa, Z.A., Khanchoul, K., Le Bissonnais, Y., and Tourki, M. 2013. Prediction of sediment load by sediment rating curve and neural network (ANN) in El Kebir catchment, Algeria. *Journal of Earth System Science* 122(5): 1303-1312.
- Brownlie, W.R. 1981. Prediction of Flow Depth and Sediment Discharge in Open Channels. Report No. KH-R-43A, Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
- Choi, S.U. and Lee, J. 2015a. Assessment of total sediment load in rivers using lateral distribution method. *Journal of Hydro-environment Research* 9: 381-387.
- Choi, S.U. and Lee, J. 2015b. Prediction of total sediment load in sand-bed rivers in Korea using lateral distribution method. *Journal of the American Water Resources Association* 51: 214-225.
- Engelund, F. and Hansen, E. 1967. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Hydrological Survey Center. 2007. Hydrological Annual Report in 2006. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2008. Hydrological Annual Report in 2007. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2009. Hydrological Annual Report in 2008. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2010. Hydrological Annual Report in 2009. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2011. Hydrological Annual Report in 2010. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2012. Hydrological Annual Report in 2011. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2013. Hydrological Annual Report in 2012. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea.
- Hydrological Survey Center. 2020. Hydrological Annual Report in 2019. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea.
- Jang, E.K. and Ji, U. 2021. Sediment load characteristics in South Korean rivers and assessment of sediment transport formulas. *KSCE Journal of Civil Engineering* 25(8): 2875-2885.
- Jeong, D.I., Stedinger, J.R., Sung, J.H., and Kim, Y.O. 2008. Flood risk assessment with climate change. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B* 28: 55-64. (in Korean)
- Karim, F. 1998. Bed material discharge prediction for nonuniform sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers 124: 597-604.
- McLean, S.R., Wolfe, S.R., and Nelson, J.M. 1999. Spatially averaged flow over a wavy boundary revisited. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104(C7): 15743-15753.
- Rankl, J.G. 2004. Relations between total-sediment load and peak discharge for rainstorm runoff on five ephemeral streams in Wyoming. U.S. Geological Survey

- Water-Resources Investigations Report 2002-4150, p.16.
- Seo, S.D., Kim, H.G., and Woo, H.S. 1996. Estimation of sediment load by depth integration method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 38: 1-8. (in Korean)
- Woo, H.S. 2001. *River Hydraulics* (1st ed.). Cheongmoon-Gak, Seoul, Korea. (in Korean)
- Woo, H.S. and Yu, K.K. 1993. *International Hydrological Programme (IHP) Research Report*. Ministry of Construction, Korea. (in Korean)
- Wu, W. 2008. *Computation River Dynamics*. Taylor & Francis, London, United Kingdom.
- Yang, C.T. 1979. Unit stream power equations for total load. *Journal of Hydrology* 40: 123-138.
- Yang, C.Y. and Julien, P.Y. 2019. The ratio of measured to total sediment discharge. *International Journal of Sediment Research* 34(3): 262-269.