측정자료 기반의 유사 수지 분석과 하천 측량에 의한 하상 변동량의 비교: 금강 일부 구간에 대한 사례 적용

Comparison of Riverbed Changes between Sediment Budget Analysis with Measured Data and River Survey: Case Application to Part of Geumgang

강태욱* · 진영규** · 서효원*** · 이남주**** · 김창성*****

Kang, Taeuk*, Jin, Youngkyu**, Seo, Hyowon***, Lee, Namjoo****, and Kim, Chang-Sung*****

Abstract

Sediment measurement data are utilized as basic data for various river plans and research. The aim of this study is to compare between sediment budget analysis and riverbed monitoring results. The spatial range was from the Gongju-si (Gemganggyo) station to the Buyeo-gun (Baekjegyo) station in Geumgang, and the temporal range in this study was from 2011 to 2016. The estimated change in riverbed amount using the sediment budget analysis was 2,430,243 tons for sediments loaded over six years in the section. The analyzed riverbed changes sedimentation using the riverbed monitoring method were 2,165,146 tons based on the low level and 3,055,489 tons based on the flood level. Based on the riverbed monitoring performance, the relative errors in the sediment budget analysis results through sediment measurements were 10.9% and -25.7% for the low water and flood levels, respectively.

Key words : Sediment, Sediment Budget Analysis, Relationship of Flow-Sediment, Sediment Measurement

요 지

하천의 유사량 측정자료는 다양한 하천 계획과 연구에 기초자료로 활용된다. 이 연구에서는 다년간의 하천 단면 측량 결과와 유사량 측정자료 기반의 유사 수지 분석 결과로 산정된 하상 변동량을 비교·검토하였다. 유사 수지 분석의 공간적 범위는 상·하류 경계 및 지류 하천에서 유량 및 유사량이 모두 측정된 금강의 공주시(금강교) 수위관측소부터 부여군(백제교) 수위관측소 구간이고, 시간적 범위는 2011년부터 2016년까지이다. 분석 결과, 분석 대상 구간에서는 6년간 2,430,243 ton의 유사량이 퇴적되는 것으로 분석되었다. 한편, 대상 구간에 대하여 측량된 하천 지형을 이용하여 하상 변동량을 산정하였다. 그 결과, 저수위 기준의 퇴적량은 2,165,146 ton, 홍수위 기준의 퇴적량은 3,055,489 ton으로 분석되었다. 하천 측량 성과를 기준으로 볼 때, 조사된 하상 변동량과 유사 수지 분석 결과로 산정된 하상 변동량의 차이는 저수위와 홍수위 기준에서 각각 10.9%와 -25.7%로 분석되었다.

핵심용어 : 하천 유사량, 유사 수지 분석, 유량-유사량 관계, 유사량 측정

*정회원, 부경대학교 방재연구소 전임연구교수(E-mail: ktw62@hanmail.net)

Member, Research Professor, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University

**교신저자, 정회원, 부경대학교 방재연구소 전임연구원(Tel: +82-51-629-7723, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: accvn75@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Researcher, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University

***부경대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: dogwed@naver.com)

Master Course, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

****정회원, 경성대학교 토목공학과 교수(E-mail: njlee@ks.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyungshin University

*****정회원, 한국수자원조사기술원 연구개발실 선임연구원(E-mail: cackim@kihs.re.kr)

Member, Senior Researcher, R&D Division, Korea Institute of Hydrological Survey

1. 서 론

하천의 유사량은 유사의 이동률을 의미하고, 단위 시간당 무게 또는 단위 시간당 부피로 나타낸다. 하천에서 유사 이송은 소류사와 부유사 형태로 발생하며, 이를 합한 것이 총 유사량이 된다. 소류사는 하천 바닥에서 조립토가 구르고 미끌어지며 도약하면서 하류로 이동하며, 부유사는 흐름에 의한 난류 운동에너지에 의해 유수 중에 부유 상태로 하류로 이동한다(Choi et al., 2017).

하천의 유사량 추정에는 하천 내의 수리구조물의 설계 및 유지관리, 하천 개수 및 하도의 안정, 홍수터 관리, 저수지의 설계 및 운영 등 하천 계획에 필요한 기본적 요소 중 하나이다(Han et al., 2011). 우리나라에서는 1960~1970년대부터 전국 유역조사 사업과 IHP 사업에서 유사량 조사가 처음 시작된 이후, 2000년대에는 전국 유역조사 사업의 재실시와 수문조사 사업이 진행되면서 유사량 조사가 본격적으로 수행되었다(Kim and Kwon, 2018). 한국수자원조사기술원에서는 매년 전국의 주요 지점에서 유사량 측정을 수행하고 있는데, 2021년 현재 4대강 권역의 유사량 측정 지점은 24개소이다(ME, 2021).

한편, 한국수자원조사기술원에서는 하천유사량이 관측되는 지점에서 부유사 농도를 측정하여 하천의 부유사량을 측정한다. 그리고 부유사의 입경 분포, 하상토의 입도 분포, 관련 수리 인자 등을 수정 아인슈타인 방법(modified Einstein procedure)에 적용하여 소류사량을 추정하여 총 유사량을 산정한다(ME, 2020). 따라서 조사된 총 유사량은 직접 측정치가 아닌 추정치로서 측정 오차(error of measurement) 이외에도 추정 오차를 포함할 수 있다. 이와 관련하여 환경부에서는 수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률과 환경부 고시 제2018-94호 ‘수문조사시설의 설치환경 및 유지·관리와 수문자료의 품질관리기준’의 제14조에 따라 유사량 등의 측정 성과에 대한 품질관리 방법을 제시하고 있다. 하지만 해당 기준은 품질관리의 방법론만 제시하고 있고, 측정 결과의 적절성은 다루고 있지 않다.

하천의 유사량과 관련된 연구들은 매우 다양한데, 이를 큰 범주로 구분하면 3가지로 구분될 수 있다. 첫 번째는 유역의 토양 침식량 결정을 통한 토사유출량 산정에 관한 연구이다. 이는 범용토양손실공식(universal soil loss equation, USLE) 등을 이용하여 유역의 강우-유출과 함께 발생하는 유역의 토사유출량 산정에 관한 연구로서 궁극적으로 하천으로 유입되는 유사량을 결정하는 연구(Park and Kim, 2006; Son and Roh, 2009; Kwon and Kim, 2020 등)이다. 이때 일반적으로 모형에 의해 분석된 유사량을 검증하기 위해 측정된 하천 유사량이 사용된다. 두 번째는 하천의 하상 변동 분석에 관한 연구로서 수공구조물의 변화, 하도 정비 및 준설, 유형의 변화 등 주로 하천의 수리·수문 변화에 따른 영향을 분석하는 것이다. 이때 상대적으로 긴 연장의

Fig. 1. Flow Chart of the Error Analysis for Sediment Measurement by Sediment Budget Analysis

하천 구간에 대하여 장기간 발생하는 1차원적 하상 변동을 분석하는 연구와 단기간의 홍수로 인해 만곡부 등에서 나타나는 평면적 변화를 분석하는 2~3차원의 하상 변동 분석에 관한 연구로 구분될 수 있다. 특히, 이러한 하상 변동 분석에 관한 선행 연구 사례는 매우 많다(Hwang et al., 2013; Son et al., 2015; Park et al., 2018; Kim and Kim, 2020 등). 세 번째는 하천의 유사 이동에 적합한 유사량 공식 선정에 관한 연구로서 주로 하상 변동 분석을 통해 결정된다. 이는 경험적으로 유도된 다양한 유사량 공식 중 대상 하천에 적합한 유사량 공식 선정에 관한 연구들이 해당된다(Ahn et al., 2010; Son and Jang, 2017; Lee et al., 2021 등).

하천의 유사량에 관한 대부분의 연구에서는 측정된 부유사량과 하상토 재료 및 수리 특성 인자를 이용하여 추정된 총 유사량에 근거하여 모형을 구성하고 분석한다. 하지만 추정된 총 유사량에 대한 검증이나 측정된 유사량 자료를 이용한 하상 변동량 분석에 관한 연구 사례는 없다. 이 연구의 목적은 하천 유사량 측정자료를 이용하여 산정한 하상 변동량과 실제 장기간의 하천 측량을 통해 조사된 하상 변동량을 비교·검토하는데 목적이 있다. 이를 위해 본류 및 지류의 유량 및 유사량 측정 기록이 모두 존재하는 금강의 일부 구간을 대상으로 유사 수지 분석(sediment budget analysis)을 수행하였다(Fig. 1). 유사 수지 분석은 유량 및 유사량의 측정자료를 기반으로 수행되었고, 하도 변화 측량 결과를 이용하여 유사 수지 분석과 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 분석 대상 구간

MLIT (2016)에서는 4대강 유역에 대하여 하천 변화 모니터링 망을 구축하여 2011년부터 2016년까지 하도 변화를 분석하였다. 본 연구에서는 수문조사 보고서를 통해 2011년부터 2020년까지 금강 유역의 유사량 측정자료를 조사하여 적정 대상 구간을 선정하였다.

선정된 분석 대상 구간은 공주보 상류의 공주시(금강교)

Fig. 2. Stream Section and Stations for Sediment Budget Analysis

수위관측소부터 백제보 하류에 위치한 부여군(백제교) 수위 관측소까지이다. 해당 금강 본류 구간의 거리는 31.32 km이고, 해당 구간 내에 정안천, 유구천, 지천이 차례로 합류된다. Fig. 2는 분석 대상 구간의 수위관측소와 유량, 유사량의 측정 위치를 표시한 모식도이다.

2.2 유사 수지 분석 방법

유사 수지 분석은 특정 영역 내 토사의 생산 또는 침식, 유입, 이송, 퇴적, 유출을 분석하는 것을 의미한다. 이때 분석대상 영역은 유역, 하도 구간, 해역 등이 될 수 있고, 유사 수지 분석은 이러한 영역에서 유사의 유입과 출입의 균형을 분석하는 것이다(Kim, 2010). Son and Ji (2015)는 하도를 중심으로 발생하는 유출입 유사의 종류를 Fig. 3과 같이 제시하였다. 하도 내 유사 수지의 구성요소에는 유역으로부터 하도로 유입되는 토사유출량(sediment yields), 준설 및 골재채취량(dredging or mining), 하상 및 하안재료의 침식(erosion) 또는 퇴적(sedimentation)으로 인한 유사 이송량(sediment transport) 또는 하상 변동량(bed change), 하도를 통한 유입 유사량(sediment inflow) 및 유출 유사량(sediment runoff) 등이 있다(Son and Ji, 2015).

유사 수치 분석은 상기의 구성요소들로 나타내어질 수 있는데, 이와 관련하여 Lee et al. (1996)은 유사 수치 분석의 연속 방정식을 Eq. (1)과 같이 간단히 제시하였다.

$$S_i - S_o = D \quad (1)$$

여기서 S 는 상류 경계와 지류 하천을 통한 유입 유사량이

Fig. 3. Typical Incoming and Outgoing Sediments at the River Channel (Son and Ji, 2015)

고, S_0 는 하류 경계와 준설을 통한 유출 유사량이다. D 는 하도 구간 내의 하상 변동량을 나타낸다.

상기의 유사 수지 분석에 관한 연속 방정식을 2.1절에서 제시한 분석 대상 구간에 대입할 경우, 상류 경계의 유입 유사량은 공주시(금강교)의 유사량이고, 지류를 통한 유입 유사량은 대상 구간의 지류 하천에 위치한 공주시(오인교), 공주시(국재교), 부여군(지천교) 지점의 유사량이다. 하류 경계의 유출 유사량은 부여군(백제교)에서 측정된 유사량이 해당된다.

한편, 하도 구간 내의 하상 변동량은 경계로부터 유입 및 유출되는 유사량을 이용하여 결정되는 변수로서 이는 MLIT (2016)의 하상 변화 모니터링의 결과와 비교 대상이 된다. 즉, 이 연구에서는 실제 측량된 지형자료에 의한 하상 변동량(D_{survey})과 유사 수지 분석에 의해 추정된 하상 변동량(D)을 비교하였다.

2.3 유량 및 유사량 측정자료의 수집

MLIT (2016)의 하천 측량자료(2011년~2016년)를 이용하여 유사 수지 분석을 수행하기 위해서는 해당 기간에 대한 유사량 자료의 수집이 필요하다. 일반적으로 유사량은 강우 시 현장에서 직접 측정되므로 연속된 유사량 자료를 취득하는 것은 불가능하다. 따라서 강우 시 측정된 유량-유사량의 관계와 연속 측정된 유량자료를 이용하여 유사량 시계열 자료를 추정한다.

연구에서는 유사량 자료가 존재하는 수위관측소 지점에 대하여 한국수문조사연보로부터 2011년부터 2016년까지 일(日) 단위의 유량자료를 수집하였다(Table 1). 부여군(백제교) 수위관측소를 제외한 4개의 수위관측소에서는 모두 1년씩 결측 기간이 존재하는 것으로 나타났다. 한편, Table 2는 지점별 유량-유사량의 측정 시기와 측정된 횟수를 나타낸다. 상대적으로 금강 지류 하천에서 측정된 유량-유사량의 사례가 많은 것을 볼 수 있다. 참고로 금회 연구에서 활용된 모든 유사량은 수문조사 보고서에서 추정한 총 유사량을 의미한다. Fig. 4는 2020년에 조사된 공주시(오인교), 공주시(백제교)의 부유사량 측정자료와 수정 아인슈타인 방편에 의해 추정된 총유사량을 나타낸 것이다.

Table 1. Measurement Record of Flow Rate

Stream	Code of station	Station name	Year					
			2011	2012	2013	2014	2015	2016
Geumgang	3012520	Gongju-si (Geumganggyo)	○	X	○	○	○	○
Jeognancheon	3012525	Gongju-si (Oingyo)	X	○	○	○	○	○
Yugucheon	3012535	Gongju-si (Gukjaegyo)	X	○	○	○	○	○
Jicheon	3012565	Buyeo-gun (Jicheongyo)	○	X	○	○	○	○
Geumgang	3012575	Buyeo-gun (Baekjegyo)	○	○	○	○	○	○

Table 2. Measurement Record of Flow-Sediment

Stream	Code of station	Station name	Year	Number of measurement
Geumgang	3012520	Gongju-si (Geumganggyo)	2011, 2012, 2019	44
Jeognancheon	3012525	Gongju-si (Oingyo)	2019, 2020	22
Yugucheon	3012535	Gongju-si (Gukjaegyo)	2013, 2014, 2015, 2019, 2020	35
Jicheon	3012565	Buyeo-gun (Jicheongyo)	2015, 2016, 2017, 2018, 2019	64
Geumgang	3012575	Buyeo-gun (Baekjegyo)	2019	15

Fig. 4. Examples for Measured Suspended Sediment and Estimated Total Sediment

3. 연구 결과

3.1 지점별 유사량 자료 추정

3.1.1 지점별 유량-유사량 관계

Table 2에서 제시된 바와 같이 부여군(백제교)과 공주시(오인교) 수위관측소 지점에서 측정된 유량-유사량의 사례는 상대적으로 적다. 이에 연구에서는 금강 본류 구간에 위치한 공주시(금강교) 및 부여군(백제교) 수위관측소의 자

료를 통합하여 사용할 수 있을지 검토하였다. 유사하게 금강 지류에 위치한 공주시(오인교), 공주시(국제교), 부여군(지천교)의 유량-유사량의 통합 사용의 가능성도 검토하였다.

Fig. 5(a)는 금강 본류에 위치한 두 지점의 유량-유사량 관계를 도시한 그림으로서 두 지점 간의 유량-유사량 관계가 서로 상이함을 보여주고 있다. 유사하게 금강 지류에 위치한 세 지점의 유량-유사량 관계도 유량 규모가 커질수록 상이한 양상을 나타내는 것으로 분석되었다(Fig. 5(b)). 이에 따라

(a) Geumgang

(b) Tributaries of Geumgang

Fig. 5. Review of Flow-Sediment Relationships between Stations

(a) Gongju-si (Geumganggyo)

(b) Buyeo-gun (Baekjegyo)

Fig. 6. Flow-Sediment Relationship at Geumgang

이 연구에서는 비록 자료의 수가 많지 않지만, 각각의 지점에서 독립적으로 측정된 유량-유사량의 관계만을 활용하였다. Fig. 6은 금강 본류에 위치한 공주시(금강교) 및 부여군(백제교) 수위관측소의 유량-유사량 관계를 나타내고, Fig. 7은 지류 하천에 위치한 공주시(오인교), 공주시(국제교), 부여군(지천교)의 유량-유사량 관계를 나타낸다.

3.1.2 결측 유량의 보완

3.1.1절에서 결정한 지점별 유량-유사량 관계를 적용하기 위해서는 지점별 전체 기간의 유량자료가 확보되어야 한다. 하지만 Table 1에서 제시된 바와 같이 대상 구간에는 결측 유량자료가 부분적으로 존재한다. 연구에서는 결측된 유량 자료를 보완하기 위해 2개 지점씩 지점별 유량의 상관성을

분석하였다. 그 결과, 본류에 위치한 공주시(금강교)와 부여군(백제교)의 상관성이 높은 것으로 분석되었고, 지류의 경우 부여군(지천교)-공주시(오인교), 부여군(지천교)-공주시(국제교)의 상관성이 높은 것으로 분석되었다(Fig. 8).

Fig. 8의 관계를 이용하여 지점별 결측된 유량자료를 보완하였다. 즉, 공주시(금강교)-부여군(백제교)의 유량 관계를 이용하여 공주시(금강교)의 2012년 유량자료를 보완하였고, 부여군(지천교)-공주시(오인교)와 부여군(지천교)-공주시(국제교)의 관계를 각각 이용하여 2011년의 공주시(오인교) 및 공주시(국제교)의 유량자료를 보완하였다. 한편, 부여군(지천교)의 2012년 결측 유량자료는 상대적으로 상관관계가 높은 부여군(지천교)-공주시(국제교)의 관계를 이용하여 추정하였다.

Fig. 7. Flow-Sediment Relationship at Tributaries of Geumgang

Fig. 8. Correlation Analysis of Flow Rate between Stations

Table 3. The Result of Sediment Budget Analysis

Station	Stream	Classification	Total (2011~2016) sediment load (ton)	Remark
Gongju-si (Geumganggyo)	Geumgang	Sediment inflow through upstream boundary condition	3,438,596	S_i in Eq. (1)
Gongju-si (Oingyo)	Jeognancheon	Sediment inflow through tributaries	21,350	
Gongju-si (Gukjaegyo)	Yugucheon		37,007	
Buyeo-gun (Jicheongyo)	Jicheon		34,763	
Buyeo-gun (Baekjegyo)	Geumgang	Sediment runoff	1,101,473	S_o in Eq. (1)
Bed change amount (sedimentation or erosion)			+2,430,243	Sedimentation

3.2 유사 수지 분석 및 하천 측량 분석

3.2.1 유사 수지 분석 결과

Table 3은 대상 구간인 공주시(금강교)부터 부여군(백제

교) 사이의 2011년부터 2016년까지 유사 수지 분석 결과를 나타낸다. 금강 본류인 공주시(금강교)로 유입되는 유사량이 전체 유입 유사량의 97.36%인 3,439,000 ton을 차지하는

Table 4. Analysis of Sedimentation/Erosion Volume by Survey of Riverbed between 2011 and 2016

Cross-section No.	Distance (m)	Analysis based on low water level					Analysis based on high water level				
		Area of cross-section (m ²)	sedimentation/erosion area (m ²)			Volume of bed change (m ³)	Area of cross-section (m ²)	Sedimentation/erosion area (m ²)			Volume of bed change (m ³)
			Sedimentation (+)	Erosion (-)	Total			Sedimentation (+)	Erosion (-)	Total	
83+410	-	1,540	+137	-16	+121	-	5,762	+277	-46	+231	-
82+980	430	1,293	+122	-3	+119	+51,654	4,537	+265	-6	+259	+105,367
81+120	1,860	1,738	+27	-51	-24	+88,369	5,447	+27	-51	-24	+218,494
80+640	480	2,017	+19	-221	-202	-54,185	6,967	+19	-215	-196	-52,934
80+190	450	1,136	+63	-251	-188	-87,575	5,588	+103	-295	-192	-87,451
79+490	700	2,384	+101	-9	+92	-33,439	6,715	+101	-9	+92	-35,060
78+920	570	2,834	+76	-18	+58	+42,853	5,239	+91	-18	+73	+47,073
78+320	600	1,486	+80	-14	+66	+37,317	5,022	+94	-14	+80	+45,975
77+910	410	1,949	+127	-12	+115	+37,019	5,322	+127	-12	+115	+39,901
77+320	590	2,026	+110	-5	+105	+64,856	5,121	+110	-5	+105	+64,859
76+720	600	793	+65	-28	+36	+42,477	4,404	+66	-29	+37	+42,606
75+120	1,600	1,904	+78	-33	+45	+65,120	4,770	+78	-33	+45	+65,456
74+180	940	1,338	+54	-12	+41	+40,674	5,002	+46	-26	+19	+30,357
73+010	1,170	1,800	+145	-15	+130	+100,456	5,276	+301	-33	+269	+168,468
72+060	950	1,221	+103	-2	+100	+109,611	7,189	+103	-2	+101	+175,389
71+110	950	1,338	+88	-22	+66	+79,078	6,205	+100	-22	+79	+85,153
70+100	1,010	1,602	+254	-9	+245	+157,161	7,333	+258	-11	+247	+164,605
69+500	600	1,522	+106	-61	+45	+87,084	7,722	+108	-89	+19	+79,791
68+370	1,130	1,175	+66	-20	+46	+51,438	7,247	+66	-47	+19	+21,210
67+400	970	1,143	+42	-6	+36	+39,833	5,381	+60	-6	+54	+35,352
66+470	930	1,783	+78	-21	+57	+43,533	4,471	+64	-23	+41	+44,147
65+470	1,000	1,637	+83	-10	+74	+65,455	4,916	+89	-10	+80	+60,340
64+510	960	2,488	+233	-34	+199	+130,882	6,280	+233	-40	+194	+131,136
64+040	470	1,233	+42	-25	+17	+50,816	5,308	+49	-30	+19	+49,919
63+390	650	3,113	+48	-9	+39	+18,177	4,981	+48	-9	+39	+18,769
62+790	600	2,224	+61	-29	+32	+21,153	3,853	+61	-29	+32	+21,156
62+320	470	1,216	+130	-49	+81	+26,459	5,411	+415	-150	+265	+69,614
61+430	890	1,691	+144	-24	+120	+89,227	8,605	+165	-5	+160	+188,960
60+950	480	3,675	+165	-68	+98	+52,130	8,289	+165	-68	+98	+61,829
60+510	440	1,532	+104	-21	+83	+39,763	6,058	+105	-24	+81	+39,292
59+990	520	1,481	+185	-212	-27	+14,628	6,764	+239	-225	+14	+24,801
56+970	3,020	3,674	+64	-51	+12	-21,714	5,493	+83	-76	+7	+32,103
56+510	460	2,639	+18	-57	-39	-6,100	5,175	+18	-60	-42	-8,183
55+940	570	2,911	+75	-17	+58	+5,543	6,775	+76	-17	+59	+4,751
55+320	620	4,205	+102	-448	-346	-89,181	9,119	+161	-447	-286	-70,345
54+730	590	2,322	+92	-122	-30	-110,873	5,376	+113	-122	-9	-87,004
54+270	460	1,647	+162	-31	+131	+23,315	5,503	+178	-26	+152	+32,869
53+760	510	1,430	+144	-399	-255	-31,503	7,345	+134	-436	-302	-38,334
53+350	410	3,399	+42	-92	-50	-62,443	6,938	+35	-92	-56	-73,427
52+910	440	1,584	+44	-167	-123	-38,084	5,890	+44	-283	-238	-64,808
52+540	370	2,233	+51	-33	+18	-19,434	7,920	+50	-52	-2	-44,557
52+090	450	2,886	+738	-20	+718	+165,695	7,443	+1,139	-208	+931	+208,942
Total	31,320	81,703	+4,530	-2,728	+1,802	+1,287,245	248,400	+5,788	-3,355	+2,433	+1,816,581

것으로 분석되었고, 지류 하천인 정안천, 유구천, 지천을 통한 유입 유수량은 2.64%인 것으로 나타났다. 그리고 부여군(백제교)을 통해 유출되는 유수량은 전체 유입 유수량의 31.19%인 것으로 산정되어 대상 구간에는 6년간 2,430,243 ton의 유사가 퇴적되는 것으로 분석되었다.

3.2.2 하천 측량 결과를 이용한 침식/퇴적량 분석

MLIT (2016)에서 금강 유역에 대하여 2011년과 2016년에 하천 측량을 수행한 자료를 이용하여 대상 구간의 침식/퇴적량을 분석하였다. 2011년의 하천 지형을 기준으로 2016년의 측량 단면별 침식/퇴적 면적을 분석하였고, 측량 단면 간의 거리를 이용하여 Eq. (2)의 양단면 평균법으로 구간별 체적을 산정하였다. 최종적으로 구간별 침식/퇴적량을 합산하여 전체 대상 구간의 하상 변동량을 분석하였다.

$$V = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \times h \quad (2)$$

여기서, V 는 침식 또는 퇴적된 체적(m^3), A_1 과 A_2 는 1, 2 단면의 침식 또는 퇴적된 면적(m^2), h 는 측량 단면간 구간 거리(m)이다.

한편, MLIT (2016)에서는 하천 측량 결과를 저수위 기준과 홍수위 기준으로 각각 제시하였다. 이에 이 연구에서는 저수위 기준과 홍수위 기준의 하상 변동량을 각각 분석하였다 (Table 4). 그 결과, 2011년과 2016년 사이에 대상 구간에서는 저수위 기준에서 1,287,245 m^3 이 퇴적된 것으로 분석되었고, 홍수위 기준에서는 1,816,581 m^3 이 퇴적된 것으로 나타났다.

3.3 유사 수지 분석과 하천 측량에 의한 하상 변동량 비교

3.1절에서 유량-총유수량 관계를 이용한 유사 수지 분석 결과, 2011년부터 2016년까지 2,430,243 ton이 퇴적되는 것으로 분석되었다. 유사하게 하천 측량 결과를 통해서도 동 기간의 저수위 및 홍수위 기준에서 각각 1,287,245 m^3 과 1,816,581 m^3 이 퇴적된 것으로 분석되었다. 앞서 제시된 두 가지 분석 방법에 의한 결과는 단위가 상이하므로 단위를 통일시켜 비교되어야 한다. 이에 이 연구에서는 하상토의 단위중량(ton/m^3)을 분석하였다.

흙의 단위중량은 Eq. (3)과 같이 습윤 단위중량(γ_t)과 건조 단위중량(γ_d)으로 구분된다.

$$\gamma_t = \frac{W_s + W_w}{V}, \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3)$$

여기서, W_s 는 흙 고체의 중량, W_w 는 물의 중량, V 는 흙의 총 체적이다. 유량-유수량 관계 도출 시 측정된 유사를 건조시켜 무게를 산정하므로 건조 단위중량을 적용하는 것이

적절하다. 하지만 기 조사된 건조 단위 중량이 부재하여 최근에 금강 하천기본계획 수립을 위해 조사된 하상토 자료(함수비, 비중)를 이용하여 건조 단위중량을 추정하였다. 대상 구간의 하상토는 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS) 상 대부분 사질토에 해당하는 것으로 나타났다(Table 5). 이에 본 연구에서는 사질토의 일반적인 간극비(e)를 0.4-0.8 고려하고, Eq. (4)를 이용하여 건조 단위중량의 평균값을 추정하였다. 그 결과, 대상 구간의 건조 단위중량은 1.682 ton/m^3 으로 분석되었고(Table 5), 이는 Das (2010)가 제시한 사질토의 범위(1.48 ton/m^3 ~1.94 ton/m^3) 내에 있으므로 적절한 것으로 판단된다(Table 6 참조).

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (4)$$

여기서, G_s 는 흙 고체의 비중, γ_w 는 물의 단위중량이다.

Table 4의 측량을 통해 결정된 퇴적 부피에 건조 단위중량을 곱하여 무게 단위의 퇴적량을 산정하였다. 그 결과, 저수위 기준의 퇴적량은 2,165,146 ton, 홍수위 기준의 퇴적량은 3,055,489 ton으로 산정되었다(Table 7). 따라서 유사 수지 분석에 의한 퇴적량을 측량 결과와 비교하면, 저수위와 홍수위 기준에서 각각 10.9%, -25.7%의 차이가 있는 것으로 분석되었다.

3.4 결과 고찰

이 연구에서는 현행 하천 유수량 측정자료를 이용하여 추정된 하상 변동량과 하천 측량 결과로부터 조사된 하상 변동량의 차이를 제시하였다. 하천의 총 유수량은 채취된 유수량(유수량 측정)과 미채취 유수량의 합으로 도출되고, 이때 미채취 유수량은 일반적으로 국외에서 개발된 수정 아인쉬타인 방법으로 추정된다. 따라서, 총유수량 산정에 포함될 수 있는 가장 큰 변동 요인은 미채취 유수량이다. 미채취 유수량은 직접 측정되기 어려우므로, 이 연구에서 수행한 유사 수지 분석을 통해 추정하는 방법이 활용될 수 있다. 즉, 유수량 측정을 유사 수지 분석이 가능한 영역으로 한정하여 수행하고, 주기적인 하천 측량을 통해 하상 변동량을 분석하여 유사 수지가 만족되는 미채취 유수량을 간접적으로 추정할 수 있다. 이를 통해 국내 하천 상황에 적합한 수정 아인쉬타인 방법의 개선이나 새로운 총 유수량 추정 방법의 도출을 기대할 수 있다.

이 연구에서는 두 가지의 한계를 가지고 있는데, 우선 분석 대상 구간에 대한 하상토 단위중량의 부재이다. 수문조사보고서, 하천기본계획 등 하천 조사와 관련된 여러 자료를 조사하였지만, 토양의 단위중량에 대한 분석 결과가 존재하지 않는다. 따라서 하천 측량 수행 시, 측량을 통해 분석된 체적을 무게로 환산할 수 있는 단위중량에 대한 분석 또는 수식으로 결정할 수 있는 간극비, 포화도 등의 조사가 필요하

Table 5. Estimation of Dry Unit Weight

Cross-section No.	Water content (%)	Specific gravity (G_s)	Grain size distribution (%), finer than					USCS	Dry unit weight (ton/m ³)	
			4.75 (mm)	2.0 (mm)	0.425 (mm)	0.075 (mm)	0.005 (mm)		$e = 0.4$	$e = 0.8$
52+090	23.5	2.66	100	72.4	37.0	13.4	-	SM	1.896	1.475
53+350	17.5	2.65	100	91.1	41.6	14.9	-	SM	1.895	1.474
54+270	10.4	2.65	100	76.1	27.3	4.7	-	SW	1.893	1.472
55+320	8.4	2.65	72.6	49.3	11.9	3.3	-	SP	1.889	1.469
56+420	14.7	2.64	43.9	35.1	10.8	4.8	-	GP	1.888	1.468
57+330	5.4	2.65	78.5	58.1	12.6	3.3	-	SW	1.889	1.469
58+080	7.2	2.64	40.3	30.8	10.0	4.0	-	GP	1.884	1.466
59+060	12.4	2.64	98.2	87.1	11.7	4.1	-	SP	1.887	1.468
60+510	15.1	2.64	100	91.4	26.0	2.1	-	SP	1.886	1.467
61+430	15.8	2.66	71.3	59.5	24.6	13.7	-	SM	1.901	1.478
62+320	23.4	2.64	40.9	25.6	9.4	4.3	-	GW	1.886	1.467
63+390	17.8	2.65	-	100	50.0	13.4	-	SM	1.895	1.474
64+040	16.8	2.64	-	100	44.7	3.3	-	SP	1.886	1.467
65+040	15.2	2.65	98.1	55.8	14.7	3.5	-	SP	1.892	1.472
66+110	3.4	2.65	66.7	52.0	13.0	4.0	-	SP	1.889	1.469
67+400	15.8	2.65	-	100	33.7	4.7	-	SP	1.893	1.472
68+370	19.8	2.65	62.7	44.2	13.9	4.5	-	SW	1.892	1.472
69+500	10.3	2.66	98.3	70.1	30.3	14.7	-	SM	1.901	1.479
70+100	18.4	2.65	82.5	64.9	29.4	17.7	-	SM	1.895	1.474
71+110	8.7	2.65	100	88.1	21.0	4.8	-	SP	1.893	1.472
72+060	11.3	2.65	100	79.1	32.0	3.3	-	SW	1.891	1.471
73+010	14.3	2.65	-	100	36.6	4.9	-	SP	1.889	1.469
74+180	11.6	2.65	-	100	41.3	3.4	-	SP	1.895	1.474
75+120	7.4	2.65	97.8	69.3	24.1	2.7	-	SW	1.893	1.472
76+720	12.3	2.65	-	100	26.1	4.8	-	SP	1.891	1.471
77+320	12.3	2.65	98.1	62.7	15.8	3.4	-	SW	1.894	1.473
78+320	5.4	2.65	100	85.8	18.5	3.2	-	SP	1.892	1.472
79+490	10.7	2.65	-	100	35.3	3.6	-	SP	1.894	1.473
80+190	7.4	2.66	-	100	36.7	3.7	-	SP	1.896	1.475
81+120	3.4	2.66	-	100	44.0	3.1	-	SP	1.898	1.476
82+600	12.3	2.65	98.2	69.3	16.8	2.6	-	SP	1.892	1.472
83+410	3.7	2.64	41.3	28.7	10.5	4.1	-	GP	1.885	1.466
Average									1.682	

Table 6. Void Ratio, Moisture Content, and Dry Unit Weight for Some Typical Soils in a Natural State (Das, 2010)

Type of soil	Void ratio (e)	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight (γ_d , ton/m ³)
Loose uniform sand	0.8	30	1.48
Dense uniform sand	0.45	16	1.837
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	1.633
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	1.939
Stiff clay	0.6	21	1.735
Soft clay	0.9-1.4	30-50	1.173~1.480
Loess	0.9	25	1.378
Soft organic clay	2.5-3.2	90-120	0.612~0.816
Glacial till	0.3	10	2.143

Table 7. Errors for Estimated Sedimentation by Sediment Budget Analysis

Classification	Sedimentation amount by stream survey		Estimated sedimentation by sediment budget analysis (ton)	Relative error (%)
	m ³	ton		
Based on low water level	1,287,245	2,165,146	2,430,243	10.9
Based on high water level	1,816,581	3,055,489		-25.7

다. 두 번째는 하천 측량 구간 사이가 비교적 길다는 것이다. 이 연구에서 활용한 하천 단면간 거리는 370~3,020 m인 반면, 단면 사이의 침식/퇴적량은 선형적으로 변하는 것으로 가정하였다. 따라서 단면 사이의 침식/퇴적량에 오차가 포함될 수밖에 없다. 이를 개선하기 위해서는 하천의 측량 단면간 거리를 보다 조밀하게 구성할 필요가 있다.

4. 결 론

하천의 유사량 중 미채취 유사량은 상대적으로 측정이 어렵다. 이에 따라 현장에서는 주로 부유사를 측정하고 하상 토 입도와 여러 가지 수리학적 인자를 고려하여 미채취 유사량을 추정된 후, 하천의 총 유사량을 산정한다. 이러한 하천의 총 유사량은 다양한 하천 계획과 연구에 기초자료로 활용되므로 정확성에 대한 평가가 요구된다. 이 연구에서는 유량 및 유사량 측정을 통한 유사 수지 분석 결과와 하천 측량으로 산정된 하상 변동량을 비교·검토하였다. 연구의 공간적 대상 범위는 3개의 지류 하천을 포함한 금강의 공주시(금강교) 수위관측소부터 부여군(백제교) 수위관측소 구간이고, 시간적 범위는 2011년부터 2016년이다. 금강 본류에 위치한 2개 지점과 3개의 지류 하천 하구에는 유량 및 유사량이 모두 측정되어 관측자료 기반의 유사 수지 분석이 가능한 지역이다.

5개 지점의 2011년~2016년간 조사된 유량-유사량 관계와 일 단위의 유량자료를 이용하여 유사 수지 분석을 수행하였다. 이때 부분적으로 결측된 유량자료는 주변 관측소의 유량자료로 보완하여 적용하였다. 분석 결과, 분석 대상 구간에서는 6년간 2,430,243 ton의 유사가 퇴적되는 것으로 분석되었다. 한편, 대상 구간에 대하여 단면별로 측량된 하천 지형을 이용하여 단면별 침식 및 퇴적량을 분석하였고, 이를 종합하여 대상 구간의 하상 변동량을 산정하였다. 그 결과, 저수위 기준의 퇴적량은 2,165,146 ton, 홍수위 기준의 퇴적량은 3,055,489 ton으로 분석되었다. 이때, 측량 성과는 체적의 단위이므로 하상토의 건조 단위중량을 고려하여 무게로 환산한 것이다. 즉, 유사량 측정자료 기반의 유사 수지 분석에 의해 산정된 하상 변동량과 하천 측량 결과로부터 조사된 하상 변동량과의 차이는 저수위 기준에서 10.9%, 홍수위 기준에서 -25.7%로 분석되었다.

하천의 총유사량의 정확도를 높이기 위해서는 미채취 유사량의 추정이 중요하다. 유사 수지 분석 방법과 주기적이

고 보다 상세한 하천 측량을 통해 하상 변동량을 분석하여 통해 국내 하천 상황에 적합한 미채취 유사량 추정 방법의 도출에 관한 연구가 수행될 필요가 있다.

감사의 글

이 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003050002).

References

- Ahn, J., Lyu, S., and Lee, N.J. (2010). A study on the optimal sediment discharge formula for Hyeongsan River. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 11, pp. 977-984.
- Choi, S.U., Kang, H.S., Ryu, K.K., Baek, J.C., and Lee, S.O. (2017). *Hydraulics of turbulent flows* (1st ed.). CIR, p. 151.
- Das, B.M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Stamford, CT, USA: Cengage learning.
- Han, M.S., Choi, G.W., Kim, G.N., and Jung, J.K. (2011). Study for evaluation of discharge and sediment considering of characteristics of river basin. *2011 conference of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association.
- Hwang, S.D., Choi, S.H., Lee, S.J., and Jang, C.L. (2013). Long-term riverbed change simulation and analysis in the river. *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 1-6.
- Kim, C.Y., and Kwon, D.S. (2018). Status and development direction of sediment survey technology. *Water for future*, Korea Water Resources Association, Vol. 51, No. 7, pp. 41-47.
- Kim, D. (2010). *Sediment budget analysis of the Naesung-cheon watershed using SWAT and HEC-RAS*. Ph.D. dissertation, Dong-eui University, Busan, Republic of Korea.
- Kim, S.J., and Kim, C.S. (2020). Analysis of bed changes of the Nakdong River with opening the weir gate. *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 7, No. 4,

- pp. 353-365.
- Kwon, H.J., and Kim, H.G. (2020). A study of comparison about estimation methods of sediment yield. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 12, pp. 1109-1117.
- Lee, K.S. Lee, N.J., and Oh, S.T. (1996). A sediment budget analysis on upsdeam of jamsil submerged weir. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 16, No. II-2, pp. 135-147.
- Lee, N.J., Kang, T., Seo, H., Lee, S., and Jin, Y. (2021). One dimensional simulation of long-term changes in riverbed profiles by sediment transport equations for downstream area of the Namgang. *2021 Conference of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, p. 387.
- Ministry of Environment (ME). (2020). *Hydrological survey report in 2019*. 11-1480000-001592-10.
- Ministry of Environment (ME). (2021). *Korea Annual Hydrological Report in 2020*. 11-1480964-000020-10.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). (2016). *Study on monitoring and evaluation of river change* (The 2nd report). 11-1613374-000072-01, Han River Flood Control Office.
- Park, J., and Kim, G. (2006). Estimation of soil loss by land use in the Geum River Basin using RUSLE model. *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 22, No. 4. pp. 619-625.
- Park, M., Kim, H.S., and Baek, C.H. (2018). Numerical analysis of flow and bed change at a confluence of the Namhan River and the Seom River using a two-dimensional model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 12, pp. 1273-1284.
- Son, A.L., Kim, B.H., Moon, B.R., and Han, K.Y. (2015). An analysis of bed change characteristics by bed protection work. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 4, pp. 821-834.
- Son, K.I., and Jang, C.L. (2017). Characteristics of sediment transportation and sediment budget in Nakdong River under weir operations. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 9, pp. 587-595.
- Son, K.I., and Ji, U. (2015). Natural and artificial bed change analysis through sediment budget analysis of Nakdong River channel (before the Four Rivers Restoration Project). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 1-8.
- Son, K.I., and Roh, J.W. (2009). Application of sediment yield estimation methods for an urbanized basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 737-745.

Received	September 27, 2021
Revised	September 29, 2021
Accepted	October 19, 2021