

낙동강 하도의 유사수지 분석을 통한 자연적 그리고 인위적 하상변동 분석(4대강살리기 사업 이전)

Natural and Artificial Bed Change Analysis through Sediment Budget Analysis of Nakdong River Channel (before the Four Rivers Restoration Project)

손 광 익* / 지 윤**

Son, Kwang Ik / Ji, Un

Abstract

General features of sediment budget for the Nakdong River before the Four Rivers Restoration Project were analyzed using surveying, dredging, and mining data for the past 20 years, as well as sediment data measured from the tributaries, and numerical modeling, etc. As a result of the sediment budget analysis of the Nakdong River before the Four Rivers Restoration Project, sediment inflow supplied from the watershed is 2,100,000 m³/yr and sediment outflow including mining and dredging volumes is 10,180,000 m³/yr. Therefore, the bed change volume estimated by the sediment budget analysis is -8,080,000 m³/yr of the bed erosion volume which is similar to the analysis result (-8,300,000 m³/yr) of natural and artificial bed changes using the surveyed data.

Keywords : bed change, Nakdong River, river mining, sediment budget in the channel, sediment yields, watershed sediment

요 지

본 논문에서는 지난 20여 년간의 낙동강 하상변동 자료와 준설 및 골재채취 자료, 그리고 지류로부터 유입되는 유사량 관측 자료 및 수치모의 자료 등을 조사, 검토, 분석하여 4대강살리기 사업 전의 낙동강 하도에서의 개괄적인 유사수지 특성을 분석하였다. 4대강살리기 사업 전 낙동강 하도의 유사수지분석 결과, 유역에서 하도로 유입된 유사량은 2,100,000 m³/yr이며 낙동강으로부터 유출 또는 준설된 유사유출 총량은 10,180,000 m³/yr인 것으로 나타났다. 따라서 유사수지 분석을 통해 산정된 낙동강 하도에서의 하상변동량은 -8,080,000 m³/yr으로 하상이 침식된 것으로 나타났으며 이는 실제 하도측량 자료 분석을 통해 도출된 낙동강 본류의 자연적 그리고 인위적인 하상변동량(-8,300,000 m³/yr)과 유사한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하상변화, 낙동강, 골재채취, 하도내 유사수지, 비유수량, 유역유사

1. 서 론

낙동강은 우리나라의 대표적 충적하천으로 대부분의

국가하천 구간에 걸쳐 하상이 모래로 이루어져 있는 비교적 안정상태의 하천으로 알려져 있었다. 그러나 이러한 낙동강의 하도 내 유사수지 특성에 관해서는 준설 및 골

* 영남대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수 (e-mail: kison@ynu.ac.kr)
Prof, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., Gyongsan-si 712-749, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·하천 연구소 수석연구원 (e-mail: jiuncivil@gmail.com, Tel: 82-31-9100-229)

Corresponding Author, Senior Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

재채취 등 관련 자료의 의무 보존기간이 짧고 현장에서의 골재채취량이 명확히 집계되지 않는 등의 여러 가지 이유로 공인된 통계자료가 없는 실정이다. 이러한 신뢰성 있는 기초자료 부족은 하천의 수리학적 변화 및 하상변동에 대한 해석결과의 검증에 곤란하게 하며 궁극적으로는 정량적인 하천 관리방안 수립을 어렵게 한다. 특히, 4대강 살리기 사업과 같이 광범위하고 단기적인 하천개수 공사는 하천대응에 따른 2차적 하천환경 변화를 유발할 것이 확실시 되나 이러한 기초자료 부족은 우리하천의 미래에 대한 이해와 예측을 더욱 어렵게 하고 있다. 이러한 문제점으로 인해 지난 10년 동안 낙동강의 하도변화 및 하상변동에 대한 연구들은 준설량과 지형측량 자료 등이 제공되는 일부 구간에 한정되어 수행되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 지난 20여 년간의 준설자료 그리고 지류로부터의 유사유입량 등의 분석 자료를 조사, 검토하여 4대강 살리기 사업 전의 낙동강 하도에서의 개괄적인 유사수지 분석을 수행하고 이를 통해 하상변동 수치 분석 결과를 제시하고자 한다. 또한 유사수지 분석 결과를 통해 도출된 하상변동 수치 분석 결과를 과거 실측 하상변동 자료에 의해 추정되는 하상변동량과 최종 비교·검토하고자 한다.

2. 연구방법 및 범위

본류의 유사수지분석을 위해서는 유역의 수리 수문학적 유출특성은 물론 하상변화, 유역으로부터의 토사유입량, 유량-유사량 관계 및 하상재료의 특성 분석 등이 중요하다. 특히 본류 및 지류하천에서 수행된 골재채취 등의 준설기록 확보와 함께 4대강살리기 사업 이전의 하도변화 특성에 대한 충분한 이해와 자료의 검증이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 낙동강 본류로 유입 또는 유출되는 유사량을 검토하여 유사관련 자료들의 적절성을 검증하고 이를 토대로 유역의 유사수지 특성을 분석·제시하고자 한다. Fig. 1은 하도를 중심으로 발생하는 유출입 유사의 종류를 개념적으로 보여주고 있다.

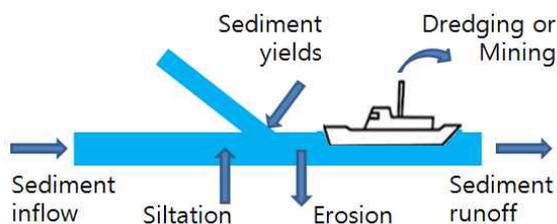


Fig. 1. Typical Incoming and Outgoing Sediments at the River Channel

하도 내 유사수지 분석을 위해 요구되는 유사량은 하도로 유입되는 유역으로부터의 토사유출량(sediment yields, SY), 준설 및 골재채취량(dredging or mining, DM), 하상 및 하안재료의 침식(erosion) 또는 퇴적(sedimentation)으로 인한 유사이송량(sediment transport, ST) 또는 하상변동량(bed change, BC), 하도를 통한 유입유사량(sediment inflow, SI) 및 유출유사량(sediment runoff, SR) 등이 있다. 특히 유역으로부터의 토사유출량은 하도입장에서 보면 유역으로부터 지류를 통해 본류로 유입되는 유사공급원이 된다.

낙동강 하도의 유사수지 분석을 통한 자연적, 인위적 하상변동 분석을 위해 요구되는 자료는 낙동강과 관련된 현재까지의 각종 보고서, 통계자료 및 문헌조사를 통해 수집하였으며 조사된 항목들은 다음과 같다.

- 지류의 유량-유사량 관계
- 유역으로부터의 토사유출량(SY)
- 준설 및 골재 채취현황(DM)
- 하도 구간별 유사수지분석(SI, ST, SR)
- 수리 수문학적 기초자료(수위, 유량 등)
- 하도의 평면적 특성
- 하상재료 특성

본 연구의 대상유역은 낙동강 전체 유역으로, 분석은 크게 유역에서부터 하도로 유입되는 유사량과 하도에서 나가는 유사량을 산정하여 유사수지를 분석(4.1절)하는 부분과 1983년부터 2008년까지의 낙동강 본류 하상변동 실측자료를 이용하여 하도내 침식 또는 퇴적량을 산정한 하상변동량을 분석(4.2절)하는 부분으로 구분된다. 유사수지 분석을 위한 토사유출량은 1999년부터 2008년까지 낙동강의 제 1지류 중 유량-유사량 관계식 또는 실측자료가 있는 내성천, 영강, 감천, 금호강 등 4개 지류 유역으로부터 본류로 유입되는 유사량과 12개 소유역(미천, 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강, 양산천)에 대한 SWAT 분석(MOLIT, 2013) 결과를 종합하여 유역으로부터의 토사유출량을 산정하였다. 유사수지 분석을 위한 하도에서 빠져나가는 유사량은 국토교통부에서 제시한 통계자료에 근거하여 1998년부터 2006년까지의 지난 20여 년간의 낙동강 유역 하천골재채취량과 준설통계 자료 등을 근거로 하도의 준설량 및 하구유출 유사량을 검토하였다. 본 연구에서 활용한 자료 및 이용년도, 관련 정보 등은 Fig. 2의 개략도로 종합하여 표현하였다. 자료의 종류에 따라 유용한 기간이 달라 부

특이하게 자료마다 검토기간에 다소 차이가 있으며 이 문제를 극복하고자 총량개념이 아닌 연평균 개념을 통해 비교 및 수지분석을 수행하였다.

3. 낙동강의 장기하상변동 추이

낙동강에 대한 하상변동 조사는 「조선하천조사서」가 최초의 기록이며 이 조사서에는 당시에 측정된 하천별 최심하상고와 연도별 홍수위가 기록되어 있다(Kim et al., 2009). Kim et al. (2009)에 의하면 1929년 이후 2005년까지 낙동강 하류 약 90km 구간에서는 일부 구간을 제외하면 전반적으로 하상이 낮아졌으며 특히 수산과 삼랑진 구간, 그리고 구포와 하구 구간에서 5m 내외로 하상고가 많이 저하되었다. 그러나 이 구간은 대규모 댐 건설이 이루어지지 않았으며 다만 1987년 낙동강 하구둑 건설 이후, 구포와 하구둑 사이에서 매년 유지 준설과 함께 상류인 진동 부근에서는 골재 채취가 이루어져 왔다. 따라서 본류 중 하구둑~진동 구간의 하상 저하의 주원인은 골재 채취 또는 유지 준설인 것으로 판단된다.

낙동강 본류에 대한 정성적 하상변화를 분석하기 위하여 본류를 주요 지류가 유입되는 8개 구간으로 나누었으며 각 구간에 대한 검토를 수행하였다. MOC (1983, 1993)와 MLTM (2010)에 의하면 안동댐-내성천합류점 구간의 경우 1983년에서 1993년 사이에 하상이 일부 구간에서 1m 내외로 저하되었으나, 1993년에서 2008년 사이에는 거의 변화가 없었고 평균적으로는 하상이 다소 저하된 것으로 나타났다. 내성천합류점에서 위천합류점 구간의 경우 1983년부터 1993년까지 상류측에 1m 내외의 퇴적이 발생하였으나 1993년부터 2005년까지 하상은 다시 1983년 하상과 거의 동일한 상태로 환원되었다. 위천합류점에서 감천합류점 구간 상류의 경우 1983년부터 2005년까지 거의 변화가 없었으나 중하류 구간의 경우 1993년부터 2005년 사이에 평균하상고는 약 1m에서 2m 정도 낮아진 것으로 나타났다. 감천합류점-금호강합류점 구간 상류의 경우 1983년부터 1993년까지 상류의 평균하상변화는 거의 없었으나 하류의 경우 2m에서 4m의 하상저하가 발생하였다. 1993년부터 2005년은 전구간에 걸쳐 2m에서 4m 정도의 하상저하가 관측되었다. 금호강합류점-회천합류점 구간의 경우 1983년부터 1993년까지는 상류에서 2m에서 3m의 하상저하가 관측되었으며 1993년부터 2005년까지는 전구간에 걸쳐 3m에서 5m 내외의 심한 하상저하가 관측되었다. 회천합류점-남강합류점 구간의 경우 1983년부터 1993년까지 거의 평형상태를 유지하였으나 1993년

부터 2005년까지 전구간에 걸쳐 약 2m에서 3m 이내의 하상저하가 발생하였다. MOC (1981, 1992)와 MLTM (2010)에 의하면 남강합류점-밀양강합류점 구간의 경우 1981년부터 1991년까지는 거의 변화가 없으나 1991년부터 2005년까지는 2m에서 4m 내외의 하상저하가 관측되었다. 밀양강합류점-하구둑 구간의 경우 1981년부터 1991년 사이 평균하상고는 약 1m에서 2m 저하되었으나 1991년부터 2005년 사이의 평균하상고는 약 2m에서 3m 이상 저하된 것으로 나타났다.

이상에서 검토된 하도변화 특성을 종합하면 낙동강 본류 하도는 극히 일부 구간을 제외하면 전반적으로 하상이 저하된 사실을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 제시하는 유사수지 분석과 하상변동량 분석 결과에서 확인할 수 있으며 그 원인에 대해서는 다음 장에서 검토하였다.

4. 유사수지 및 하상변동량 특성 분석

4.1. 하도준설 및 토사유입 특성

4.1.1. 유역으로부터의 유사유입량

유역 상류로부터의 지류를 통해 하도로 유입되는 유사유입량, 즉 토사유출량(SY)을 산정하기 위하여 본 연구에서는 안동댐, 반변천, 송야강, 덕천강, 함안천 및 소하천 등을 제외한 12개 지류유역(Table 1)에 대하여 1999년부터 2008년까지 10년 기간에 대한 토사유출량 분석을 실시하였다. MOLIT (2013)는 12개 유역에 대한 SWAT 분석을 통하여 토사유출량을 산정 제시하였으나(Table 1의 SWAT column) 실측값이 있는 지점과 비교해 봤을 때 그 규모가 일반적으로 알려진 값에 비하여 다소 작게 산정된 것으로 판단된다. 이는 SWAT 모의시 댐 방류지점을 본류와 연계된 지류의 최상류점으로 지정하여 댐에서의 실제 방류량과 실측한 부유물질 농도를 입력하여 유사모의를 수행(Ji et al., 2014)한 것이 유역 출구에서의 토사유출량 값이 다소 작게 산정된 원인 중 하나라고 판단된다.

낙동강 제 1지류의 유량(Q)-총유사량(Qs) 관계식이거나 실측치가 제공되는 보고서로는 낙동강유역조사보고서(MOCT, 2004)와 수문조사보고서(MLTM, 2011)가 있다. 그러나 수문조사보고서의 경우 2010년 현재 관측 기간이 짧고 관측 자료가 다소 제한적이다. 따라서 유량(Q)-총유사량(Qs) 관계식이 제공되는 내성천, 감천, 금호강의 3개 지점은 낙동강유역조사보고서(MOCT, 2004) 자료를 인용하였으며 영강의 경우 수문조사보고서(MLTM, 2011)에서 제공하는 자료로부터 관계식을 유도하였다. 이들 관

Table 1. Annual Mean Sediment Yields of the Tributaries in the Nakdong River Watershed

Tributary	Sub-basin area (km ²)	Q-Qs Relation ¹⁾ (m ³ /yr)	SWAT ²⁾ (m ³ /yr)	Adjusted Value ³⁾ (m ³ /yr)
Mi Stream	375		915	2,931
Naesung Stream	1,817	343,348	208,335	343,348
Young River	914	50,179	30,234	50,179
Byeongseong Stream	435		15,273	48,926
Wi Stream	1,406		30,072	96,333
Gam Stream	1,003	539,260	87,487	539,260
Geumho River	2,108	193,141	25,420	193,141
Hoe Stream	781		17,344	55,560
Hwang River	1,329		9,524	30,509
Nam River	3,510		1,172	3,754
Miryang River	1,448		3,185	10,203
Yangsang Stream	243		1,639	5,250
Total (SWAT modeling area)	15,369	1,125,928	430,600	1,379,396
Total (Nakdong River Basin)				= 1,379,396 / 65.7% ⁴⁾ ≒ 2,100,000

- 1) Q-Qs relations of the tributaries: $Q_s=3.7419Q^{1.4292}$ for Naesung Stream (MOCT, 2004), $Q_s=0.04724Q^{1.9612}$ for Young River (MLTM, 2011), $Q_s=44.106Q^{1.2613}$ for Gam Stream (MOCT, 2004), and $Q_s=0.0196Q^{2.2313}$ for Geumho River (MOCT, 2004)
- 2) Sediment yields estimated by SWAT modeling (MOLIT, 2013)
- 3) Sediment yields of 1) for Naesung Stream, Young River, Gam Stream, and Geumho River; sediment yields multiplied by 3.2 of the adjustment coefficient for other tributaries
- 4) SWAT modeling area=65.7% of total area of the Nakdong River basin

계식과 1999년부터 2008년 사이의 일평균 유량자료를 이용하여 각 지류별 총토사유출량과 연평균 값을 산정하였다(Table 1의 Q-Qs 관계 column). 그 결과, 4개 유역(내성천, 영강, 감천, 금호강)에 대한 Q-Qs 관계식으로부터 산정된 토사유출량 값은 동일 유역에 대한 SWAT 분석 결과 보다 약 3.2배 크게 산정된 것을 알 수 있다. Q-Qs 관계식으로부터 산정된 토사유출량 값은 SWAT 분석결과에 비해 상대적으로 그 정량적 신뢰성이 높으나 적용할 수 있는 유역에 한계가 따르는 반면 SWAT 분석결과는 12개 유역에 대한 상대적 토사유출량의 비를 보여줌으로써 유역간의 정성적 규모를 비교하기에 적합하다.

따라서 Q-Qs 관계식이 있는 4개 유역에 대해서는 관계식으로부터 산정된 토사유출량 값을 그대로 사용하였으며 Q-Qs 관계식이 없는 8개 지류유역으로부터의 토사유출량은 SWAT 값에 보정비(3.2)를 곱한 값을 적용하여 Table 1의 보정 column에 수록하였다. 이 경우 12개 지류유역으로부터의 토사유출량은 1,379,396 m³/yr 또는 3,650,000 ton/yr 규모가 된다. 한편, 12개 지류의 유역면적은 낙동강유역 총면적 23,384 km²의 65.7%인 15,369 km²이며 면적비에 따른 가중치를 고려할 경우 낙동강 전 지류유역으

로부터 하도로 유입되는 토사 총량은 2,100,000 m³/yr 또는 5,570,000 ton/yr인 것으로 추정된다. 이 값을 비유사량으로 환산할 경우 238 ton/km²/yr에 해당한다.

일반적으로 알려진 우리나라의 비유사량은 100에서 500 ton/km²/yr으로(Woo, 2001) 댐 유역의 비유사량 값(Table 2)과 본 연구에서 산정한 비유사량 238 ton/km²/yr은 유효 범위 내의 결과를 보이고 있다. 다만 남강댐의 비유사량을 참고할 때 낙동강 일부 소유역의 실제 비유사량은 300에서 400 ton/km²/yr에 이를 것으로 판단된다.

4.1.2. 하도준설 및 골재채취

하도에 대한 유사수지 분석을 위해서는 분류 및 지류를 통해 유입되는 유사량(SY, SD)은 물론 하도에서의 골재채취를 포함한 준설량(DM)에 대한 정량적 통계자료가 필수적이다. 그러나 이미 잘 알려진 바와 같이 우리나라의 경우 하도준설에 대한 신뢰성 있는 자료가 거의 없는 상태일 뿐만 아니라 하도로 유입되는 상류유역으로부터의 토사유출량(SY)도 체계적으로 검토된 자료가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 준설량(DM)에 대한 개략적인 규모를 조사 검토하였으며 이를 최종 유사수지 분석

Table 2. Sediment Yields at the Dams and Estuary Barrages (MOC, 1992)

Location	Basin Area (km ²)	Sediment Yields (ton/km ² /yr)
Nam River Dam	2,285	436
Andong River Dam	1,584	207
Seomjin River Dam	763	414
Sapgyo Lake	1,263	408
Asan Lake	1,369	326

에 적용하였다.

e-National Index (2014)에 따르면 1998년부터 2006년까지 낙동강유역에서 채취된 골재총량은 262,857,000 m³으로 이 중 하천골재가 차지하는 비를 고려할 때 하천골재 채취량은 51,458,000 m³에 이른다. 즉 낙동강의 본류와 지류에서 1998년부터 2006년 동안 연평균 5,718,000 m³/yr 규모의 골재채취가 행해진 것으로 추정되며 골재채취 규모는 1996년을 정점으로 점차 지속적으로 감소, 2002년 이후 상향 안정추세를 유지하다 2006년 이후 하향 추세가 있다.

한편 2007년도 낙동강 유역종합치수계획에 대한 감사원 감사결과에 따르면 지난 1983년부터 2002년까지 20년간 낙동강에서의 준설량은 약 200,000,000 m³에 해당하는 연 평균 4cm 정도의 하상저하가 발생하였으며 낙동강하구둑 상류구간에서는 680,000 m³/yr, 하류구간에서는 180,000 m³/yr 규모의 준설이 이루어졌다(Lee, 2009). 이는 해류에 의한 하구둑 하류의 토사이동이 없다고 가정할 경우 하구둑 하류에서 준설되는 180,000 m³/yr 이상의 토사가 매년 하구둑을 통해 방류되었다는 것으로 해석할 수 있다.

준설량과 골재채취량은 다르지만 하구둑 상류에서의 준설량 680,000 m³/yr은 골재로 사용하기 부적합하며 따라서 이 준설량은 골재채취량에 포함하기 곤란하다. 그러나 나머지 준설토는 모두 골재로 사용할 수 있다고 가정하면 1983년부터 2002년까지의 연평균 골재채취량은 9,320,000

m³/yr (Fig. 2)으로 193,880,000 m³의 하천골재 채취가 이루어졌다고 할 수 있다. 이는 e-National Index (2014) 자료에서 나타난 매년 5,718,000 m³의 골재채취량의 약 163%에 해당하는 값이다. 하천골재 채취의 경우 통계적으로 나타나는 채취량과 실제 채취량은 최대 두 배 정도 차이가 날 수 있다는 일반적인 현황을 감안한다면 지난 20년간 낙동강에서의 준설량은 약 200,000,000 m³, 골재채취량은 매년 약 10,000,000 m³ 내외에 달하는 것으로 판단된다.

4.1.3. 낙동강 유역의 유사수지 분석

앞 절의 분석결과를 Table 3과 Fig. 2에 각각 정리하면 유사공급량(incoming sediment)으로는 유역상류로부터의 토사유입량이 2,100,000 m³/yr이며, 유사유출량(outgoing sediment)으로는 골재채취량이 9,320,000 m³/yr, 하구둑 상류에서 준설되는 준설량이 680,000 m³/yr, 외해로 방류되는 유사량이 180,000 m³/yr으로 낙동강으로부터 유출 또는 준설되는 유사유출 총량은 10,180,000 m³/yr에 이르는 것으로 판단된다. 따라서 유사수지 분석을 통해 산정되는 낙동강 하도에서의 하상변동량은 -8,080,000 m³/yr (= 2,100,000 m³/yr - 10,180,000 m³/yr)으로 하상이 침식된 결과가 도출되었다(Fig. 2 참조). 이는 3장의 문헌조사를 통해 검토한 낙동강의 장기하상변동 추이와 유사한 결과라고 할 수 있다. 유사수지 분석을 통해 도출된 하상변동량과 하상변동 수치 분석 결과는 다음 절의 하천횡단면

Table 3. Sediment Budget Analysis of the Nakdong River

Sediment Classification	Incoming Sediment (m ³ /yr)	Outgoing Sediment (m ³ /yr)
Sediment yields from the watershed (SY)	2,100,000	
Sediment Runoff or Outflow (SR)		180,000
Mining Volume		9,320,000
Dredging Volume at the Upstream Channel of NREB		680,000
Total	2,100,000	10,180,000

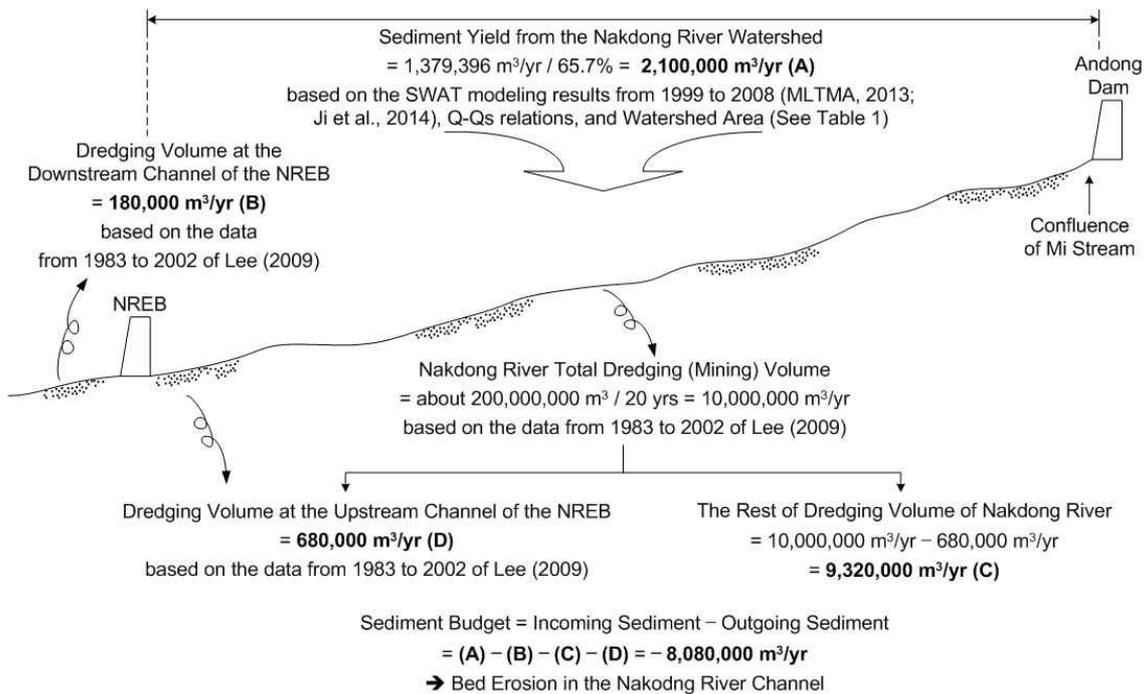


Fig. 2. Sediment Budget Analysis of the Nakdong River Watershed

실측자료를 이용한 하상변동량 분석 결과 값과 다시 비교 및 검증하였다.

4.2. 실측자료를 활용한 하상변동량 분석

MOC (1981, 1983, 1992, 1993)와 MLTM (2010)의 낙동강 본류에 대한 하천기본계획에 수록된 하천횡단면 실측 자료를 이용하여 과거 25년(1983년부터 2008년까지) 동안의 하천단면 변화에 따른 하상변동량을 산정하였다. 특정 기간 동안 두 횡단지점 사이의 하상변동량은 두 횡단지점 사이의 거리와 각 횡단면 변화 자료로부터 산정할 수 있다. 하상변동량 산정 시 적용된 가정은 다음과 같다.

- 각 횡단지점별 침식/퇴적단면 변화량(A)은 특정기간 동안 해당 지점의 수면 아래 통수단면적 변화량과 동일(Fig. 3).
- 하상변동량은 특정 횡단지점의 통수단면적 변화량(A_n)을 밑변 넓이로, 유효구간 거리를 높이로 하는 직

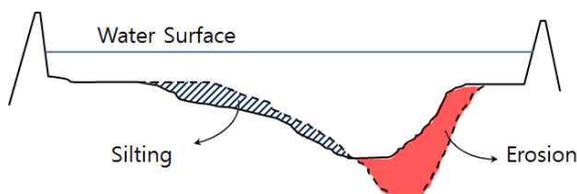


Fig. 3. Cross-sectional Area of Erosion and Sedimentation (solid line: past, dash line: present)

육면체의 체적(Fig. 4).

- 특정 횡단지점(St. n)의 유효구간이란 통수단면적 변화량(A_n)이 일정하다고 가정된 구간으로 인접한 횡단지점과의 1/2까지의 거리 즉, L_n/2 (Fig. 4).
- 인접한 두 횡단지점사이의 좌안과 우안의 거리(L_n)는 유효길이와 동일(Fig. 4).

한편, 통수단면적 변화량은 단면산정을 위한 기준수위에 따라 달라진다. 예를 들어 설계홍수량과 같이 높은 수면을 기준수위로 책정할 경우 하폭확대 개수사업 등의 영향으로 실제 하상변동량과는 다른 값을 제시할 수 있다 (Fig. 5). 지난 25년간 광범위한 하천 개수가 이루어 졌던 점을 감안하면 설계홍수량에 대한 수위를 기준으로 할 경우 통수단면변화를 과대 산정할 가능성이 있다. 또한 연평균 홍수량에 대한 수면을 기준 수위로 선정할 경우 홍수터 등에서 발생하는 퇴적/침식량이 무시되는 오류를 범할 수 있다. 이 기준수면 중 어느 것이 더 적절한가 하는

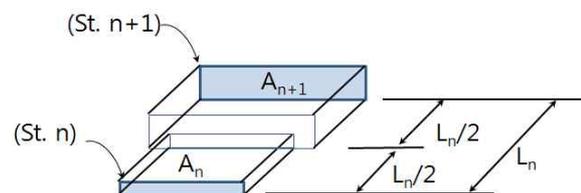


Fig. 4. Typical Estimation of Erosion/Sedimentation Volume

것은 아직 명확히 밝혀진 바 없으나 낙동강의 경우 Yu (2011)는 연평균 유량 또는 풍수량유량에 대한 평균하상은 저수로 하상과 비슷하다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 저수로 하상을 나타내는 연평균유량 및 설계범위 내에서는 최대유량인 설계홍수량에 대한 하상변동량을 동시에 산정하여 비교 검토하였다(Table 4).

낙동강 본류 전 구간(하구둑-안동댐)에 걸친 하상변동량은 각 횡단지점의 유효구간에 대한 하상변동량의 총 누계로부터 산정하였다(Table 4). Table 4로부터 하상변동량은 기준 수면수위에 따라 다르다는 것을 재확인할 수 있었다. 특히 연평균 수면수위를 기준으로 산정한 침식량이 100년 빈도 홍수위에 비해 크게 나타난 것으로부터 저

수로에서는 침식현상, 홍수터에서는 퇴적현상이 있었음을 유추할 수 있으며 이는 일반적 물리적 현상과도 잘 일치한다. 아울러 하상변동량(BC)을 단정적으로 제시하기는 곤란하나 11,500,810 m³/yr와 5,173,602 m³/yr의 평균값인 8,300,000 m³/yr 규모의 침식현상이 있었음을 알 수 있는데 이 값은 하도에서의 인위적 골재채취와 하도의 유사이송 기능에 복합적으로 기인한 것이다.

따라서 실제 하도측량 자료 분석을 통한 낙동강 본류의 자연적 그리고 인위적인 하상변동량은 -8,300,000 m³/yr (Table 4)인 것으로 해석할 수 있다. 이는 4.1절의 유사수지분석을 통해 추정된 하상변동량인 -8,080,000 m³/yr과 유사한 값으로 두 값의 추정 오차는 2.65%(실측자료를 통한 하상변동량 값 기준)로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 낙동강 하도를 중심으로 하도로 유입된 유사량과 준설/골재채취 및 외해로 방류된 유사유출량의 수지분석을 통해 지난 20여 년간 낙동강 본류의 하상변화 규모를 정량적, 정성적으로 검토하였으며 이를 실제 하도측량 자료를 활용하여 산정한 자연적 그리고 인위적인 하상변동량 값과 비교하였다.

지류별 유량-유사량 관계와 SWAT 모델링 자료를 이용한 해석학적 토사유출량 산정결과, 낙동강 유역으로부터 하도로 유입되는 토사 총량은 2,100,000 m³/yr인 것으로 추정되었으며 비유사량으로 환산했을 때 낙동강 전유역의 평균 비유사량은 약 240 ton/km²/yr인 것으로 나타났다.

낙동강 하도로의 유사공급량으로는 유역상류로부터의

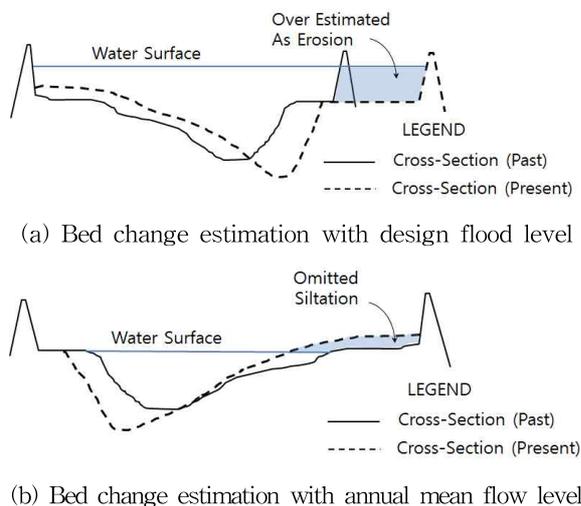


Fig. 5. Errors in Estimation of Erosion/Sedimentation Volume

Table 4. Bed Change Estimation Based on Different Water Level Conditions

Station No.	Bed Change Volume (m ² ·km)		Other
	Annual Mean Flow	100-yr Flood	
0-122	-67,985	-62,140	NREB - Miryang River
122-203	-33,835	-34,573	Miryang River - Nam River
203-260	-11,256	-10,560	Nam River - Hoe Stream
260-363	-54,717	109,452	Hoe Stream - Geumho River
363-468	-63,180	-85,030	Geumho River - Gam Stream
468-514	-14,147	-24,633	Gam Stream - Wi Stream
514-579	-6,615	-4,481	Wi Stream - Naesung Stream
579-697	-12,784	-7,029	Naesung Stream - Andong Dam
Total (m ² ·km)	-264,519	-118,993	
Mean (m ² ·km/yr)	-11,501	-5,174	
Mean (m ³ /yr)	-11,500,810	-5,173,602	Average: -8,300,000

토사유입량이 2,100,000 m³/yr이며, 유사유출량으로는 골재 채취량이 9,320,000 m³/yr, 하구둑 상류에서 준설되는 준설량이 680,000 m³/yr, 외해로 방류되는 유사량이 180,000 m³/yr으로 낙동강으로부터 유출 또는 준설되는 유사유출 총량은 10,180,000 m³/yr에 이르는 것으로 나타났다. 따라서 유사수지 분석을 통해 산정된 낙동강 하도에서의 하상변동량은 -8,080,000 m³/yr으로 하상이 침식된 결과가 도출되었다. 실제 하도측량 자료 분석을 통한 낙동강 본류의 자연적 그리고 인위적인 하상변동량은 -8,300,000 m³/yr인 것으로 나타나 유사수지분석을 통해 추정된 하상변동량 값과 2.65% 오차범위 내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다.

결국 하상변화로 인하여 하도로부터 공급된 것으로 산정된 유사량과 하도로부터 채취된 골재량은 그 규모가 비슷한 것으로 나타나 지난 20여 년간 낙동강 하상이 저하된 주원인이 골재채취에 의한 것임을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

e-National Index (2014). www.index.go.kr
 Ji, U., Kim, T., Lee, E., Ryoo, K., Hwang, M., and Jang, E. (2014). "Analysis of Sediment Discharge by Long-term Runoff in Nakdong River Watershed using SWAT Model." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 723-735.
 Kim, W., Kwon, S.I., Kim, D.G., and Kim, Y.J. (2009). "History of Hydrologic Investigation in Modern Korea." *Proceedings of Korea Water Resources Association 2009*, pp. 362-365, Korea Water Resources Association, Yongpyung, Korea.

Lee, J.K. (2009). *Fragmentary Thought about Problems of Nakdong River Dredging and Water Quality Pollution (in Korean)*. http://konect.eduhope.net.
 MLTM (2011). *Hydrologic Investigation Report for 2010 (in Korean)*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
 MLTM (2010). *Implementation Design for Nakdong River (in Korean)*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
 MOLIT (2013). *A Study on Sediment Management Planning for Channel Stabilization (in Korean)*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
 MOC (1981). *The basic plan of stream-improvement for Nakdong River (in Korean)*. Ministry of Construction.
 MOC (1983). *The basic plan of stream-improvement for Nakdong River (in Korean)*. Ministry of Construction.
 MOC (1992). *Research of sediment yield rate for dam design (in Korean)*. Ministry of Construction.
 MOC (1993). *The basic plan of stream-improvement for Nakdong River (in Korean)*. Ministry of Construction.
 MOCT (2004). *Nakdong River Basin Investigation Report (in Korean)*. Ministry of Construction and Transportation.
 Woo, H.S. (2001). *River Hydraulics*. Cheong Moon Gak Publisher, Korea.
 Yu, K. (2011). "New Concept of Average River Bed and General Trend of River Bed Change in the Nakdong River." *The Journal of the Korean Contents Association*, Vol. 11, No. 6, pp. 486-494.

paper number : 14-106
 Received : 30 October 2014
 Revised : 5 December 2014
 Accepted : 5 December 2014