



## Characteristics of sediment transportation and sediment budget in Nakdong River under weir operations

Son, Kwang Ik<sup>a</sup> · Jang, Chang-Lae<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Yeungnam University

<sup>b</sup>Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

Paper number: 17-051

Received: 13 June 2017; Revised: 10 July 2017; Accepted: 10 July 2017

### Abstract

Hydraulic characteristics affecting sediment transport capacity due to the weir operations were investigated and developed sediment rating curves for four gaging stations (Nakdong, Gumi, Waegwan, and Jindong) in Nakdong River. Analysis found that the sediment transportation capability had been decreased and it could be proved from the field measurement records in 2013. Applicabilities of nine sediment transport prediction techniques, which are imbedded in GUIDE program, were examined and adopted for the four gaging stations. Analysis of sediment balance for Nakdong River, including 9 major tributaries, had been carried out with pseudo 2-D numerical model and found that: 1) sedimentation phenomena will be prevailed along the Nakdong River. 2) Engelund-Hansen technique shows the least error in estimation of sediment balance. 3) Engelund-Hansen technique most appropriately describes the sediment characteristics for four gaging stations. 4) Estimated error from the sediment balance for Nakdong River was smaller than the error caused by the estimation of sediment incoming from 9 tributaries. Therefore, it is necessary to improve the accuracy of predicting the sediment incoming from the tributaries for better sediment balance analysis.

**Keywords:** Sediment balance, Nakdong River, Sediment transport capacity, Sediment rating curve, Numerical model

## 보 운영에 따른 낙동강 유사이송특성 및 유사수지 분석

손광익<sup>a</sup> · 장창래<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>영남대학교 공과대학 건설시스템공학과, <sup>b</sup>한국교통대학교 공과대학 토목공학전공

### 요 지

본 연구에서는 낙동강에서 보운영에 의한 유사이송능력에 영향을 주는 수리학적 특성변화를 분석하고, 낙동강 주요 4개 지점(낙동, 구미, 왜관, 진동)의 유량-유사량 실측값을 분석하여, 각 지점별 지수형 유량-유사량 관계식을 유도하였다. 모든 지점에서 유사이송능은 감소할 것으로 예측되었으며 실제로 4대강 사업 이후인 2013년도 실측결과 사업 이전에 비해 유사이송 능력이 확연히 감소된 것을 확인하였다. GUIDE 프로그램에서 제공하는 9개 범용 유사이송 산정기법의 적용성을 검토하여 4개 지점별로 적용 가능한 기법을 선정, 제시하였다. 주요 9개 지류를 포함한 낙동강 전 구간에 대한 유사수지분석 결과 전체적으로 퇴적이 우세한 것으로 나타났다. 유사이송 산정기법으로는 Engelund-Hansen 공식이 가장 작은 오차를 보였으며 이는 4개 지점별 유사이송 산정기법 적용성 검토 결과와도 일치한다. 한편 유사수지분석이 내포하는 오차가 낙동강 9개 지류로부터 유입되는 유사량 오차보다 더 작게 나타나 낙동강의 경우 지류의 유입유사량 산정기법에 대한 정밀도 향상이 시급한 과제를 확인하였다.

**핵심용어:** 유사수지, 낙동강, 유사이송능력, 유량-유사량 관계식, 수치모형

\*Corresponding Author. Tel: +82-43-841-5183  
E-mail: cljang@ut.ac.kr (C.-L. Jang)

## 1. 서론

최근 인류문화 활동이 자연에 미치는 영향에 대한 중요성이 전지구적으로 부각되고 있는 가운데 우리나라는 최근 4대강 사업으로 인하여 하도의 기하학적 종횡단 변화와 함께 다기능보 건설 및 수문조작 등으로 유황은 물론 수위-유량 관계, 유량-유사량 관계 등 모든 하천환경이 크게 변화하였다. 이러한 하천의 수리수문학적 특성의 변화로 인하여 4대강 사업 이전의 하천특성을 기초로 수립했던 중장기적 하천관리계획에 대한 재수립이 요구되고 있다. 특히 보 건설과 하도준설로 인한 하도단면 변화는 하도의 수리학적 특성과 유사이송 능력에 영향을 미쳐 오랜 기간 동안 자연환경에 의해 평형을 유지해 온 하도의 안정성에 변화를 초래하고, 새로운 환경에 적응하기 위하여 국부적 세굴 및 퇴적 등의 발생이 상당기간 동안 지속될 것으로 예상된다.

인위적인 작용이나 기후변화에 의하여 하도의 물리적 특성이 변하게 되면, 이로 인하여 유사이송 특성도 변하게 된다. 또한 이러한 유사이송 특성 변화는 하천환경 변화 그 자체뿐만 아니라, 변화의 강도에도 영향을 준다. 이러한 관점에서 유사이송 변화에 의한 하도의 변화 과정을 정량적으로 파악하는 중요하다(Fryirs, 2013; Shao et al., 2015). 따라서 이러한 하도 변화의 규모 및 방향성 등을 예측하여 중장기적 하천관리에 반영하는 노력이 요구되는 시점이라 하겠다.

유사의 연속성은 유역과 하도를 연결하는 횡방향 연결성과 하도의 상류에서 하류로 연결되는 연속성의 결합 정도를 나타낸 것으로 정의된다(Heckmann and Schwanghart, 2013; Shao et al., 2015). 최근에 유사의 연속성에 영향을 주는 인자, 영향범위, 유사이송 과정에서 초래되는 변화(Fryirs et al., 2007), 유사이송 형태, 유사연결성을 정량화 하는 방법(Jain and Tandon, 2010) 등이 연구되어 왔으나, 이를 정량적으로 해석하기 하기 위해서는 하폭, 하상경사, 하상도 특성 등 하도 기하학적인 자료와 수위-유량 관계, 유량-유사량 관계, 유사량 특성 등 하도 수리학적 자료가 필요하다.

4대강 사업 이후에 중장기적인 하도변화를 예측하기 위해서는 오랜 기간동안 지속적인 현장 조사 및 분석을 통하여 현재상태의 하도수리특성(수위-유량 관계, 유량-유사량 관계 등)을 명확히 파악하고, 그 특성을 제공해야 하지만, 4대강 사업 이후 4-5년이 지난 지금까지도 저유량에 대한 수위, 유량, 유사량 등 실측값만 존재할 뿐, 각 하천별 설계빈도에 해당하는 설계 홍수량, 하상고의 변화, 하도의 평면변화, 하상도의 변화 등 전유량에 걸친 실측자료가 부족하여 신뢰성 있는 새로운 하천수리특성, 특히 수위-유량 관계, 유량-유사량 관계식

뿐만 아니라, 유사이송에 의한 하천의 수리기하학적 관계식이 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 4대강 사업 전후의 통수단면, 유속 및 소류력 등 유사이송능력에 영향을 주는 수리학적 특성을 파악하고, 하도변화 및 하천 환경생태계의 주요 지배인자인 유사이송 특성을 분석하였다. 낙동강 본류 주요 지점에서 관측된 유량-유사량 관계 실측값을 분석하여 새로운 하천환경에 적용 가능한 지수형 형태인 유량-유사량 관계식을 유도하였다. 또한 준 2차원 수치모형을 적용하여 하도내 침식 또는 퇴적량을 산정하고, 유사수지분석을 수행하여, 유사이송의 연속성을 정량적으로 파악하였다. 본 연구결과는 4대강 사업 이후, 하도변화를 예측하고 유사이송 연속성 확보를 위한 하천관리 및 운영방안 등을 수립할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법 및 범위

유사수지는 유사공급(sediment source), 유사저류(sediment storage), 유사유출(output)의 평형(수지)을 나타낸다(Slaymaker, 2003). 낙동강 본류의 유사수지 분석을 위해서는 유역에서 유입되는 유량과 유사량, 하도 본류에서 하상변동, 하구로 유출되는 유량과 유사량 특성, 유량-유사량관계, 하상도 특성, 유사의 구성성분과 유사량의 변화 특성을 분석하는 것이다(Son and Ji, 2015).

하도 전구간에 대하여 수지에 기여하는 유사량은 본류의 최상류로부터 유입되는 유사량(QI), 지류를 통해 유입되는 유입유사량(QT), 최 하류로 방류되는 유출유사량(QO), 인위적 준설/투입량(QM)과 전구간에 걸친 하상변화로 나타나는 하도 내에 퇴적/세굴량(QD)이 평형을 이루어(QT+QI-QD-QO-QM)은 영(zero)이 되어야 한다(Fig. 1; Son and Ji, 2015).

본 연구는 낙동강 전 유역을 대상으로 하였으며, 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강 등 낙동강 본류로 유입되는 9개의 주요 지류를 고려하여 유사 수지를 분석하였다. 또한 상주, 낙단, 구미, 칠곡, 강정·고령, 달성, 합

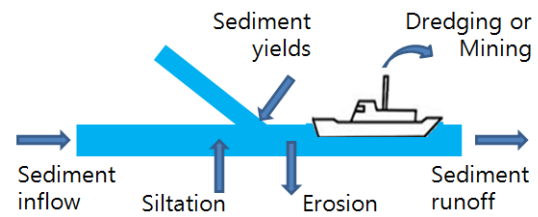


Fig. 1. Typical sediments at river channel (Son and Ji, 2015)

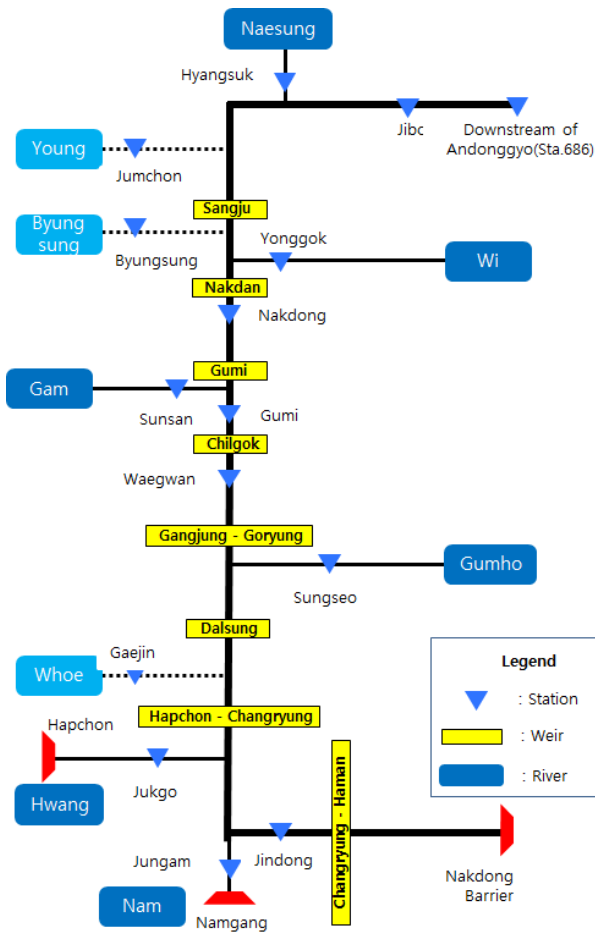


Fig. 2. Nakdong River system

천·창녕, 창녕·함안의 8개 보에 의한 유사이동 특성과 하상 변동 특성을 분석하여 낙동강 본류에서 유사저류 특성을 분석하였다.

4대강 사업 이후 하도변화 및 유사수지분석에 필요한 하천 유역의 수문자료는 물론 하도로 유입되는 유사량과 하도에서의 유사이송특성을 규명하기 위하여 본 연구에서는 낙동강하구둑-안동대교 하류(Sta. 686) 구간(Fig. 2)과 주요 지류 9개를 중심으로 유황 및 유량-유사량 관계를 분석하였다. 지류로부터의 유입 유량과 유사량은 유황이 인위적인 영향을 받지 않았던 4대강 사업 이전 10년(1999~2008)간의 자료를 사용하였으며, 본류에서는 4대강 사업 전후 17년간(1999~2015)에 걸친 4개 지점(낙동, 구미, 왜관, 진동)에 대한 유량-유사량관계 실측자료를 활용하였다.

낙동강의 경우 4대강 사업으로 8개의 보가 본류에 건설되었으며, 특히 중하류에 위치한 보는 관리수위가 상류 보에까지 영향을 미치고 있어 낙동강 본류 중하류 대부분의 구간은 하류보의 영향을 받는 배수구간에 해당된다. 배수영향을 받

Table 1. WL-Q relations for 8 weirs in Nakdong River

Weir	H-Q relations
Sangju	$H = 2 \times 10^{-8} Q^2 - 1 \times 10^{-5} Q + 47.077$
Nakdan	$H = 2 \times 10^{-10} Q^2 + 0.0003 Q + 40.078$
Gumi	$H = 2 \times 10^{-9} Q^2 + 0.0002 Q + 32.541$
Chilgok	$H = 2 \times 10^{-8} Q^2 - 8 \times 10^{-7} Q + 25.568$
Gangjung Goryung	$H = 3 \times 10^{-8} Q^2 - 6 \times 10^{-5} Q + 19.489$
Dalsung	$H = 1 \times 10^{-9} Q^2 + 0.0005 Q + 14.014$
Hapchon Changryung	$H = 3 \times 10^{-9} Q^2 + 0.0005 Q + 10.52$
Changryung Haman	$H = 1 \times 10^{-8} Q^2 + 0.0003 Q + 4.7623$

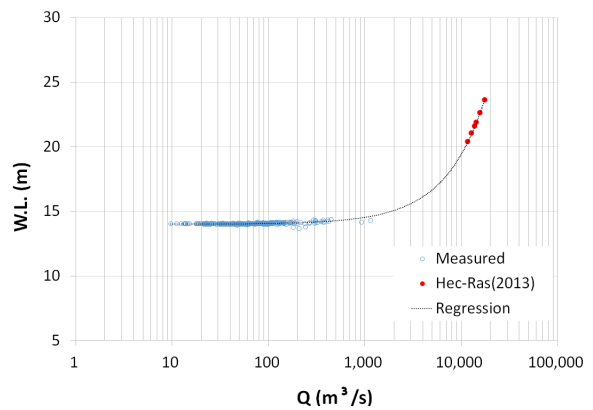


Fig. 3. Water level (WL) - flow rate (Q) relationship (Dalsung Weir)

는 지점의 경우, 수위는 유량뿐만 아니라 하류 지배단면의 수위에도 영향을 받게 된다. 보에서 수위는 수문개방 정도에 영향을 받는 것이 일반적이나 4대강 사업 이후 3년(2013~2015) 간 실측된 8개 보 지점의 저유량에 대한 수위-유량관계를 보면 수문조작 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다(Fig. 3). 그러나 고유량의 경우, 현재까지 실측자료가 없으므로, 설계보고서에 제시하고 있는 고유량에 대한 HEC-RAS 산정 수위 (MOLITb, 2013)를 활용하여 8개 보의 전 유량구간에 대한 수위-유량관계식을 유도하였다(Fig. 3 and Table 1).

### 3. 주요지점의 유량 유사량 관계식 개발

유사수지 분석을 위해서는 해석구간의 유입 및 유출 유사량뿐만 아니라, 하도변화에 의한 하도내 유사의 침식 또는 퇴적량 산정이 필요하다. 정량적인 하도변화를 모의하기 위한 하상변동 예측 수치모형은 1차원 모형부터 3차원 모형까지 다양하며, 이송능력을 산정하는 이론적인 방법 또한 개발되었다.

본 연구에서는 대상범위가 낙동강 본류 전체로서, 긴 구간에 대한 하도의 총횡단면 변화를 모의할 수 있어야 하는 점을 고려하여, 준 2차원 모형인 GSTARS 3.0 모형을 적용하였다. 본 수치모형은 하도변화 및 유사이송 특성을 산정하기 위해 본류 해석구간을 지배하고 있는 유사이송 경험식의 종류와 함께 직상류와 지류에서 유입되는 유량 및 유사량 자료가 요구된다(Yang and Francisco, 2002). 그러나 현재로서는 새로운 하천환경에 대한 실측자료가 부족한 상황이므로 본 연구에서는 4대강 사업 이전의 하천수리특성과 2013년 이후 새로운 하천환경에 대한 단기간의 실측자료와 함께 수치모형에 의한 하천수리특성 모의 결과를 분석하고 비교하여, 새로운 하천환경에 대한 낙동강 주요지점의 유량-유사량 관계를 유도하고 구간별로 적합한 유사이송 경험식을 선정하였다.

### 3.1 지류의 유입유사량

지류에서 유입되는 유사량을 정량적으로 파악하는 것은 본류에서 총횡단 하도변화를 분석하고 하도내 유사의 침식 또는 퇴적량 산정하여 유사수지를 분석하는데 중요한 자료이다. 지류로부터 유입되는 유사량을 산정하기 위해서는 각 지류에 대한 유량-유사량 관계식과 지류의 일유량 자료가 기초자료로 요구된다. 본 연구에서는 하천정비기본계획에서 제시된 공인된 자료로부터 낙동강의 9개 주요 지류에 대한 유량-유사량 관계식을 분석하고 과거 10년간(1999~2008)의 실측 일유량 자료를 인용하여 지류에서 유입되는 총유사량을 산정하였으며, 각 지류별 연평균 총유사량은 Table 2와 같다. 이 값은 낙동강의 주요 지류별 유량-총유사량 관계식으로부터 과거 10년(1999~2008) 3,653일간의 유출된 총유사량을 일단위로 산정하여 합산한 후 10년으로 나눔으로써 지류에서 본류로 유출되는 연평균 총유사량을 산정하였다(Table 2).

9개 주요 지류의 유역면적은 낙동강 전유역의 56.9%에 해당한다.

각 지류의 유사유출량 추정값은 조사된 자료 별로 큰 차이를 보이고 있으며(Table 2), 본 연구에서는 참고문헌들이 제시하는 유출 총유사량의 평균값과 관계식 개발년도 등을 고려하여 표에서 \*로 표시된 총유사량을 활용하였다. 이와 같은 유사유출량의 오차는 유사수지 해석 결과에도 내재되므로, 향후 지류로부터의 유사유출량에 대한 지속적 실측과 분석이 이루어져야 할 것이다.

### 3.2 유량-유사량 관계특성

본류에서 유사수지 분석을 위해서는 하도내 침식 또는 퇴적량 산정뿐만 아니라, 유입유사량과 유출유사량의 차이를 파악하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 본류의 주요 지점별 유량-유사량 관계식을 분석해야 한다. 낙동강 본류의 경우 4대강 사업 전후 10여년(2007~2014)간에 걸쳐 유량-유사량 관계 실측이 지속적으로 이루어진 지점은 4개 지점(낙동, 구미, 왜관, 진동) 뿐이다. 따라서 본 연구에서는 하상변동을 해석하기 위한 기초자료로 4 지점에 대한 4대강 사업 이후의 이수형 태인 유량-유사량 관계식을 유도하였다. 또한 각 지점별로 우리나라에서 범용적으로 사용되는 유사이송능 산정기법의 적용성을 검토하였다. 이 과정에서 GUIDE 프로그램(KICT, 1990)에서 제공하는 Einstein (1950), Colby (1964), Engelund-Hansen (1972), Shen and Hung (1971), Ackers and White (1973), Yang (1973), Yang (1979), van Rijn (1984), Ranga Raju (1981) 및 수정 Einstein 공식(Colby and Hembree, 1955) 등 9개 공식을 적용하여 유사량을 산정하였다.

Table 2. Annual total sediments from Nakdong River tributaries (1999~2008) (Unit: tons/yr)

Tributary	MOLITa (2011~2014)				MLCTa (2012)	MOLITb (2013)	MOLITc (2013)	KSAE (1988)
	2011	2012	2013	2014				
Naesung	175,470	67,495*			139,001		333,336	74,000
Young		28,151*	707	8,492			48,374	47,000
Byungsung						14,929*	24,437	20,000
Wi						29,395*	48,115	56,000
Gam	17,577	43,563*		27,030	419,447	40,211	139,979	49,000
Gumho		54,726*			54,727	54,727	40,672	75,000
Hwoe	725		4,792*	370		15,519	27,750	47,000
Hwang	29,309	47,704		41,808*			15,238	103,000
Nam		47,889		18,978*			1,875	225,000

\*Adopted total sediment rate for this research

3.2.1 지수형 유량-유사량관계식 유도

4개 지점에 대한 자료 검토결과, 4대강 사업 이후 유량-유사량 관계자료는 설계홍수량의 절반에도 미치지 못하는 저유량 (< 5,000 m<sup>3</sup>/s)에 대해서만 실측된 것으로 나타났다. 따라서 설계홍수량 규모를 포함하는 전유량 범위에 대한 유량-유사량 관계를 유도하기 위해서는 실측자료가 없는 고유량 범위에 대한 유량-유사량 관계 추정 과정이 요구된다.

유사량 실측자료가 없는 고유량의 경우 낙동강 하천정비 기본계획(MOLITb, 2013)에 나타난 수리 특성을 GUIDE 프로그램의 입력자료로 활용하여 9개 경험식에 의한 고유량에 대한 유량-유사량 관계를 추정하였다. 이 9개 공식에 의한 추정된 것 중에서 고유량에 가장 적합한 추정치를 선정하기 위하여 고유량에 대한 사업전후의 평균유속 및 소류력을 비교하여 정성적으로 유사이송능을 먼저 판단한 후, 실측결과와의 추세선 연장 등을 고려하여 모든 유량에 적합한 지수형 유량-유사량 관계식을 산정하였다.

낙동지점의 경우, 4대강 사업으로 인하여 저유량에 대해서는 수면 폭은 작아지고 단면적과 수심은 커졌으며, 2006년 실측자료를 제외한 유속만으로는 유사이송능력의 증감을 판단할 수 있을 만큼의 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 4). 즉, 하도 횡단면의 변화로 인하여 단면적과 수심 등은 변화가 있으나 유사 이송량을 지배하는 인자 중 하나인 유속은 비슷하여 유량-유사량 관계의 정성적 변화를 판단하기 곤란하여, 하상의 소류력을 추가적으로 비교 검토하였다.

$$\tau_o = \rho g R S_f \tag{1}$$

여기서,  $\tau_o$ 는 소류력(N/m<sup>2</sup>)이며  $\rho$ 는 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)이고,  $g$ 는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)이다.  $R$ 은 동수반경(m)이며,  $S_f$ 는 마찰경사이다.

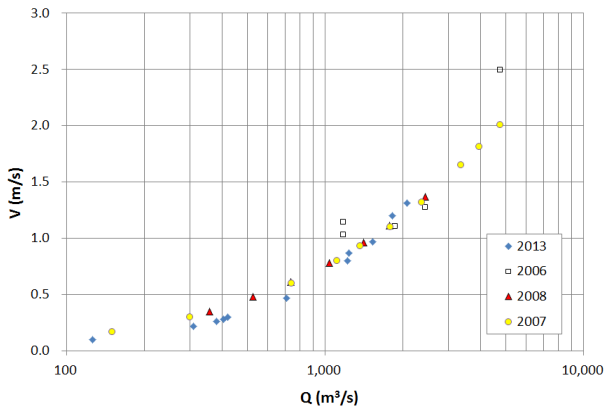


Fig. 4. Q-V relationship at Nakdong Station (2006~2013)

Table 3에 나타나는 바와 같이 5,000 m<sup>3</sup>/s 이하의 저유량에 대해서는 4대강 사업 이후 동수경사는 약 1.5배 정도 커진 반면, 마찰경사는 70% 정도 완만해져 개수 후의 소류력은 개수 전 소류력의 약 40%에 불과하여 4대강 사업 이후 유사이송 능력은 감소할 것이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 낙동지점에 대한 4대강 사업이전의 실측 유량-유사량 관계가 점선으로 나타나 있으며 4대강 사업이후인 2013년 실측된 유량-유사량 관계(MOLITa, 2006-2014)를 비교해 보면 과거의 유사이송능에 비해 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. 따라서 4대강 사업이후에 적합한 유량-유사량 관계식을 추정하기 위해서는 저유량에 대한 실측자료뿐만 아니라 실측자료가 없는 고유량에 대한 유량-유사량 관계 추정과정이 필요하다. 따라서 고유량에 대해서는 낙동강 하천정비기본계획(MOLITb, 2013)에서 공시된 4대강 사업이후에 대한 수리특성자료를 GUIDE 프로그램에 활용함으로써 전술한 9개 공식별 예측 유량-총유사량 관계를 산정하여, Fig. 5에 도시하였다.

GUIDE에서 제공하는 9개의 기법 중 2개의 기법은 부적합한 것으로 판단되어 자동적으로 배제되었으며 나머지 7개 기법에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 5로부터 Englund-Hansen (1972), Yang (1979), Ranga Raju (1981) 공식 등은 고유량

Table 3. Shear stresses before and after the 4 MRRP (Nakdong sta.)

4 MRRP	Energy slope ( $S_f$ )	Hyd. radius ( $R$ )	Shear stress ( $\tau_o$ )
Before	0.002308*	3.5***	0.008077
After	0.000659**	5.0***	0.003295

\*MOLIT (2009); Basic river plans for Nakdong River, Ministry of land, Infrastructure and transportation: measured river bed slope  
 \*\*MOLITb (2013); Basic plan of 4 major river restoration project: planned river bed slope between Gumi Weir and Nakdan Weir  
 \*\*\*MOLITa (2013); Hydrological annual report in Korea, Ministry of land, Infrastructure and transportation: measured value (less than 3,000 m<sup>3</sup>/s)

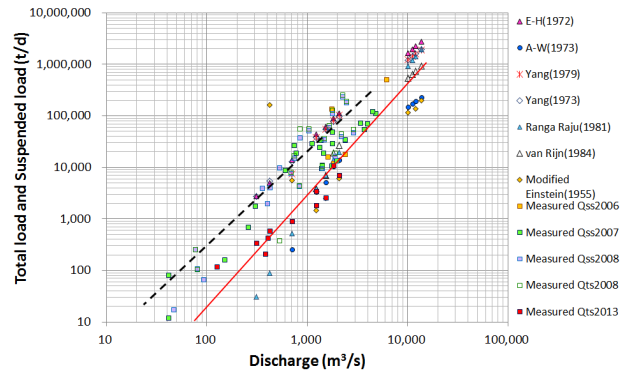


Fig. 5. Q-Qss and Q-Ts relationship (Nakdong Sta.)



(> 10,000 m<sup>3</sup>/s)에 대해 4대강 사업 이전과 유사한 유사량을 예측하고 있어 고유량의 경우 소류력 감소가 예상되는 Table 3의 정성적 분석 결과와는 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 수정 Einstein 공식(Colby and Hembree, 1955)은 기존의 실측자료와 비교할 때 지나치게 완만한 기울기를 나타내고 있다. 따라서 기존의 하도상황을 반영하지 못하는 이들 값을 제외한 고유량에 대한 유량-유사량 관계자료와 저유량(> 2,500 m<sup>3</sup>/s)에 대한 2013년 실측 자료만을 활용하여 관계식을 유도하였다(Fig. 5 실선). 이 관계식은 4대강 사업 사업이전의 유사이송 능력(Fig. 5 점선)에 비해 유사량은 감소되고 기울기는 다소 급한 것으로 나타났으며 이는 소류력 분석결과와도 정성적으로 일치된 결과이다.

3.2.2 범용 유사이송능 산정기법 적용성 분석

낙동지점의 유사이송특성 분석에 가장 적합한 범용 유사이송능 산정기법 활용 가능성 여부를 판단하기 위해서, 앞에서 유도된 유량-유사량 관계 추세선(Fig. 5 실선)을 활용하여 산정된 유량별 유사량(Measured Q<sub>TS</sub>)과 9개 유사이송능 산정기법으로부터 산정된 유사량(Estimated Q<sub>TS</sub>)을 비교하였다(Fig. 6).

2013년 실측자료와 본 연구의 정성적 분석결과를 바탕으로 저유량과 고유량에 대한 유량-유사량 관계의 연장을 검토한 결과, Engelund-Hansen (1972) 공식과 Yang (1973) 공식은 4대강 사업 이전 하도에 대하여 잘 모의하고 있으나 사업 이후의 유량에 대해서는 과다하게 산정하였다. 수정 Einstein 공식(Colby and Hembree, 1955)은 분산되는 예측값을 Ackers and White (1973) 공식은 2013년도 실측치보다 작은 값을 예측하나 경향은 실측 결과와 가장 유사하게 나타났다. Ranga Raju (1981) 공식은 유량-유사량 관계 기울기가 다소 급하게 나타났다. 한편 van Rijn (1984) 공식의 경우, 4대강 사업전후의 중간 값 정도를 예측하고 있으며 실측치와도 가장 근접한 것으로 판단된다. 따라서 전유량에 대하여 실측자료와 가장 유사한 경향성을 보이는 공식은 van Rijn (1984) 공식으로 판단되었다. 그러나 낙동지점의 2년 빈도 홍수량 5,400 m<sup>3</sup>/s에 대한 총유사량이 80,000~100,000 tons/day인 점을 고려할 경우, Ackers and White (1973)공식도 저유량과 고유량에 대해서는 실측값보다 다소 작은 유사량을 예측하지만, 경향성이 일치하여 적용가능할 것으로 판단된다.

낙동지점에 대한 유사이송특성 분석과 동일한 방법으로 분석한 낙동강 4개 지점에 대한 지수형 유량-총유사량 관계식을 유도하였으며 9개 유사이송능 산정기법 중 적용성이 우수한 것으로 판단되는 기법을 Table 4에 요약, 정리하였다.

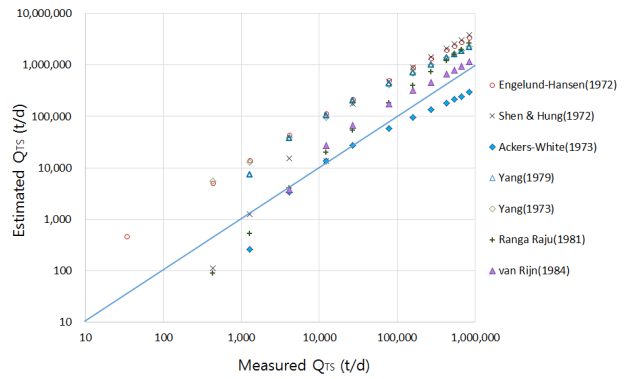


Fig. 6. Relationship between the measured Q<sub>TS</sub> and the estimated Q<sub>TS</sub> (Nakdong Station)

Table 4. Q-Q<sub>TS</sub> and applicable experimental equation (Nakdong River)

Station	Q-Q <sub>TS</sub>	App. Experimental Eq.
Nakdong	$Q_{TS} = 0.0013Q^{2.1035}$	van Rijn, A-W* (A-W*; smaller than real)
Gumi	$Q_{TS} = 0.0106Q^{1.8431}$	E-H*, Yang73* (E-H*; bigger than real)
Waegwan	$Q_{TS} = 0.0149Q^{1.7321}$	E-H*; bigger than real Yang73*; not applicable for small Q
Jindong	$Q_{TS} = 0.0032Q^{2.013}$	van Rijn, E-H*

\*A-W: Ackers and White (1973), E-H: Engelund-Hansen(1972), Yang73: Yang (1973)

4. 유사수지분석

4.1 유사이송 연속성 확보 방안

인위적 혹은 자연적 작용이나 충격에 의하여 변화된 하도와 하천환경을 관리하기 위해서 유사이송 연속성을 정량적으로 파악하는 것은 중요한 과정이다. 특히, 본류에서는 유입유량과 유출유량의 차이뿐만 아니라, 하도내 침식 또는 퇴적량을 산정하는 유사수지 분석은 장기적 하천관리에 꼭 필요한 과정이다. 낙동강 상하류 전 구간에 걸친 유사이송 연속성을 모의하기 위해서는 보를 포함한 전구간에 대한 모의가 동시에 이루어져야 하나 본 연구에서 활용한 GSTARS 모형의 경우 보 직하류에 상류와 사류가 공존하는 등의 이유로 낙동강 전 구간을 동시에 모의할 수 없는 한계성이 있었다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위하여 8개 보를 기준으로 낙동강을 9개 구간으로 설정하고, 각 구간 별로 유사이송을 모의하였다. 이 경우 구간 상류에 위치한 보로부터 유입되는 유사량을 상류단 경계조건으로 제공하여야 유사이송의 연속성을 보장하게 된다. 따라서 하도변화 모의과정 중, 산정된 구간별 최하류 경계

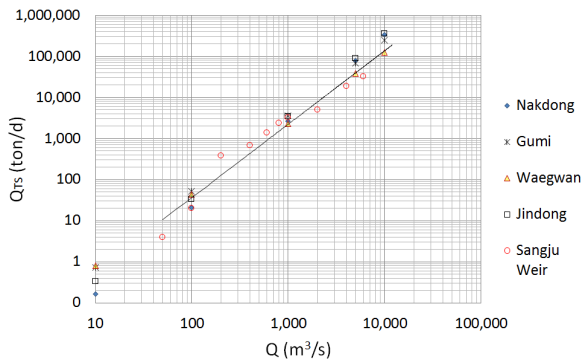


Fig. 7. Q-Q<sub>TS</sub> relationship at Sangju Weir

Table 5. Q-Q<sub>TS</sub> relationship at 8 weirs (Nakdong River)

Weir	Relationship
Sangju	$Q_{TS} = 0.3105Q^{1.319}$
Nakdan	$Q_{TS} = 5 \times 10^{-9} Q^{3.0446}$
Gumi	$Q_{TS} = 4 \times 10^{-5} Q^{1.8097}$
Chilgok	$Q_{TS} = 6 \times 10^{-10} Q^{3.3546}$
Gangjung Goryung	$Q_{TS} = 6 \times 10^{-11} Q^{3.5465}$
Dalsung	$Q_{TS} = 6 \times 10^{-9} Q^{2.7078}$
Hapchon Changryung	$Q_{TS} = 4 \times 10^{-11} Q^{3.7201}$
Changryung Haman	$Q_{TS} = 3 \times 10^{-4} Q^{2.0755}$

지점에서 방류되는 유사량을 다음 하류구간의 최상류 경계지점의 유입 유사량으로 제공함으로써 유사이송 연속성을 보장하였다.

이를 위해서 각 보별 유량-유사량 관계를 상류로부터 차례로 유도하였다. 9개 구간 중 최상류에 위치한 구간은 상주보와 안동대교 1.5 km 하류지점(Sta.686) 지점사이 구간으로 낙동

강 하도에 대한 유사이송을 모의 순서로 제일 먼저 이 구간에 대한 유사이송 모의를 실시하여 상주보 지점에서 하류로 방류되는 유량-유사량 관계를 유도하여 다음 구간인 상주-낙단보 구간의 최상류 경계조건 자료로 제공하였다. 이후 하류 방향으로 차례대로 구간별 유사이송 모의를 수행하여 각 보를 통과하는 유량-유사량 관계를 유도하였다. Fig. 7은 본류 4개 지점과 상주보에서의 Q-Q<sub>TS</sub>관계를 도시하고 있으며 Table 5는 낙동강의 8개 보에 대한 Q-Q<sub>TS</sub> 관계식이다.

#### 4.2 유사수지 분석

하도 전구간에 대한 유사수지에 기여하는 유사량은 본류의 최상류로부터 유입되는 유사량, 지류를 통해 유입되는 유입유사량, 최 하류로 방류되는 유출유사량, 인위적 준설/투입량과 전구간에 걸친 하상변화로 나타나는 하도 내에 퇴적/세굴량이 평형을 이루어야 한다(Son and Ji, 2015).

본 연구에서 반영된 9개 지류의 총 면적이 낙동강 전 유역의 56.9%에 불과하며 지류로부터의 유입유사량도 정확치 않아 유사수지를 정확히 예측할 수 없는 것이 현 상황이다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 산정된 구간별 유사이송과 지류로부터의 유입유사량을 기준으로 모의된 결과를 적용하여 유사수지 오차가 가장 작게 발생하는 모의기법에 대한 유사수지 분석 결과를 제시하였다. 특히, 하도 내에서 발생하는 하상변화를 예측하기 위한 유사이송 지배공식은 전 절에서 검토한 결과에 따라 낙동강 전유역에 비교적 높은 적용성을 나타내는 Ackers and White (1973), Engelund-Hansen (1972), 그리고 Yang (1973) 공식 등 3개 경험공식을 이용하였다.

Table 6은 구간별 하도의 침식 또는 퇴적량을 나타내고 있다. Ackers and White (1973), Engelund-Hansen (1972) 공식을 적용할 경우, 지류가 유입되지 않는 낙단보-구미보 구간과

Table 6. Annual sedimentation along Nakdong River bed (1999-2008) (Unit: tons/yr)

Reach	Ackers and White (1973)	Engelund-Hansen (1972)	Yang (1973)
Sta.686-Sangju	164,900	149,850	183,540
Sangju-Nakdan	176,200	183,940	185,950
Nakdan-Gumi	-3,826	-3,762	-2,970
Gumi-Chilgok	98,901	74,957	98,859
Chilgok-Gangjung Goryung (GG)	1,018	15	1,368
GG-Dalsung	134,050	128,860	140,990
Dalsung-Hapchon Changryung (HC)	-12,200	-6,207	14,826
HC-Changryung Haman (CH)	146,430	134,770	140,480
CH- Barrier	241,850	110,820	238,190
Summation*	947,323	773,243	1,001,233

\*Summation: Sum of all sedimentation balance for each reach

**Table 7.** Estimated sediment balance after 4 MRRP (Nakdong River) (Unit: tons/yr)

Sediment	Ackers and White (1973)	Engelund-Hansen (1972)	Yang (1973)
QI	0 ~ 145,833	0 ~ 145,833	0 ~ 145,833
QT	679,602	679,602	679,602
QD	947,323	773,243	1,001,232
QO	4,407	135,430	8,059
Error	-272,128 ~ -126,295	-229,071 ~ -83,238	-329,689 ~ -183,856

달성-합천창령보 구간의 경우 침식현상이 나타나는 것으로 예측되었다. 그러나 Yang (1973) 공식을 적용할 경우, 달성-합천창령보 구간에서 퇴적을 예상하고 있음을 알 수 있다. 또한 우리나라 하천에 Yang (1973) 공식의 적용성이 우수하다는 지금까지의 통상적인 견해와는 달리, Engelund-Hansen (1972) 공식이 가장 작은 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 세 공식(Yang (1973), Engelund-Hansen (1972), Ackers and White (1973)) 모두 낙동강 전체에 대한 유사수지는 퇴적이 우세한 것으로 예측되었다.

최상류단은 안동대교 하류 1.5 km 지점(Sta.686)으로 안동댐과 임하댐의 영향을 고려할 때 상류(포진교)로부터의 유입 유사량은 많지 않을 것으로 예상된다. 그러나 길안천 포진교의 유사량관계식(MOLITb, 2013)을 활용할 경우 낙동강 본류로 유입되는 유사량은 상당할 것으로 예상되어 본 연구에서는 최상류단으로부터의 유사량이 없는 경우와 포진교 공식을 이용하여 산정한 유사량이 유입되는 두 가지 경우에 대하여 유사수지분석을 수행하였다(Table 7). 두 가지 분석결과, 모두 지류로부터의 유입유사량에 따라 전 하도의 유사수지가 침식과 퇴적으로 상반되게 나타났다. 따라서 낙동강에 대한 유사수지 분석 시 어떠한 유사이송 공식을 사용하는가 보다 해석구간의 상류지점 및 지류로부터의 유입유사량의 산정이 더 중요하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 4대강 사업 전후의 유사이송능력에 영향을 주는 수리학적 특성 변화를 분석하고, 낙동강 주요 4개 지점(낙동, 구미, 왜관, 진동)의 유량-유사량 실측값을 분석하여, 각 지점별 지수형 유량-유사량 관계식을 유도하였다. 모든 지점에서 유사이송능은 감소할 것으로 예측되었다. 낙동지점의 경우 4대강 사업 이후 저유량에 대하여, 동수경사는 약 1.5

배 정도 증가하였으나, 개수 후의 소류력은 개수 전 소류력의 약 40%에 불과한 것으로 나타났으며 실제로 4대강 사업 이후인 2013년도 실측결과 사업 이전에 비해 유사이송 능력이 확연히 감소된 것을 확인하였다. 4개 지점에 대한 지수형 관계식의 계수값은 일치하지 않으나 유량-유사량 관계는 거의 유사한 것으로 나타났다.

GUIDE 프로그램에서 제공하는 9개 범용 유사이송능 산정 기법의 적용성을 검토하여 4개 지점별로 적용 가능한 기법을 선정, 제시하였다. 낙동지점에는 van Rijn (1984) 또는 Ackers and White (1973) 공식의 적용성이 우수하였다. 구미와 왜관 지점에서는 Engelund-Hansen (1972) 공식이 우수하였으며, 진동지점에서는 van Rijn (1984) 또는 Engelund-Hansen (1972) 공식의 적용성이 가장 우수하였다.

주요 9개 지류를 포함한 낙동강 전 구간에 대하여 8개 보를 기준으로 9개 구간으로 나누어 준 2차원 수치모형을 적용하여, 구간별 하도내 침식 또는 퇴적량은 물론 장기적 하도 안정화 계획에 필요한 유사수지를 분석하였다. 낙동강 전 구간에 걸쳐 Yang (1973), Engelund-Hansen (1972), Ackers and White (1973) 공식을 적용한 유사수지 분석 결과, Engelund-Hansen (1972) 공식이 가장 작은 오차를 보였으며, 이는 4개 지점별 유사이송능 산정기법 적용성 검토 결과와도 일치한다. 그러나 유사수지분석 오차 범위가 낙동강 9개 지류로부터 유입되는 유사량 오차보다 범위가 더 작게 나타났다. 낙동강의 경우 지류로부터의 유입유사량을 지속적으로 측정하고 산정기법의 정밀도를 향상시키는 것이 시급한 과제를 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ackers, P., and White, W. R. (1973). "Sediment transport: new approach and analysis." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. HY11, Proceeding Paper 10167, pp. 2041-2060.
- Colby, B. R., and Hembree, C. H. (1955). "Computation of total sediment discharge Niobrara river near Cody, Nebraska." *Water Supply Paper 1357*, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- Einstein, H. A. (1950). *The bed load function for sediment transportation in open channel flows*. U.S. Department of Agriculture



- Soil Conservation Service Technical Bulletin, No. 1026.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1972). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Fryirs, K. (2013). "Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 38, pp. 30-46.
- Fryirs, K. A., Brierley, G. J., Preston, N. J., and Kasai, M. (2007). "Buffers, barriers and blankets: the connectivity of catchment-scale sediment cascades." *Catena*, Vol. 70, No. 1, pp. 49-67.
- Heckmann, T., and Schwanghart, W. (2013). "Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment - exploring sediment cascades using graph theory." *Geomorphology*, Vol. 182, pp. 89-103.
- Jain, V., and Tandon, S. (2010). "Conceptual assessment of connectivity and its application to the Ganga river dispersal system." *Geomorphology*, Vol. 118, No. 3, pp. 349-358.
- KSAE (1988). "Regression analysis between specific sediments of reservoirs and physiographic factors of watersheds" *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 30, No. 4, pp. 45-61.
- MLCTa (2012). *River basin surveys*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation.
- MOLITa (2006-2014). *Hydrological annual report in Korea*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation.
- MOLITb (2013). *Basic river plans for Nakdong River*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation.
- MOLITc (2013). *Sediment management planning for river stabilization*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation.
- Ranga Raju, K. G., Garde, R. J., and Bhardwaj, R. C. (1981). "Total load transport in alluvial channels." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. HY2.
- Shao, W., Shi, C., Fan, X., Zhou, Y., and Bai, J. (2015). "Sediment budgets for a sediment-laden river: the lower Wei River in the period 1960-1990." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, pp. 414-426.
- Shen, H. W., and Hung, C. S. (1972). "An engineering approach to total bed material load by regression analysis." *Proceedings of the Sedimentation Symposium*, Chap. 14, pp. 14-1-14-17
- Slaymaker, O. (2003). "The sediment budget as conceptual framework and management tool." *Hydrobiologia*, Vol. 494, pp. 71-82.
- Son, K., and Ji, U. (2015). "Natural and artificial bed change analysis through sediment budget analysis of Nakdong River channel (before the four river restoration project)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 1-8 (in Korean).
- Van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport, part II, suspended load transport." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 110, pp. 1613-1641.
- Yang, C. T., and Francisco, J. M. (2002). *User's manual for GSTARS3*, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation Technical Service Center.
- Yang, C. T. (1973). "Incipient motion and sediment transport." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. HY10, Proceeding Paper 10067, pp.1679-1704.
- Yang, C. T. (1979). "Unit stream power equation for total load." *Journal of the Hydrology*, Vol. 40, pp.123-138.