



# Characteristics of total sediment loads in the Nakdong-gang River, Geum-gang River, Yeongsan-gang River, and Seomjin-gang River

Kim, Daeon<sup>a</sup> · Kim, Changsung<sup>b</sup> · Woo, Hyoseop<sup>c</sup> · Choi, Sung-Uk<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Senior Researcher, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey, Goyang, Korea

<sup>c</sup>Visiting Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Paper number: 25-144

Received: 5 December 2025; Revised: 6 February 2026; Accepted: 9 March 2026

## Abstract

Prediction of sediment load in rivers provides important information for river management, the safety of instream installations, and aquatic organism habitats. Global climate change increases floods in rivers, and sediment loads are also increasing significantly. This requires careful management in response to changes in the river environment. Meaningful measurement of the sediment load in rivers in Korea began in the 2000s by Hydrological Survey Center. However, studies on the analysis and evaluation of sediment load in rivers are rare. This study investigates the characteristics of sediment loads in four rivers in Korea, namely Nakdong-gang River, Geum-gang River, Yeongsan-gang River, and Seomjin-gang River. The analysis was conducted based on field data on discharge, sediment load, and bed sediment obtained by Hydrological Survey Center from 2007 to 2023. The annual changes in the distribution of bed sediment, median particle size, and sorting coefficient are examined. Based on measured sediment load data, annual sediment rating curves and an integrated sediment rating curve for the entire period are presented. Five commonly used total sediment load formulas are applied, and the most appropriate formula for each river is selected.

**Keywords:** Total sediment load, Bed sediment, Sediment transport, Sediment rating curve, Total sediment load formula

## 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강의 총유사량 특성

김도연<sup>a</sup> · 김창성<sup>b</sup> · 우효섭<sup>c</sup> · 최성욱<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>연세대학교 건설환경공학과 석사과정, <sup>b</sup>한국수자원조사기술원 연구개발실 선임연구원,

<sup>c</sup>연세대학교 건설환경공학과 객원교수, <sup>d</sup>연세대학교 건설환경공학과 교수

## 요지

하천에서 유사량의 예측은 하천관리, 하천 시설물의 안전, 수생물 생태서식처 유지관리 등에 있어 매우 중요한 정보를 제공한다. 전 지구적인 기후 변화로 하천에서 홍수량이 증가하고 있으며, 이에 따라 유사량도 크게 증가할 것으로 전망된다. 이와 같은 하천환경 변화에 따라 세심한 하천관리가 필요하다. 우리나라 주요 하천에서 유의미한 유사량의 측정은 2000년대에 들어와서 한국수자원조사기술원에 의해 시작되었다. 그러나 측정된 유사량 자료의 분석이나 예측에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 우리나라의 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강의 4개 하천의 주요 지점에서 총유사량의 특성을 검토하였다. 한국수자원조사기술원에서 2007-2023년 동안 현장에서 취득한 유량, 유사량, 그리고 하상토 자료에 근거하여 분석을 수행하였다. 하상토 분포, 중앙입경, 그리고 분급계수의 경년변화를 살펴보았다. 그리고 총유사량 실측자료를 기반으로 연도별 유량-총유사량 관계식을 제시하였으며 전체 실측기간에 걸친 통합 관계식도 제시하였다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 5개의 총유사량 공식을 적용하여 각각의 하천에 적합한 공식을 제시하였다.

**핵심용어:** 총유사량, 하상토, 유사이송, 유량-총유사량 관계식, 총유사량 공식

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2797

E-mail: schoi@yonsei.ac.kr (Choi, Sung-Uk)

### 1. 서론

최근 우리나라의 하천에서 유사량의 증가는 가시적이다. 홍수기 도시에서 외수범람이 발생하면 예외 없이 도심에 토사에 의한 피해가 발생하고 있다. 2019년 10월 3일 태풍 미탁이 내습하여 시간당 130 mm의 호우가 발생하면서 삼척 시내가 침수되었다. Fig. 1은 삼척시 원덕읍 임원리 인근 임원천이 범람하면서 유사가 유입되어 시가지가 물이 빠진 후 토사의 퇴적이 발생한 사진이다.

전 지구적인 기후변화로 인하여 강우가 집중적으로 발생하고, 이는 하천의 유사량이 증가하게 하는 직접적인 요인을 제공한다. 한편, 기후변화에 따라 하도에서 식생 피복의 면적이 증가하고 있으며(Lee *et al.*, 2019), 이와 같은 하천환경 변화에 따라 하천에서의 유사량도 괄목할 만하게 변화하고 있다. 기후변화뿐 아니라 인위적인 하천개발도 유역의 수문현상에 영향을 주어 하천의 유사량 변화를 유도하고 있다.

하천에서의(단위 폭당) 유사량  $q_s$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$q_s = \int_0^H \bar{c} u dz \tag{1}$$

여기서  $z$ 는 바닥으로부터의 수직거리,  $H$ 는 수심,  $\bar{c}$ 는 시간평균 부유사 농도, 그리고  $u$ 는 시간평균 유속이다. 일반적으로 하천에서 바닥부근에 이동하는 소류사는 측정이 어렵기 때문에 미측정 유사에 해당된다. 부유사의 경우 D-74와 같은 측정장비를 이용하여 부유사 농도를 측정하면 자유수면과 바닥부근에서 측정이 불가능하다. 이를 보완하기 위해 수정 아인



Fig. 1. Urban street covered by sediment after the flood (Kangwon-ilbo, 2019)

슈타인 절차 (Modified Einstein Procedure, MEP)를 이용하여 바닥부근의 미측정 부유사량과 소류사량을 추정하여 총유사량을 산정한다. Woo and Yu (1990)는 측정된 부유사 분포를 이용하여 총유사량을 추정하는 수정 아인슈타인 절차를 소개하고 적용사례를 제시하였다.

하천에서 유사량 측정에 관한 해외 연구사례로서, Asselman (2000)은 하구와 인접한 저지대 하천에서 세류사의 양이 많은 것을 주목하여 기존의 최소제곱법에 의한 유량-유사량 관계식이 10-50% 가량 유사량을 과소 예측한다고 지적하였다. 그는 보정계수의 도입과 비선형 최소제곱법을 이용하여 유사량 예측에서 정확도를 향상시켰다. Lu *et al.* (2010)은 대만의 하천에서 프로펠러형 유속계 및 ADCP, 그리고 휴대용 부유사 측정기를 이용하여 유속과 부유사 농도를 측정하였다. 그들은 유사농도가 낮은 경우 통상 사용하는 유사량 공식이 유사량을 적절하게 산정하지만, 유사농도가 1,000 ton/day-m를 초과하는 경우 유사량을 과소 산정하는 것을 확인하였다. Tfwala and Wang (2016)은 유량-유사량 관계식과 ANN 기법을 이용하여 대만의 하천에서 유사량을 예측하였다. 그들은 ANN 기법이 유량-유사량 관계식보다 유사량을 잘 예측하는 것을 확인하였으며 유량-유사량 관계식이 유사량의 침투값을 47% 과소 산정하는 것을 보였다.

우리나라의 하천에서 유사량에 대한 연구사례는 많지 않다. Woo and Yu (1989)는 하천에서 많이 사용되는 9개의 유사이송 공식을 비교 분석하여 12가지 선정기준을 제시하였다. 유량-총유사량 관계식이 있는 경우 우선적으로 사용하며, 총유사량 공식은 참고적으로 이용하는 것을 권장하였다. 많이 사용되고 있는 9개의 총유사량 공식을 비교 분석하여, Engelund-Hansen 공식과 Ackers-White 공식이 중규모 이하의 하천에 적절하고 van Rijn 공식이 중규모 이상의 하천에 적절한 것을 보였다. Suh *et al.* (1996)은 우리나라 하천의 유사량은 대부분 홍수시에만 유의미하며, 대부분의 유사는 부유사 형태로 이송된다고 보고한 바 있다. 즉, 홍수기 우리나라 모래하천에서 유사는 대부분이 부유사이며 소류사량을 산정하는 것은 큰 의미가 없음을 주장하였다.

Shin *et al.* (2007)은 임진강의 3개 지점에서 부유사 농도를 측정하여 MEP를 통해 유사량을 산정하고 유량-유사량 관계식을 구축하였다. 그리고 6개의 총유사량 공식을 이용하여 적용 가능성을 검토하였는데, Engelund-Hansen 공식이 전체적으로 실측치와 유사한 값을 나타내는 것을 확인하였다. 유량이 200 m<sup>3</sup>/s 이하의 경우에는 Shen & Hung 공식이 적합하며, 200 m<sup>3</sup>/s 이상인 구간에는 Ackers-White 공식과 van Rijn 공식이 상대적으로 적합한 것을 보였다. Kang *et al.* (2013)은 경기북

부의 중소하천에서 유량 및 유사량을 측정하여 유량-유사량 관계식을 제시하였다. 측정된 부유사 농도로부터 BORAMEP (Bureau of Reclamation Automated Modified Einstein Procedure) 프로그램을 사용하여 총유사량을 산정하였다. 3개의 총유사량 공식을 적용한 결과,  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  이하의 유량에서는 Yang 공식이, 이상의 유량에서는 Shen & Hung 공식이 총유사량을 잘 예측하는 것으로 확인하였다. Lee and Kim (2016)은 논산천 수계 국가 및 지방하천 7개 지점에서 유량과 부유사 농도를 측정하여 유량-유사량 관계식을 제시하였다. 특별히 홍수기와 평/갈수기로 구분하여 부유사 농도를 실측하였으며 BL-84를 이용하여 소류사를 직접 측정하였다.

이상과 같이 우리나라의 중소규모의 하천에서 유사량 측정 및 특성 분석에 관한 연구는 종종 있으나 주요 하천에서 유사량의 특성과 경년 변화에 대한 연구는 없다. 최근 Kim and Choi (2025)는 2007년부터 2019년까지 수자원조사기술원의 자료를 이용하여 한강의 여주지점에서 총유사량 특성을 조사하였다. 본 논문은 Kim and Choi (2025)의 후속 연구로서 우리나라의 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강에서 총유사량의 특성을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 먼저, 각 하천의 주요 지점에서 하상토의 분포, 중앙입경, 분급계수의 변화를 살펴보았다. 보고서에 수록된 총유사량 자료를 이용하여 연도별 유량-총유사량 관계식을 구축하였으며, 회귀식의 상수와 지수에 대하여 경년변화를 검토하였다. 그리고 각 하천에 대하여 전체 유사량 측정기간에 걸친 통합 유량-총유사량 관계식도 제시하였다. 마지막으로 많이 사용되고 있는 5개 총유사량 공식을 적용하여 각 하천에서 측정자료 대비 적절한 공식을 추천하였다.

## 2. 연구대상 하천 및 유사량 자료 수집

### 2.1 연구대상 하천

연구대상 하천은 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강이며 각각의 하천에서 유량 및 부유사 농도를 측정된 지점은 왜관, 공주, 나주, 그리고 구례지점이다. 일반적으로 부유사 농도 측정을 위한 채수지점은 지리적/수리학적으로 적합한 조건을 갖추어야 한다(Woo et al., 2015). 즉, 지점을 포함한 하도가 비교적 직선형이며, 단면이 안정적으로 유지되어 유속과 부유사 농도의 횡단분포가 크게 다르지 않아야 한다.

본 연구에서 추가로 고려한 사항은 다음과 같다. 첫째, 장기 관측자료가 축적된 수문조사 지점을 선정하였다. 자료가 장기간 축적되어 있어 연도별 유량-유사량 관계식의 분석과 장기 경향 분석이 가능한 지점을 선정하였다. 둘째, 모래하천의 특성을 나타내는 대표 지점을 선정하였다. 선정된 지점 모두

자갈보다 모래가 우세하게 분포하는 전형적인 모래하천 구간으로, 부유사가 유사이송의 대부분을 차지하는 국내 하천의 특성을 잘 반영하도록 하였다.

#### 2.1.1 낙동강

낙동강의 왜관(철교)지점은 칠곡보 하류 약 1.8 km에 위치하고 있다(Fig. 2). 왜관지점에서 하폭은 697.2 m이고 하상경사는 0.00030이다. 상류 보에 의한 수문 조절에 일부 영향을 받으며, 하도는 직선하도로 유지되고 단면은 복단면 형태를 보인다. 하상재로는 자갈보다 모래가 우세하게 분포한다. 또한, 유사량 측정을 위한 자료가 장기간 축적되어 있고 낙동강 중상류 구간의 대표 지점이다.

#### 2.1.2 금강

금강의 공주(대교)지점은 상류 약 5.0 km에 자동유량관측소가 있으며, 하류 약 3.19 km에는 공주보가 위치하고 있다(Fig. 2). 공주지점의 하폭과 하상경사는 각각 521.2 m와 0.00025이다. 하도는 직선하도이며, 단면은 복단면 형태를 보인다. 하상재로는 자갈보다 모래가 우세하게 분포하고 있으며, 오랜 기간에 걸쳐 측정 유사량 자료가 축적되어 있어 금강 유역의 대표적인 지점으로 유사량의 특성을 분석하기에 적합하다.

#### 2.1.3 영산강

영산강의 나주(대교)지점은 상류 약 3.5 km에 승촌보, 하류 약 14.8 km에 죽산보가 위치하여 상하류 방향에서 수문 조절의 영향을 받는 구간이다(Fig. 2). 나주지점의 하폭은 641.7 m이고 하상경사는 0.00044이다. 하도는 상류에서 하류 방향으로 진행할수록 좌측으로 만곡부가 형성되어 있으며, 단면은 복단면 형태를 보인다. 하상재로는 자갈보다 모래가 우세하게 분포하고 있으며, 점채취법 등을 통해 다년간 유사량 자료가 축적되어 있어 영산강 유역의 대표적인 지점으로서 유사이송 특성을 분석하기에 적절하다.

#### 2.1.4 섬진강

섬진강의 구례(교)지점은 상류에 위치한 섬진강댐, 주암댐, 동화댐의 방류로 인한 영향을 받는다(Fig. 2). 구례지점에서 하폭과 하상경사는 각각 298.0 m와 0.00079이다. 하류 약 750 m에는 황진천이 합류하며, 상류의 댐과 하류의 합류점에 의해 영향을 받는 위치에 있다. 하도는 상류 구간에서 직선으로 형성되어 있으며, 하류로 갈수록 만곡부가 일부 포함되어 있다. 하상재로는 자갈보다 모래가 우세하며, 오랜 기간 유사량 자료가 축적되어 있어 섬진강 유역에서 유사이송 특성을 분석하기에 적합하다.

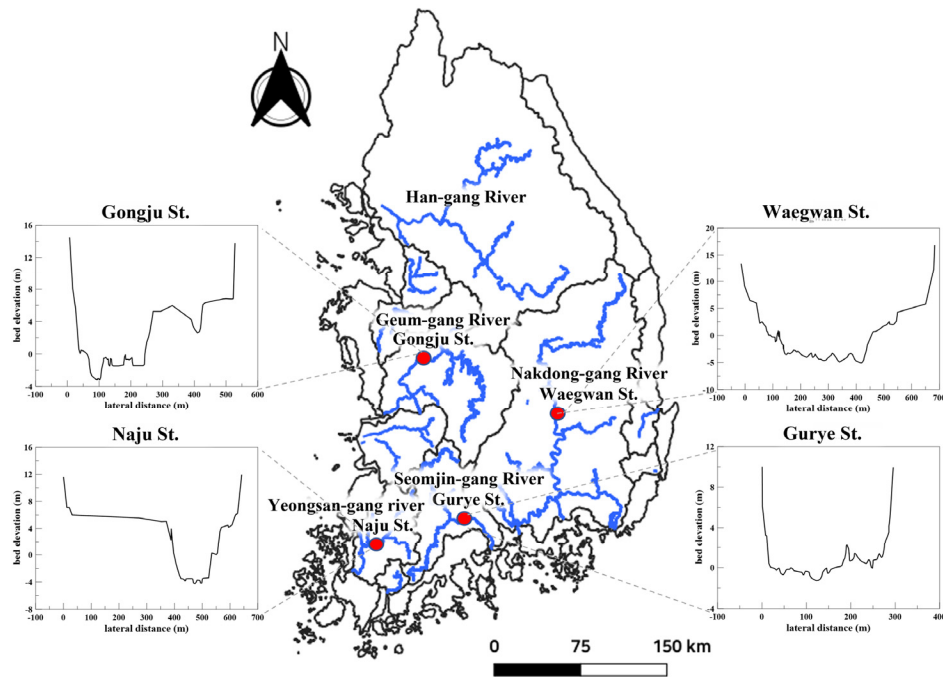


Fig. 2. Study sites

### 2.2 유사량 자료의 수집

본 연구에서는 한국수자원조사기술원 보고서(KIHS, 2008-2024)의 유사량 자료를 이용하였다. 유량 측정을 위하여 평수기와 저수기에는 프라이스 유속계를 사용하였으며, 홍수기에는 부자식 유속계를 사용하였다. 부유사는 주로 D-74 채취기를 이용하여 왕복수심적분법으로 채수하였고, 일부 구간에서는 표면채수법이 병행되었다. 하상토는 BM-54와 Grab Sampler를 이용하여 채집하였고 점채취법 또는 면채취법을 통해 분석하였다.

낙동강 왜관지점은 7개 측선에서 부유사를 채취하였으며, 점채취법을 이용하여 하상토를 채취하였다. 금강 공주지점은 5-7개 측선에서 부유사를 채취하였으며, 하상토는 면채취법을 적용하였다. 영산강 나주지점은 5개 측선에서 부유사를 채취하였고, 하상토는 면채취법으로 조사하였다. 섬진강 구례지점은 5개 측선에서 부유사를 채취하고, 하상토는 점채취법을 적용하였다. 총유사량 산정은 측정된 부유사 농도를 기반으로 하여 MEP를 적용하여 미측정 부유사량 및 소류사량을 추정하였다.

## 3. 하상토 분석

### 3.1 낙동강 왜관지점

Fig. 3(a)는 2012년부터 2021년까지 낙동강 왜관지점에서

하상토의 입도분포를 도시한 것이다. 하상토는 매우 잔모래(very fine sand)인 0.1 mm부터 굵은자갈(coarse gravel)인 30 mm 이상까지 넓은 범위에 분포하고 있다. 입도분포는 연도별로 상이한 양상을 보이며, 특히 2012년의 경우 입자가 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 입도분포 곡선의 전반적인 형태는 모래하천에서 흔히 관찰되는 급한 S자 형태가 아닌 완만한 경사를 보이는데, 이는 해당 지점에 모래와 자갈이 혼재된 것을 의미한다.

Fig. 3(b)는 2011년부터 2021년까지 낙동강 왜관지점에서 측정된 하상토 중앙입경의 경년변화를 나타낸 것이다. 중앙입경은 2010년부터 2013년까지 1 mm 이하의 굵은 모래였으나, 2014년 급격한 증가를 보이며 이후에는 서서히 줄어드는 양상을 보이다가 2021년에 중앙입경은 1 mm 수준으로 회귀하였다. 이러한 변화는 4대강사업(2009-2012)에 의한 결과로 추정된다. 즉, 하상굴착으로 모래와 자갈 등이 노출된 후, 초기에 모래 같은 작은 입자는 흐름에 지속적으로 유실되어 자갈 같은 큰 입자들만 남았다가 일정 기간 후 상류에서 유입된 작은 입자들이 다시 퇴적되었기 때문으로 추정된다. 다만 이에 대한 구체적인 조사는 수행하지 않았다.

Fig. 3(c)는 2012년부터 2021년까지 낙동강 왜관지점에서 하상토 분급계수( $S_0$ )의 경년변화를 도시한 것이다. 일반적으로 자연하천에서 분급계수는 2.0-4.5의 값을 보이며 작을수록 입자가 균일한 것을 나타낸다. 분급계수는 2012년 1.8에서 시

작하여 2014년에 5.3까지 급격히 증가하였다. 분급계수의 급격한 증가는 위에서 설명한 대로 4대강사업에 따른 영향으로 추측되며, 이후에 진동하지만 서서히 감소하는 경향을 보인다.

### 3.2 금강 공주지점

Fig. 4(a)는 2007년부터 2019년까지 금강의 공주지점에서 측정된 하상토 입도분포를 도시한 것이다. 하상토는 매우 잔 모래(very fine sand)인 0.1 mm부터 굵은자갈(coarse gravel)인 30 mm 이상까지 넓은 범위에 분포하고 있다. 입도분포는 2009년과 2019년을 제외하면 비슷한 양상을 보이며, 2009년과 2019년의 경우 상대적으로 조립토로 구성되어 있음을 알 수 있다. 2009년과 2019년 입도분포를 제외하면 하상토 입도 분포의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 4(b)는 2007년부터 2019년까지 금강 공주지점에서 측정된 하상토 중앙입경의 경년변화를 나타낸 것이다. 하상토는 모래로서 중앙입경이 대체로 1 mm 내외이나, 2009년에는

중앙입경이 다른 해에 비해 현저히 커서 약 8 mm 정도를 나타냈다. 2009년은 4대강사업이 시작된 해로서 이 사업으로 인한 일시적인 영향으로 추정된다.

Fig. 4(c)는 2007년부터 2019년까지 금강 공주지점에서 측정된 하상토 분급계수의 경년변화를 나타낸 것이다. 그림에 제시된 분급계수에 의하면 일정한 경향성 없이 증가와 감소를 반복하는 것으로 보이나, Fig. 4(a)의 입도분포를 보면 2009년과 2019년의 경우 상대적으로 입자가 조립화되고 분포의 범위가 넓어지면서 분급계수가 급격히 증가한 것으로 보인다. 이는 인위적인 하천개발의 영향으로 추정된다.

### 3.3 영산강 나주지점

Fig. 5(a)는 2010년부터 2023년까지 영산강 나주지점에서 측정된 하상토 입도분포를 도시한 것이다. 그림의 입도분포는 앞의 낙동강 및 섬진강의 경우에 비해 변화 폭이 매우 큰 것으로 나타났다.

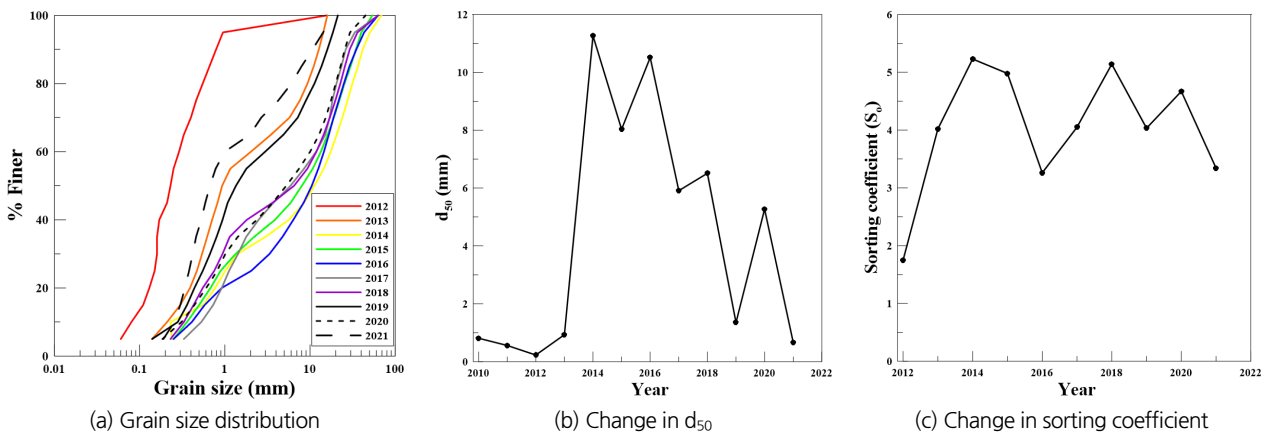


Fig. 3. Change in bed sediment in Nakdong-gang River

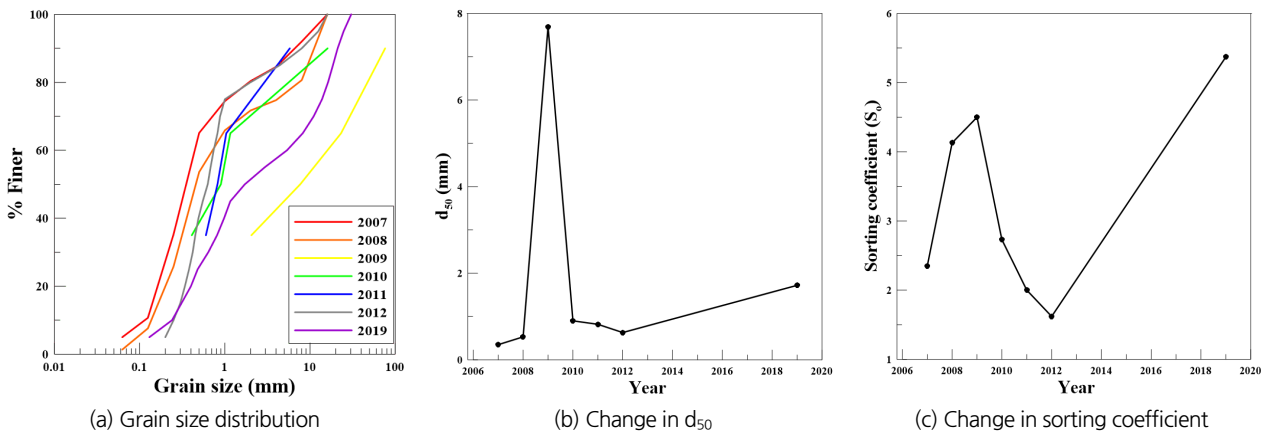


Fig. 4. Change in bed sediment in Geum-gang River

Fig. 5(b)는 2010년부터 2023년까지 영산강 나주지점에서 측정된 하상토 중앙입경의 경년 변화를 나타낸 것이다. 중앙입경은 2010년 8.1 mm에서 시작하여 2011년에 38.05 mm까지 급격히 증가하나, 2023년에 0.62 mm로 감소하였다. 이러한 하상토 입경의 급격한 변동은 앞의 세 개의 하천과 같이 4대강사업의 영향으로 추정된다. 2024년 수문조사보고서에 따르면 영산강의 동일 지점에서 2024년 홍수 전후 하상토 중앙입경의 평균값은 약 2.3 mm로 조사되어 있다.

Fig. 5(c)는 2012년부터 2023년까지 영산강 나주지점에서 측정된 하상토 분급계수의 경년변화를 도시한 것이다. 분급계수가 2012년에는 약 2.7 수준으로 비교적 균일한 입도 분포를 보였으나, 이후 급격히 증가하였다가 감소하여 2020년 이후 1.6 정도로 작아졌다. 특히 2014-2019년 분급계수의 변화는 4대강사업에 따른 결과로 추정되며, 이는 Figs. 5(a) and 5(b)에서 나타난 변동성과 관련 있는 것으로 판단된다.

### 3.4 섬진강 구례지점

Fig. 6(a)는 2010년부터 2021년까지 섬진강 구례지점에서 하상토의 입도분포를 도시한 것이다. 하상토는 매우 잔모래(very fine sand)인 0.1 mm부터 굵은자갈(coarse gravel)인 30 mm 이상까지의 넓은 범위를 포함하고 있다. 그림에서 입도분포는 연도별로 비슷한 양상을 보인다. 즉, 입도분포 곡선은 급한 S자 형태를 보이며, 이는 해당 지점이 비교적 균일한 모래로 구성되어 있음을 의미한다. 그러나 현장 실측자료의 수가 제한적임에 유의할 필요가 있다.

Fig. 6(b)는 2010년부터 2021년까지 섬진강 구례지점에서 측정된 하상토 중앙입경의 경년변화를 나타낸 것이다. 하상토의 중앙입경은 2010년부터 2020년까지 1.5 mm 이하의 잔모래이나, 2021년에는 약 2 mm로 증가하였다. 예상대로 연도별로 큰 폭의 변동성은 없으며, 섬진강 구례지점은 하상토가 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 2017년부터 2021년까지 섬진강 구례지점에서

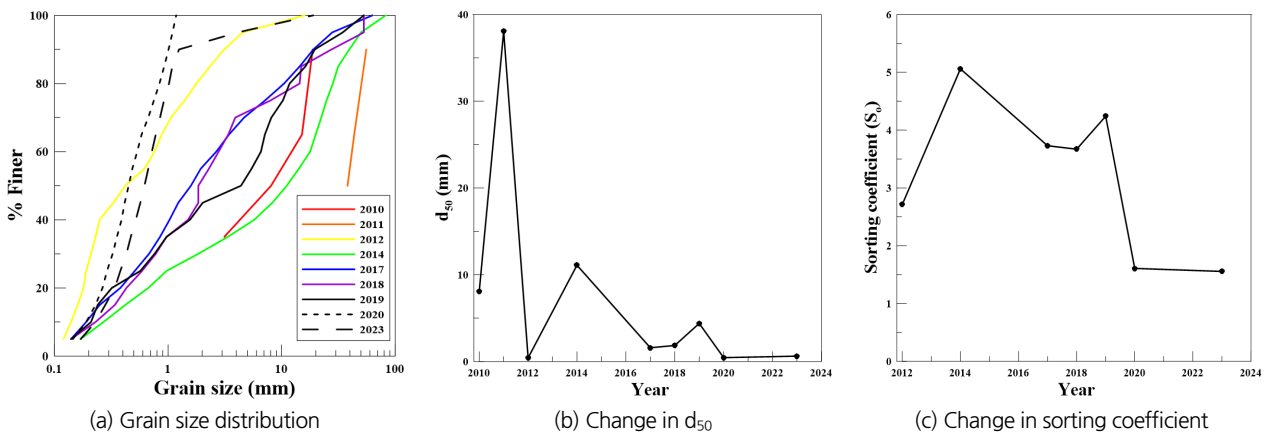


Fig. 5. Change in bed sediment in Yeongsan-gang River

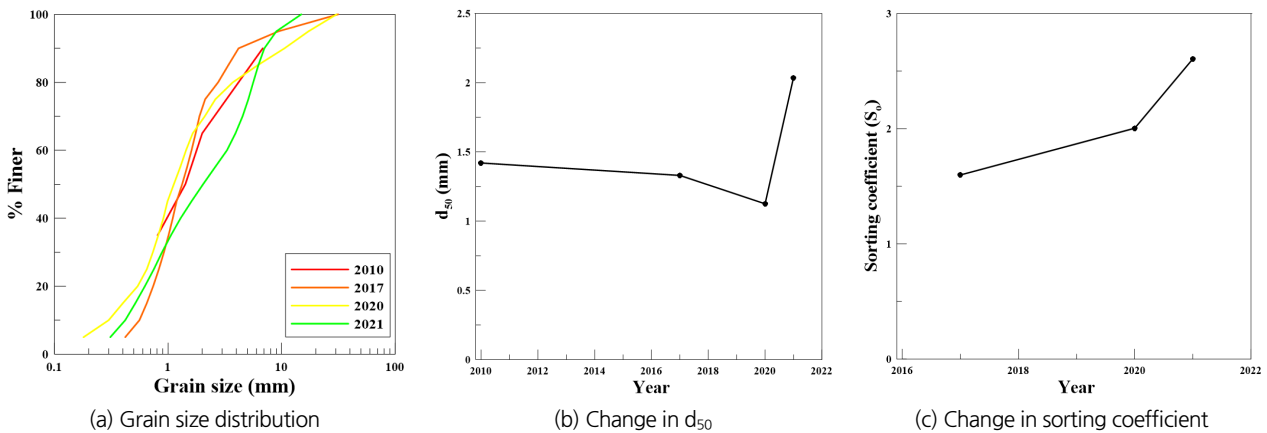


Fig. 6. Change in bed sediment in Seomjin-gang River

측정된 하상토 분급계수의 경년변화를 도시한 것이다. 분급 계수는 2017년 1.6에서 2021년에 2.6으로 증가하여 하상토 입자의 구성이 약간 다양해진 것으로 나타났다.

한편, 한강의 여주지점에서 하상토의 경년변화는 Kim and Choi (2025)에 제시되어 있으며, 낙동강 왜관지점, 금강의 공주지점, 그리고 영산강의 나주지점과 같이 4대강사업에 따른 인위적인 하천개발의 영향은 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

### 4. 유량-총유사량 관계식

유량-총유사량 관계식은 실무에서 수위-유량 관계식과 함께 하천에서 총유사량을 예측하는 데 널리 사용된다. 전술한 바와 같이, Woo and Yu (1989) 그리고 Woo *et al.* (2015)은 다른 어떤 방법보다도 측정자료에 기반한 유량-총유사량 관계식을 우선 사용할 것을 권장하고 있다. 일반적으로 유량-총유사량 관계식은 다음과 같은 지수함수 형태로 표현된다.

$$Q_s = \alpha Q^\beta \tag{2}$$

여기서  $Q_s$ 는 총유사량 [ton/day],  $Q$ 는 유량 [ $m^3/s$ ]이다. 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 상수 [kg/s]와 지수 [무차원]이며, 지수는 일반적으로 0.5-3.0 사이의 값을 갖는다. Woo and Yu (1993)에 따르면 모래하천에서 지수  $\beta$ 의 값은 1.5-3.0 사이에 있다.

Peters-Kummerly (1973)에 의하면 상수  $\alpha$ 는 유역의 침식성(erosibility)과 관계있으며 유역에서 값이 클 경우 지질학적으로 침식이 잘되는 토양으로 구성된 것을 의미한다. 지수  $\beta$ 는 하천의 침식성과 이송능력(transportation capacity)을 나타내는데 유량이 조금 증가해도 유사량은 크게 증가할 수 있음을 의미한다. 그 밖에도 지수  $\beta$ 는 강우사상, 수문곡선의 상승 및 하강 특성, 유역 표면의 습윤(젖은) 상태, 그리고 유사 추가 공급 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Efthimiou, 2019).

#### 4.1 낙동강 왜관지점

본 연구에서 이용한 낙동강 왜관지점의 유사량 측정자료는

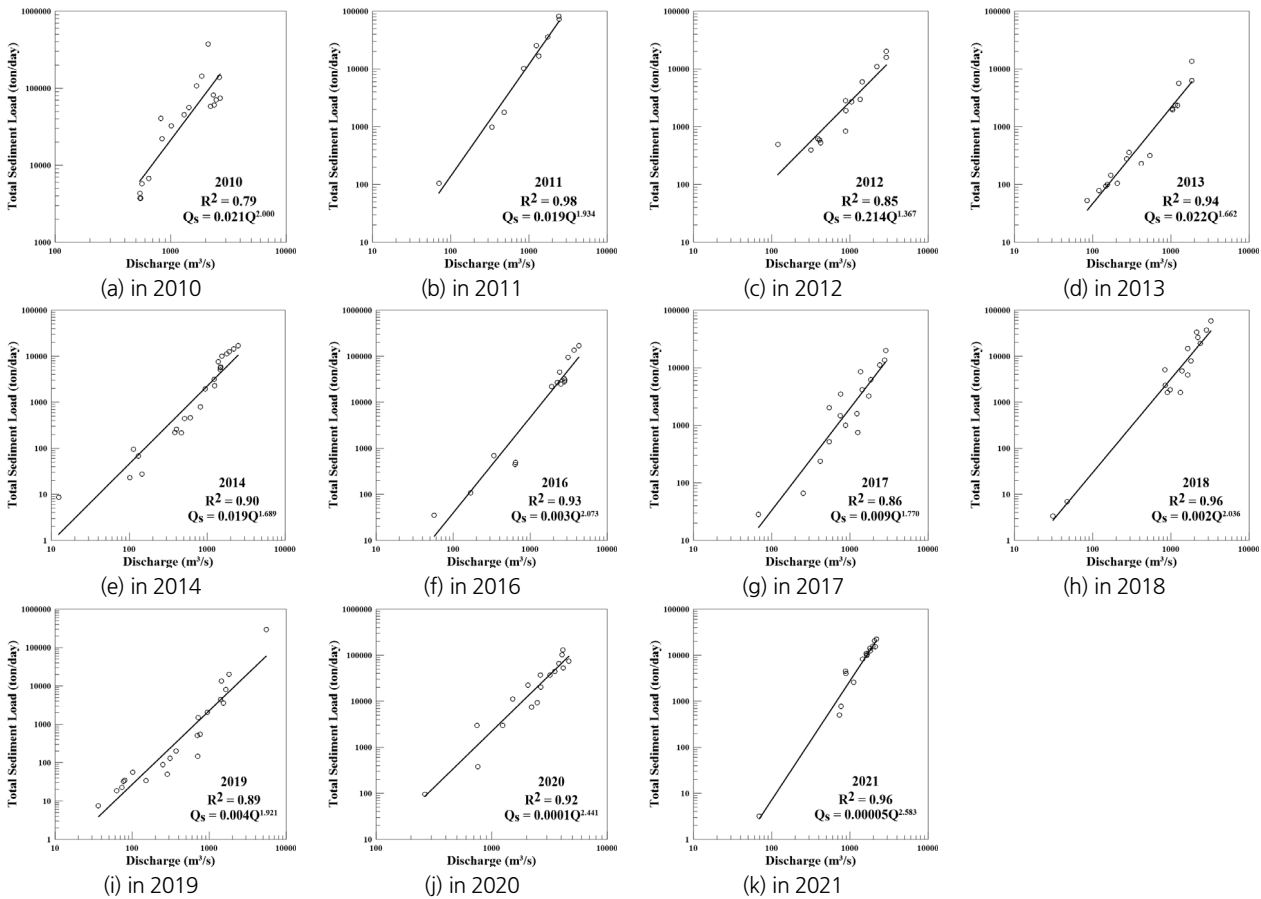


Fig. 7. Sediment rating curve for Nakdong-gang River

2010-2021년까지 총 189개이다. Fig. 7은 2010년부터 2021년까지 낙동강 왜관지점에서 측정된 유량과 MEP를 통해 산정된 총유사량 자료를 기반으로, 연도별 유량-총유사량 관계식을 제시한 것이다. 연도별 결정계수  $R^2$ 의 값은 0.79에서 0.98 사이로, 대체로 양호한 회귀 결과를 나타냈다. 상수  $\alpha$ 의 값은 0.00005에서 0.214까지 매우 넓은 범위에 분포하며, 특히 2012년에 상수는 0.214로서 다른 해에 비해 현저히 큰 값을 보였다. 지수  $\beta$  값은 1.367-2.583 사이에 분포하며, 대부분 모래하천의 일반적인 범위에 포함됨을 알 수 있다.

**4.2 금강 공주지점**

본 연구에서 이용한 금강 공주지점의 유사량 측정자료는 2007-2019년까지 총 117개이다. Fig. 8은 2007년부터 2019년까지 금강 공주지점에서 측정된 자료를 기반으로 구축된 유량-총유사량 관계식을 제시한 것이다. 연도별 결정계수  $R^2$ 의 값은 0.72에서 0.96 사이로 분포하여 비교적 양호한 회귀 결과를 보였다. 상수  $\alpha$ 의 값은 0.001-0.154 사이의 넓은 범위에 분포하며, 지수  $\beta$ 는 1.618-2.541까지 분포하여 모래하천

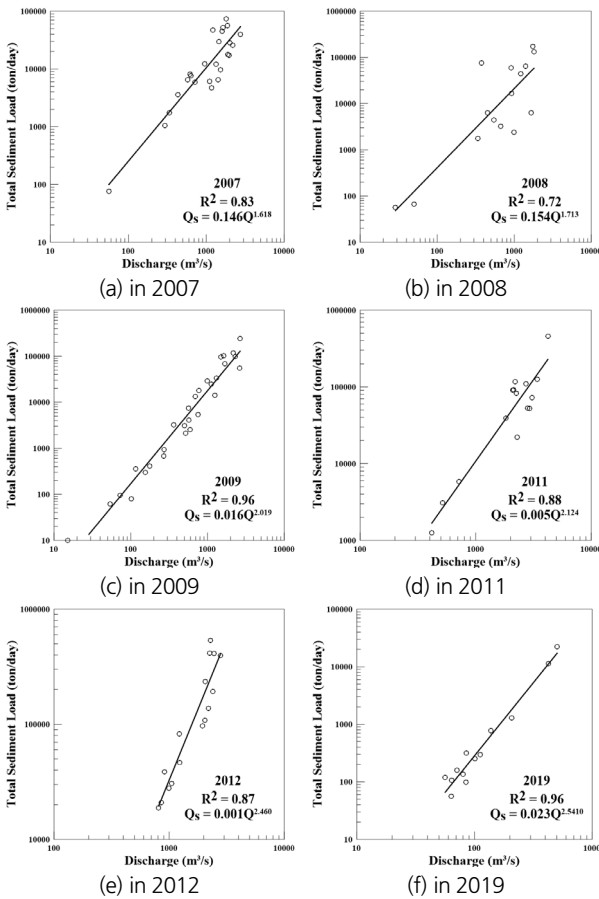


Fig. 8. Sediment rating curve for Geum-gang River

의 범위에 포함되었다.

**4.3 영산강 나주지점**

본 연구에서 이용한 영산강 나주지점의 유사량 측정자료는 2010-2023년까지 총 152개이다. Fig. 9에는 2010년부터 2020년까지 영산강 나주지점에서 측정된 자료를 이용하여 회귀된 유량-총유사량 관계식을 도출하였다. 그림에서 상수  $\alpha$ 의 값은 0.006-0.539 사이의 넓은 범위에 분포하고 있다. 지수  $\beta$ 는 1.710-2.127까지 분포하여 모래하천의 범위에 포함되었다. 결정계수  $R^2$ 의 값은 2010년과 2017년을 제외하면 대

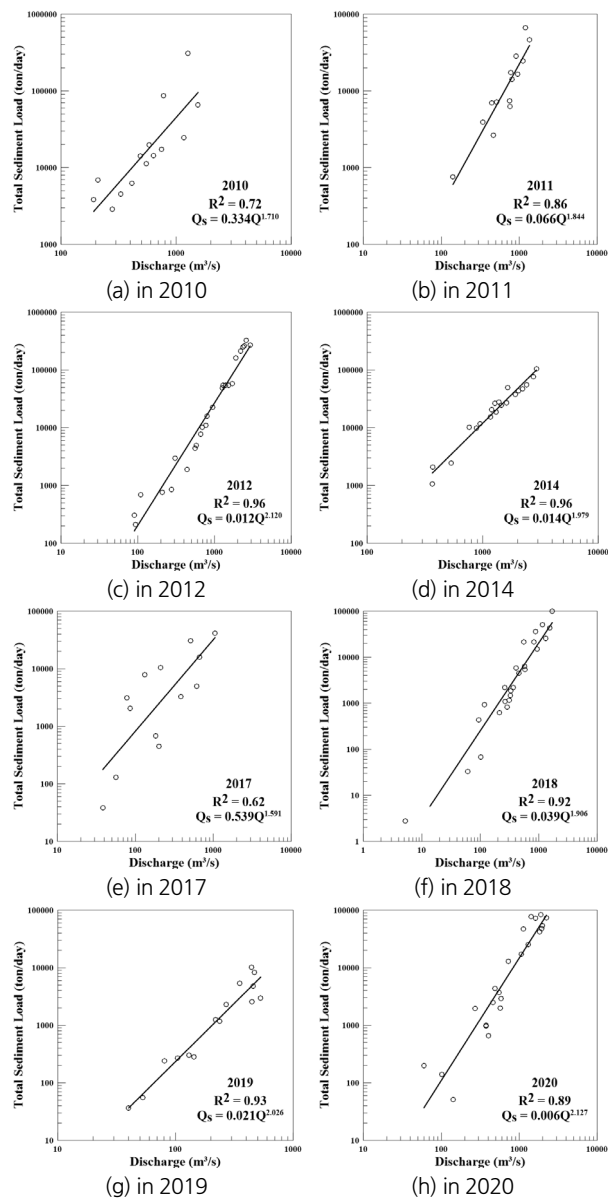


Fig. 9. Sediment rating curve for Yeongsan-gang River

부분 0.86 이상으로 나타나 회귀식이 유량에 따른 총유사량의 변화를 양호하게 나타내고 있는 것으로 확인된다.

**4.4 섬진강 구례지점**

본 연구에서 이용한 섬진강 구례지점의 유사량 측정자료는 2010-2021년까지 총 95개이다. 섬진강 구례지점에서 2010년부터 2021년까지 측정된 유량과 총유사량 자료를 기반으로 회귀 분석한 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 상수  $\alpha$  값은 0.00005에서 0.023까지 넓은 범위에 분포하며, 특히 2020년에 상수의 값은 0.00005로 다른 연도에 비해 이례적으로 작은 값을 보였다. 지수  $\beta$  값은 1.936-2.709 사이에 분포하여 모래 하천에서의 일반적인 범위에 포함되었다. 연도별 결정계수  $R^2$  의 값은 0.89-0.98 사이로 나타나 회귀분석의 결과가 양호한 것으로 나타났다.

**4.5 연도별 유량-총유사량 관계식의 특성**

연도별 유량-총유사량 관계식을 구하는 과정에서 측정자료가 부족하거나 유량의 범위가 지나치게 작은 경우는 분석에서 제외하였다. 예를 들어, 2015년 낙동강 왜관지점의 경우, 총 5회만 유사량이 산정되었고, 관측된 유량의 범위도 매우 제한적이었다. 이와 같은 연도는 회귀식을 제시하지 않았다. 이상의 과정을 통한 연도별 유량-총유사량 관계식을 한국수자원조사기술원 보고서의 관계식과 비교하였다. 대부분의 경우, 보고서에 제시된 관계식과 거의 유사하게 나타났으나, 일부 결과는 다른 것으로 확인되었다.

4개 하천의 회귀분석 결과, 일부 측정자료를 제외하면 결정계수의 범위는 0.72-0.98로 양호하며 Eq. (2)의 상수 및 지수의 변동성이 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 도출된 유량-총유사량 관계식이 수문 특성에 따른 경향성을 보인다고 할 수 없으며, 상수 및 지수에 관해서도 물리적 의미를 부여하기 어려울 것으로 보인다. 한편, Figs.7~10에 제시된 유량-유사량 관계식을 살펴보면, 4대강사업에 대한 영향이 회귀식에 반영되어 있다고 하기 어렵다. 이것은 유량-유사량 관계식이 내재적으로 가지고 있는 한계점에 기인한다고 할 수 있다.

Table 1에는 4개 주요하천 각 지점에서 분석에 사용된 최대 측정유량, 계획홍수량, 그리고 계획홍수량에 대한 최대 측정유량의 비를 제시하였다. 표에서 계획홍수량에 대한 최대 측정유량의 비는 25.6 - 43.3%로 최대 측정유량이 계획홍수량의 절반에도 못 미치는 정도이다. Son and Jang (2017)도 비슷한 사항을 지적한 바 있다. 우리나라 하천에서 유의미한 유사량이 주로 홍수기에 발생한다는 점을 감안하면, 제시된 유량-총유사량 관계식으로 총유사량을 예측하는 경우 고유량에 대

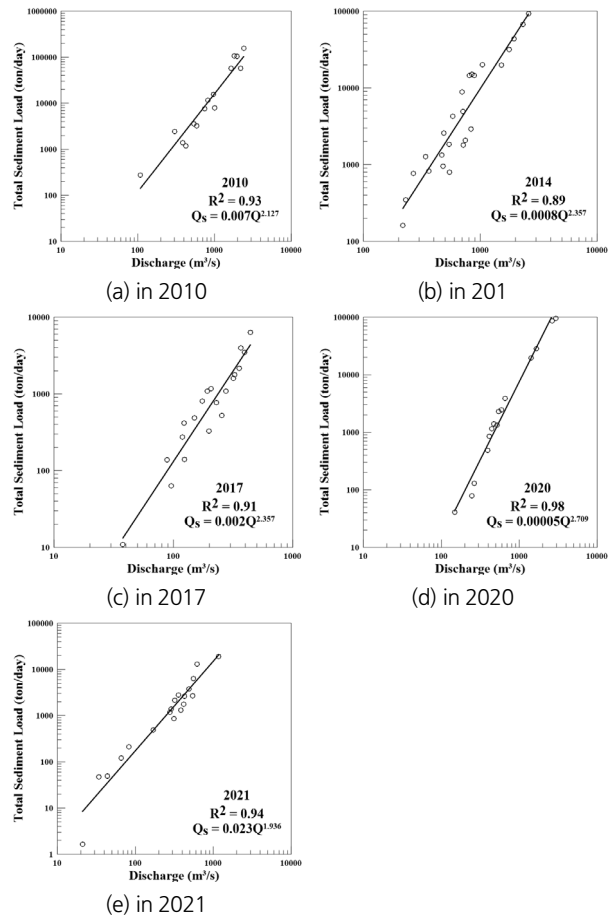


Fig. 10. Sediment rating curve for Seomjin-gang River

Table 1. Ratio of maximum measured discharge to design discharge

River	Station	Max measured discharge (cms)	Design discharge (cms)	Ratio
Nakdong-gang River	Waegwan St.	5,493	13,200	41.6%
Geum-gang River	Gongju St.	4,216	11,835	35.6%
Yeongsan-gang River	Naju St.	2,918	6,730	43.3%
Seomjin-gang River	Gurye St.	2,933	11,440	25.6%

하여 외삽하는 결과를 초래하여 정확도에 문제가 있을 것으로 예상된다. 따라서 고유량에 대한 실측자료를 보완하여 유량-총유사량 관계식을 보완할 필요가 있다.

**4.6 통합 유량-총유사량 관계식**

Figs. 11(a)~11(d)는 Figs. 7~10에 제시된 결과를 연도와 상

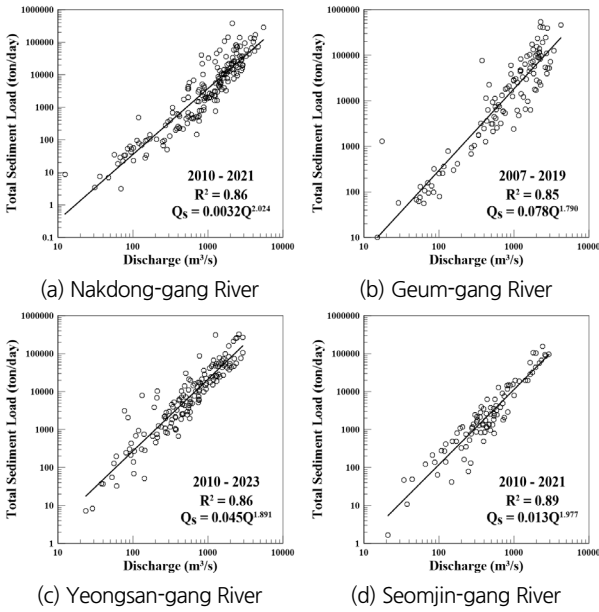


Fig. 11. Total sediment load as a function of water discharge

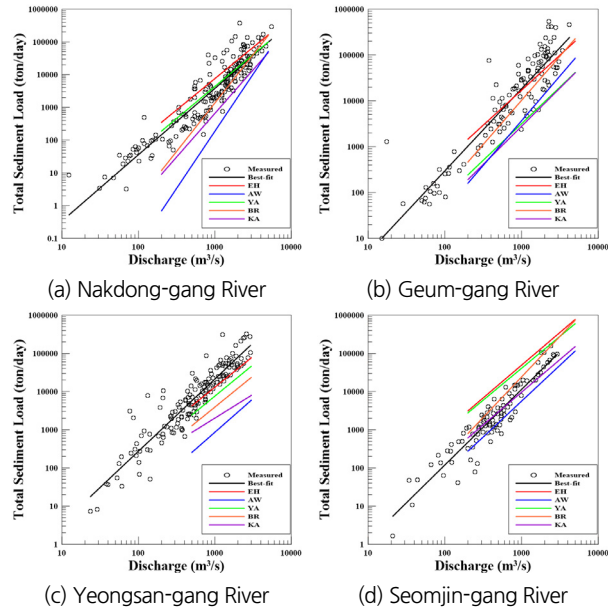


Fig. 12. Application of total sediment load formulas

관없이 통합하여 각각 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강에 대하여 유량-총유사량 관계식을 제시한 것이다. 각각의 하천에 대한 유량-총유사량 관계곡선을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_s = 0.0032Q^{2.024} \text{ (낙동강)} \tag{3a}$$

$$Q_s = 0.078Q^{1.790} \text{ (금강)} \tag{3b}$$

$$Q_s = 0.045Q^{1.891} \text{ (영산강)} \tag{3c}$$

$$Q_s = 0.013Q^{1.977} \text{ (섬진강)} \tag{3d}$$

위의 식에 의하면 상수  $\alpha$ 와 지수  $\beta$ 의 범위는 각각 0.0032-0.078과 1.790-2.024이며, 지수는 모래하천에서 일반적인 범위 안에 있는 것을 알 수 있다. 결정계수  $R^2$ 는 0.85-0.89 사이에 있어 회귀분석의 결과가 양호한 것으로 볼 수 있으나, 유량 및 총유사량 자료를 대수로 변환하여 회귀했다는 점을 감안하면 우수하다고 하기 어렵다.

### 5. 총유사량 공식의 적용

본 절에서는 전 절에서 각 하천에 구축된 유량-총유사량 관계식을 기준으로 기존의 총유사량 공식의 적용성을 검토하고

자 한다. 총유사량 공식은 Kim and Choi (2025)에서와 같이 Engelund-Hansen (EH) 공식, Ackers-White (AW) 공식, Yang (YA) 공식, Brownlie (BR) 공식, 그리고 Karim (KA) 공식을 적용하였다. 이 5개의 공식은 기존 총유사량 공식의 비교 평가 연구에서 비교적 우수한 유사량 공식으로 추천된 바 있다(Woo and Yu, 1989; Yang, 1991; Beg and Ahmad, 2015).

Fig. 12에는 각각의 하천에 대해 측정된 유량-총유사량 자료 및 회귀식과 각 공식에 의한 계산 결과를 비교하고 도시하였다. 이 그림에서 낙동강, 금강, 섬진강의 경우 작은 유량 규모에서는 실측치의 불확실성이 크기 때문에 본 연구에서는 유량 규모가 200 m³/s 이상의 자료에만 총유사량 공식을 적용하였다. 특히 영산강의 경우 Fig. 2의 좌안 고수부지를 넘는 500 m³/s 이상의 자료에만 공식을 적용하였다.

Figs. 13-16은 각각 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강에 대한 불일치율의 분포를 보여준다. 여기서 불일치율 (Discrepancy Ratio)이란 공식에 의한 산정치를 실측치로 나눈 값으로서 두 값이 같으면 1.0이 된다. 이 그림에서 각 공식에 의해 계산된 불일치율이 1/2-2.0 사이에 많이 분포하면 공식의 신뢰도가 높은 것으로 판정할 수 있다.

Table 2에는 5개 총유사량 공식을 4개 하천에 적용하였을 때 각 공식의 불일치율의 기하평균 (Geometric Mean, GM)과 기하표준편차 (Geometric Standard Deviation, GSD)를 제시하였다. 기하평균이 1에 가까울수록 측정치에 근접하게 예측하는 것이며, 기하표준편차도 1에 가까울수록 예측치의 분산이 적음을 의미한다.

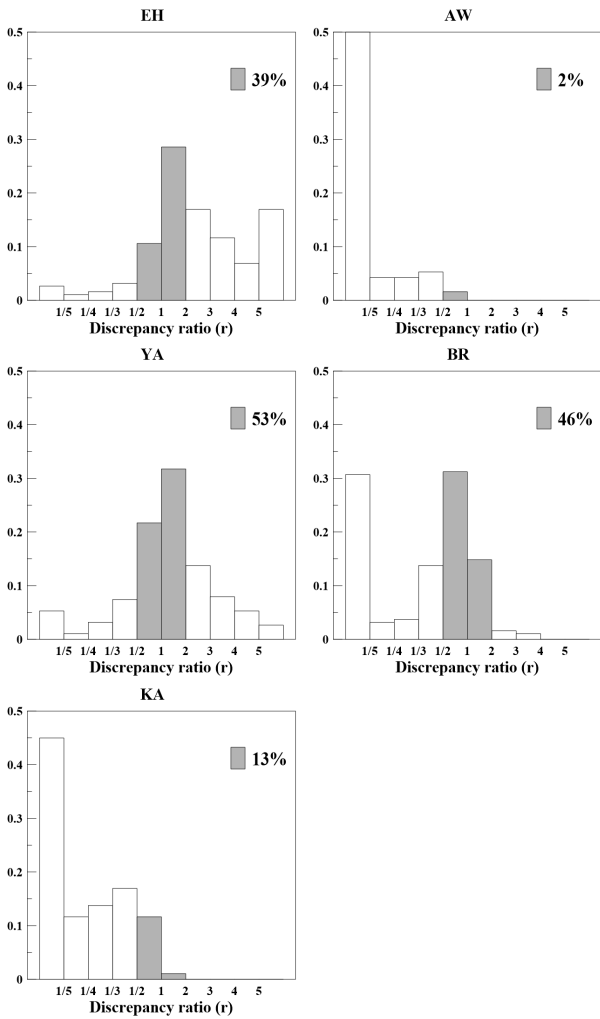


Fig. 13. Discrepancy ratios for total sediment load formulas for Nakdong-gang River

### 5.1 낙동강 왜관지점

Fig. 12(a)에 의하면 YA 공식이 총유사량을 비교적 정확히 예측한 반면, EH 공식은 총유사량을 약간 과대 예측하는 경향을 보인다. 나머지 3개 공식은 총유사량을 과소 예측하나 BR 공식의 경우 고유량에 대하여 적절히 예측하는 것으로 나타났다. Fig. 13의 불일치율 분포를 살펴보면 YA 공식이 1/2-2 사이의 예측률이 53%이고 다음으로 BR 공식이 46%로 총유사량을 적절히 예측하는 것으로 확인된다. Table 2(a)에 제시된 기하평균을 보면 YA 공식이 총유사량을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 기하표준편차를 보면 AW 공식과 BR 공식에 의한 예측 결과의 분산은 큰 것으로 나타났다. 결론적으로 낙동강 왜관지점에서 총유사량은 YA 공식이 비교적 잘 예측하는 것으로 판단된다.

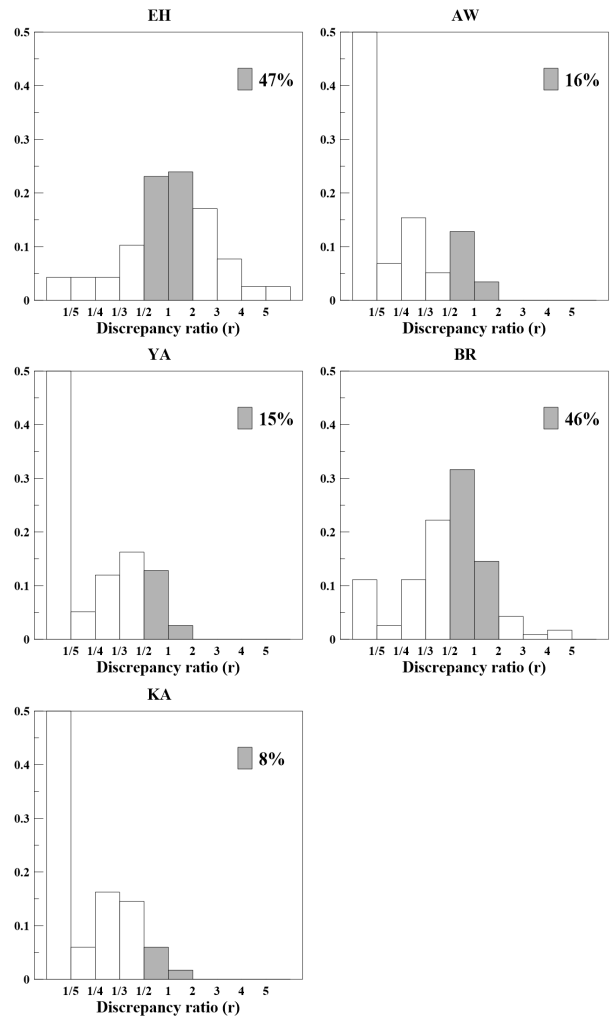


Fig. 14. Discrepancy ratios for total sediment load formulas for Geumgang River

### 5.2 금강 공주지점

금강의 경우, Fig. 12(b)에 의하면 EH 공식이 총유사량을 비교적 잘 예측하고 BR 공식은 과소 예측하는 것으로 나타났다. 나머지 공식들은 총유사량을 상당히 과소 예측하는 경향을 보인다. Fig. 14에서는 EH 공식과 BR 공식이 불일치율 1/2-2 사이의 값이 각각 47%와 46%로 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 나머지 공식의 경우 예측률이 16% 이하로 예측의 정확도가 매우 낮았다. Table 2(b)의 기하평균은 EH 공식이 1.03으로 측정자료에 근접하는 것으로 나타났으나, 기하표준편차의 경우 2.63으로서 다른 공식값들과 유사한 경향을 보였다. 요약하면 금강 공주지점의 총유사량은 EH 공식이 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

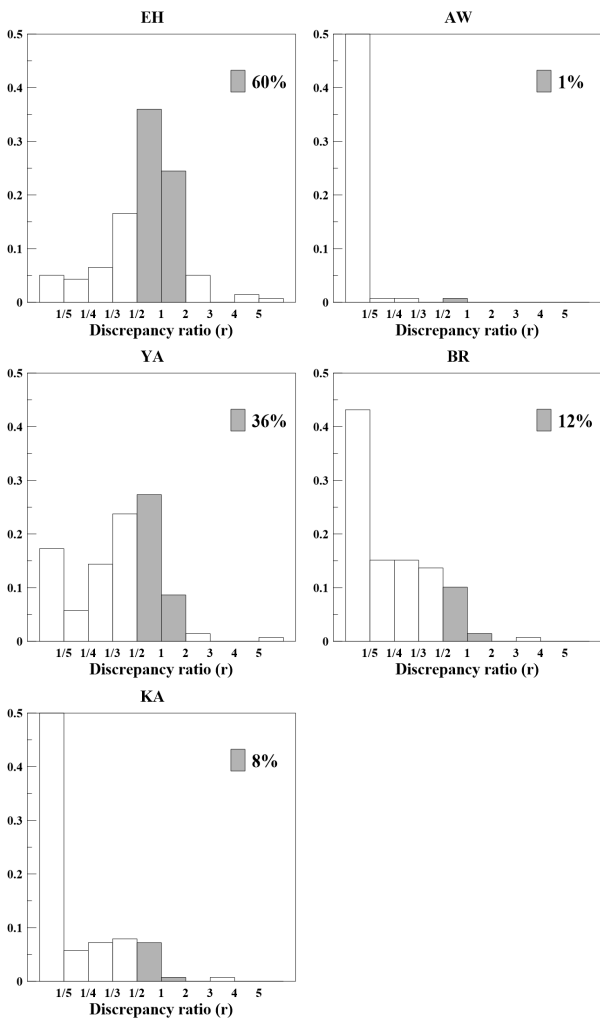


Fig. 15. Discrepancy ratios for total sediment load formulas for Yeongsan-gang River

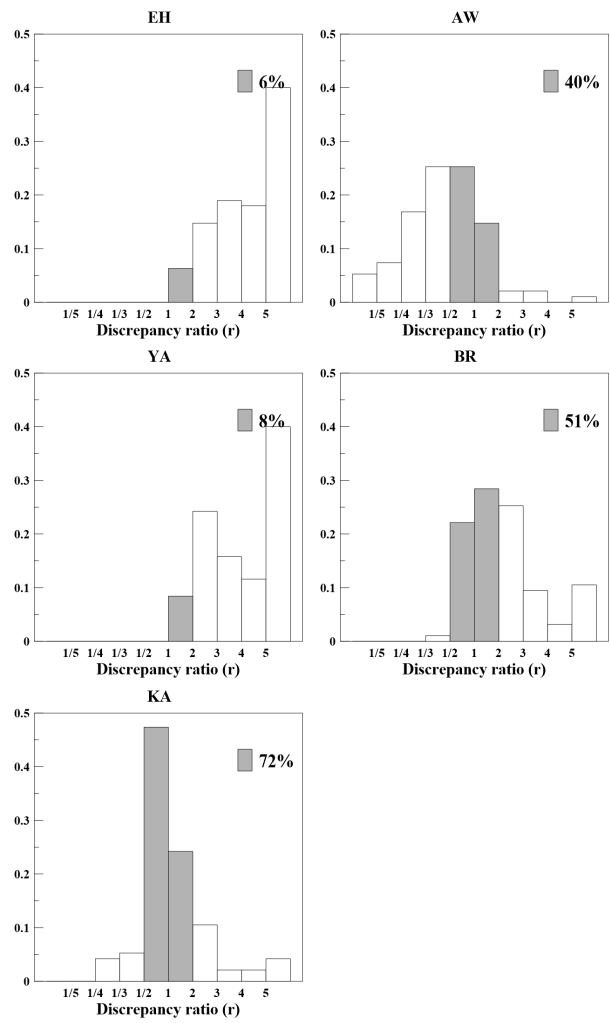


Fig. 16. Discrepancy ratios for total sediment load formulas for Seomjin-gang River

Table 2. Geometric mean and geometric standard deviation for various formulas

(a) Nakdong-gang River

	EH	AW	YA	BR	KA
GM	2.04	0.04	1.16	0.30	0.15
GSD	2.63	7.14	2.61	4.28	3.34

(b) Geum-gang River

	EH	AW	YA	BR	KA
GM	1.03	0.19	0.18	0.53	0.16
GSD	2.74	2.65	2.68	2.63	2.63

(c) Yeongsan-gang River

	EH	AW	YA	BR	KA
GM	0.70	0.04	0.41	0.21	0.13
GSD	2.25	2.18	2.23	2.24	2.60

(d) Seomjin-gang River

	EH	AW	YA	BR	KA
GM	5.43	0.54	4.70	1.87	1.07
GSD	2.16	2.07	2.19	2.08	2.16

5.3 영산강 나루지점

영산강 나루지점에서는 Fig. 12(c)를 보면 EH 공식이 비교적 유량-총유사량 관계를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 다음으로 YA 공식이 양호하게 예측하는 것으로 확인되는데, EH

공식을 제외하면 나머지 4개 공식은 총유사량을 상당히 과소 예측하는 것으로 나타났다. Fig. 15에 따르면 불일치율이 1/2-2.0 사이에 분포하는 비율은 EH 공식이 60%로서 비교적 측정값과 유사하게 예측하는 결과를 보였으며, YA 공식이 36%로

그 뒤를 이었다. AW 공식, BR 공식, 그리고 KA 공식은 총유사량을 과소평가하는 경향이 있으며, 불일치율이 0.5 미만인 경우가 많은 것을 알 수 있다. Table 2(c)의 기하평균은 EH 공식이 0.7로서 1에 근접한 것으로 나타나며, 기하표준편차는 2.18-2.60으로 의미있는 차이를 보이지 않았다. 영산강 나주지점의 총유사량은 EH 공식이 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

#### 5.4 섬진강 구례지점

Fig. 12(d)에 의하면, KA 공식이 총유사량을 비교적 정확히 예측하는 것으로 나타났다. BR 공식은 고유량에서 총유사량을 과다 예측하며, EH 공식과 YA 공식은 과다 예측 그리고 AW 공식은 과소 예측하는 것으로 나타났다. Fig. 16에서 불일치율이 1/2-2.0 사이에 분포하는 비율은 KA 공식이 72%, BR 공식이 51%로 나타났다. Table 2(d)의 기하평균은 KA 공식이 1.07로서 총유사량을 비교적 잘 예측하는 것으로 보이며, 기하표준편차에 의하면 총유사량 공식에 의한 예측 결과의 분산은 비슷한 것으로 나타났다. 섬진강 구례지점의 총유사량은 KA 공식이 상대적으로 잘 예측하는 것으로 나타났다.

## 6. 요약 및 결론

본 논문은 한국수자원조사기술원의 보고서에 제시된 총유사량 자료를 기반으로 우리나라 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강에서 유사량의 특성을 조사한 것이다. 먼저 낙동강의 왜관지점, 금강의 공주지점, 영산강의 나주지점, 그리고 섬진강의 구례지점에서 하상토의 분포 특성을 제시하였고, 회귀분석을 통하여 각 지점에서 유량-총유사량 관계식을 제시하였다. 국내외 자료를 검토하여 본 연구에서 선정한 5개의 총유사량 공식을 적용하여 실측치와 비교함으로써 각 하천별 적절한 총유사량 공식을 선정하였다.

하상토 분포는 4개 지점 모두 모래하천으로 중앙입경이 2.0 mm 미만이거나 비슷한 수준이었고, 분급계수도 대부분 자연하천의 범위인 2.0-4.5 사이에 있는 것으로 나타났다. 다만 섬진강 구례지점을 제외하고는 입도분포, 중앙입경, 그리고 분급계수의 경년변화에서 하천개발의 영향이 반영된 것으로 추정되었다. 하상토 분포는 공식을 이용한 유사량 산정에 매우 중요한 인자이므로 안정된 자료의 확보 및 분석이 시급한 것으로 판단된다.

총유사량 자료의 회귀분석을 통해 유량-총유사량 관계식을 제시하였다. 그리고 연도와 상관없이 자료를 통합하여 4개 하천에 대한 유량-총유사량 관계식을 제시하였다. 그 결과 상수  $\alpha$ 와 지수  $\beta$ 의 범위는 각각 0.0032-0.078과 1.790-2.024이

었다. 이 지수들은 모래하천의 일반적인 범위 안에 있으며 유량의 증가에 따라 총유사량이 제공에 근사하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 유량-유사량 관계식을 통해 인위적인 개발이나 지역적 특성에 의한 유사량의 경년변화를 파악하기 어려웠으며 이는 유량-유사량 관계식의 한계점으로 생각된다.

결정계수  $R^2$ 는 0.85-0.89 사이에 있어 회귀분석 결과가 비교적 양호한 것으로 볼 수 있다. 구축된 각 하천별 유량-총유사량 관계에 5개의 총유사량 공식의 적용성을 검토하였다. 정량적인 비교를 위하여 불일치율의 분포, 기하평균, 그리고 기하표준편차를 살펴보았다. 검토 결과, 낙동강 왜관지점에서는 YA 공식, 금강 공주지점과 영산강 나주지점에서는 EH 공식, 그리고 섬진강 구례지점에서는 KA 공식이 총유사량을 비교적 잘 예측하는 것으로 확인되었다.

앞으로 위 4개 지점에서 총유사량을 예측할 필요가 있는 경우, 실측치에 바탕을 두고 도출된 유량-총유사량 관계식을 우선 사용하고, 필요시 각 지점별 추천된 총유사량 공식을 이용할 수 있을 것이다. 근래 기후변화의 결과로 국내의 하천이 Green River로 변화함에 따라 향후 하도 식생이 유사이송에 미치는 영향에 관한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부 재원으로 한국환경산업기술원의 「미래변화 대응 수자원 안정성 확보 기술개발사업(RS-2024-00335281)」의 지원으로 수행되었습니다.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Asselman, N.E.M. (2000). "Fitting and interpolation of sediment rating curves." *Journal of Hydrology*, Vol. 234, pp. 228-248.
- Beg, M., and Ahmad, N. (2015). "A critical study of total bed material load predictors." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 2, No. 4, pp. 992-1000.
- Efthimiou, N. (2019). "The role of sediment rating curve development methodology on river load modeling." *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 191, 108.

- Hydrological Survey Center (KIHS) (2008). *Hydrological annual report in 2007*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 82-255.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2009). *Hydrological annual report in 2008*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 84-246.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2010). *Hydrological annual report in 2009*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 66-255.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2011). *Hydrological annual report in 2010*. 2-1, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 157-406.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2012). *Hydrological annual report in 2011*. 2-1, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 162-334.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2013). *Hydrological annual report in 2012*. 2, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 107-304.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2014). *Hydrological annual report in 2013*. 2, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 99-254.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2015). *Hydrological annual report in 2014*. 2, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 151-456.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2016). *Hydrological annual report in 2015*. 2, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 133-321.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2017). *Hydrological annual report in 2016*. 8, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 107-299.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2018). *Hydrological annual report in 2017*. 8, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 159-388.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2019). *Hydrological annual report in 2018*. 8, Ministry of Environment, pp. 180-349.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2020). *Hydrological annual report in 2019*. 8, Ministry of Environment, pp. 415-834.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2021). *Hydrological annual report in 2020*. 8, Ministry of Environment, pp. 261-510.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2022). *Hydrological annual report in 2021*. 8, Ministry of Environment, pp. 240-462.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2023). *Hydrological annual report in 2022*. 8, Ministry of Environment, pp. 311-324.
- Hydrological Survey Center (KIHS) (2024). *Hydrological annual report in 2023*. 8, Ministry of Environment, pp. 317-328.
- Kang, C.-H., Jang, S.-H., Shin, C.-S., Lee, H.-K., and Kim, W.-B. (2013). "Application of sediment transport equation in domestic middle and small streams." *Journal of the Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 470-478.
- Kangwonilbo (2019). "Flood and sediment inflow cause widespread inundation in Samcheok city center." accessed 13 May 2026, <<https://kwnews.co.kr/page/view/2019100300000000014>>.
- Kim, D.E., and Choi, S.U. (2025). "Characteristics of total sediment load at Yeosu Station in Han-gang River." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 12, No. 2, pp. 69-79.
- Lee, C.J., Woo, H.S., and Jang, C.-L. (2019). "Effect of flow regime on accelerated recruitment and establishment of vegetation in unregulated sandy rivers - a case study at Naeseong-Cheon Stream in Korea." *Proceedings of the 38th IAHR World Congress*, Panama City, Panama, pp. 3271-3279. doi: 10.3850/38W C092019-0413.
- Lee, J.-S., and Kim, C.-G. (2016). "Characteristics of sediment transportation of small and medium rivers in geographical areas." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 5, pp. 325-332. doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.5.325.
- Lu, J.-Y., Su, C.-C., and Hong, J.-H. (2010). "A field study on the sediment transport characteristics of a high sediment load river in Taiwan." *Proceedings of IAHR-APD 2010*, Auckland, New Zealand, pp. 1-9.
- Peters-Kummerly, B.E. (1973). "Studies on composition and transport of suspended solids in some Swiss rivers." *Geographica Helvetica*, Vol. 28, pp. 137-151.
- Shin, S.I., Park, J.H., and Lee, E.T. (2007). "A study on the sediment specific properties of the basin of Im-Jin River." *Proceedings of the Korean Water Resources Association Conference 2007*, pp. 1670-1676.
- Son, K.I., and Jang, C.L. (2017). "Characteristics of sediment transportation and sediment budget in Nakdong River under weir operations." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 50, No. 9, pp. 587-595.
- Suh, S.D., Kim, H.G., and Woo, H.S. (1996). "A study on estimation by depth integrating method of sediment discharge." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 90-97.
- Tfwala, S.S., and Wang, Y.-Mi (2016). "Estimating sediment discharge using sediment rating curves and artificial neural networks in the Shiwen River Taiwan." *Water*, Vol. 8, 53.
- Woo, H.S., and Yu, K.K. (1989). *Development of a guideline for the selection of sediment transport formulas*. Report No. KICT89-WR-113, Korea Institute of Construction Technology, pp. 117-137.
- Woo, H.S., and Yu, K.K. (1990). *Test and application of the modified Einstein procedure to rivers in Korea: Estimation of Total Sediment Discharge*. Korea Institute of Construction Technology Research Report, Korea Institute of Construction Technology, pp. 140-163.
- Woo, H.S., and Yu, K.K. (1993). *International Hydrological Programme (IHP) research report*. Ministry of Construction, pp. 284-294.
- Woo, H.S., Kim, W., and Ji, U. (2015). *River hydraulics*. Chungmungak Press.
- Yang, C.T. (1991). "Comparisons of selected bed-material load formulas." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 8, pp. 973-989.