

문산천의 유사특성 및 장기하상변동 예측

이 재 근* / 안 재 현**

Sediment Properties and Long-term Bed Change of Munsancheon

Lee, Jae Geun* / Ahn, Jae Hyun**

요약 : 본 연구는 경기도 파주시에 위치한 문산천의 유사량을 직접 실측하여 유사특성을 분석하고, 이를 수치모형에 적용하여 장기적인 하상변동을 예측하였다. 직접 실측된 유사량을 이용하여 유량-총유사량 관계식을 유도하였으며, 기존의 추정공식을 통해 산정된 총유사량과의 비교를 통해 적절한 유사량 추정방법을 평가하였다. 실측에 의한 문산천의 연간 총유사량은 5,478ton/year, 비유사량은 29.23ton/km²/year로 나타났으며, 기존의 공식과 비교한 결과 Ackers & White공식이 실측치와 매우 유사한 값을 산정하였다. 실측된 유사량 및 지형, 수문자료를 입력변수로 하여 HEC-6와 GSTARS 모형을 비교, 평가하였다. 이를 통해 HEC-6 모형이 문산천의 장기하상변동 예측에 적합한 모형으로 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있다고 판단하였으며, 본 연구의 장기하상변동 예측에 적용하였다. HEC-6 모형을 이용한 장기하상변동 예측결과 문산천의 경우 하류부에서는 지속적으로 퇴적이 나타나고 상류부에서는 전반적으로 침식이 발생하였으며, 향후 20년 후의 하상상태로 안정화 될 것으로 판단되었다. 하상 변동량은 20년동안 1m 이내로 유의한 수준에 있다. 그러나 감조부의 영향을 받는 하류부에서는 유출구로부터 2,000m~7,000m 사이의 구간에 퇴적이 지속적으로 증가하고 있어 향후 하천관리계획 수립시 고려해야 할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 하상변동, 유사, HEC-6, GSTARS

Abstract : This study was conducted with the national river, Munsancheon, which is located in Paju-si, Gyeonggi-do. The sediment discharge of Munsancheon was directly measured to analyze the sediment characteristics, and the results were used in the numerical model to predict the long-term river bed variation. The flow-total sediment discharge relation was derived using the measured total sediment discharge, and the results were compared with the total sediment discharge that was calculated using the existing prediction formula to derive a proper sediment discharge prediction method. In the actual measurements, the total annual sediment discharge was 5,478 ton/year, and the specific sediment discharge was 29.23 ton/km²/year. The Ackers & White formula resulted in the values very close to the actual measurements. With the actual sediment discharge, geographical and hydrologic data as the input variables, HEC-6 and GSTARS models were comparatively analyzed. The test results showed that the HEC-6 model is suitable for the reliable prediction of the long-term river bed variation. Accordingly, the model was used for the long-term river bed variation prediction in this study. In the case of Munsancheon, deposition was continued in the downstream area and erosion occurred in the upstream area on the whole. It was expected that the stream would be stabilized in the river bed condition of 20 years later. The river bed variation was within 1 m, which was at the significance level. In the downstream area that is influenced by tide, however, the accumulation was continuously increasing within the section 2,000-7,000 m from the outlet. It seems that this should be considered in establishing the river management plans.

Keywords : River Bed Change, Sediment, HEC-6, GSTARS

* (주)세일엔지니어링 수자원부 사원, 前 서경대학교 대학원 석사과정 (E-mail : sepilove@hanmail.net)

** 교신저자, 서경대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : wrr@skuniv.ac.kr)

1. 서 론

유사이동에 의한 하상변동은 저수지와 취수용 보 등 저류용도 구조물의 저류능력을 떨어뜨리고, 제방과 교각의 안전도와 하천시설물의 적합한 사용에 문제가 된다. 또한 농경지의 옥토를 유실시키고 저수지내의 유사에 의한 오염원 확산 등의 심각한 원인으로 발전할 수 있다. 특히, 최근 도로의 건설, 댐 건설, 하천 정비사업, 주택의 건설로 인하여 발생하는 하상변동의 문제가 부각되고 있는 실정이므로 유사 측정 및 장기적인 하상의 변화를 예측하고 분석하는 것은 하천의 계획 및 관리 측면에서 매우 중요한 사항이다.

특히, 하천의 하상변동을 예측하고 모형을 적용하는데 있어 유사량은 가장 중요한 변수이므로 유사량의 정량적인 파악은 하천계획과 관리에 필수 요소라 할 수 있다. 직접 실측하는 방법이 가장 좋은 방법이지만 인력과 비용 등의 문제로 기존의 유사량 추정 공식을 통해 산정하는 것이 일반적이다. 하지만 기존의 경험공식은 방법에 따라 편차가 크고 대부분 해외 하천의 특성을 기초로 만들어진 것이기 때문에 우리나라에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 하천별로 적합한 유사량 추정공식의 선정과, 실제 측정된 유사량을 사용한 신뢰성 있는 장기하상변동예측이 필요한 실정이다.

유사량 추정방법에 관한 연구로는 한국건설기술연구원(1989)이 유사량 산정공식을 소개하고 각 공식의 특성과 적용의 한계를 설명하였으며, 김성원 등(1998)은 유사량 산정공식에 따른 하상의 변화를 비교·분석하였다. 유사량에 관한 공통적인 연구결과는 하천 특성에 맞는 유사량 산정공식을 사용하여야 하며, 직접 실측하여 신뢰도 있는 자료를 사용할 것을 추천하였다. 하상변동예측에 관한 연구는 1970년대에 들어 컴퓨터 수치해석에 의한 수학적모형의 개발과 더불어 활발히 전개되었다. 프랑스의 SOGREAH에서 개발한 CHAR-series가 최초의 수학적모형이며, 이후 미국 공병단에서 개발

한 준정상류 모형인 HEC-6 모형(Tomas, W.A., 1977)이 대표적인 1차원 모형이다. HEC-6 모형에서는 에너지방정식과 표준축차법을 사용하여 배수 계산을 수행하였으며, 유사량 계산에는 Toffaleti, Yang, Acker & White (Chang, 1988) 등 다양한 공식을 적용할 수 있다. 이 외에 Holly와 Karim (1983)에 의해 IALLUVIAL 모형이 개발되었고, Yang(1986)에 의해 BRALLUVIAL 모형이 개발되었다. Tingsanchali(1996)는 실험실 연구를 통해 HEC-6의 적용성을 검증하여 급변 부동류에서는 하상변동 예측의 정확성이 다소 떨어진다는 연구결과를 보고한 바 있다. Yang(1998)은 GSTARS2.0 모형을 소개하고 적용성을 검토하였으며, Parker 등(2000)은 Exner 방정식이 유사혼합을 설명하는 데에도 적용성이 있음을 보고하였다. Kumar(2000)은 인공신경망 방법이 유사량을 구하는 수학적 표현을 간단화 시킬 수 있어 전통적인 방법보다 더 정확하다고 발표하였으며, Sharma 등(2005)은 앙상블기법이 복잡한 유사이송을 해석하는 데에 효율적인 방법이라 평가하였다.

국내 연구는 하상변동이 구조물에 미치는 영향 분석 또는 유사량 산정 공식별 모형의 결과를 비교분석하는 연구가 많이 이루어졌다. 손명원 (1986)은 대청댐이 금강하류의 하상에 미치는 영향을 하상고, 하상도, 홍수위 변화 등의 세 가지 관련 자료를 이용하여 연구하였고, 한국건설기술연구원(1991)에서는 하상변동 예측모형의 비교분석 연구를 통하여 하상변동 예측모형의 체계적인 정리 및 비교를 수행하고 또한 미 공병단에서 개발한 HEC-6 모형을 사용하여 국내 하천의 장기적인 하상변동효과를 예측하였다. 서일원 등 (1995)은 준 2차원 모형인 GSTARS 모형을 금강 대청댐 하류구간과 한강 팔당댐 하류구간에 적용하여 적용성을 검토하였으며, HEC-6 모형과 비교하였다. 이재수와 윤용남(1995)은 CHARIMA 모형을 한강 인도교 지점부터 광장교 지점까지 적용하여 유사의 이동에 따른 하상변동을 모의하였다. 임창수 등(1999)은 HEC-6 및 GSTARS 모형을 이용하여 금강 상하류에 대한 하상변동을 모의

하였고, 안상진 등(2002)은 보청천 유역의 기대~산계구간에 GSTARS 모형을 사용하여 적용성을 분석하였으며, 지운 등(2009)은 HEC-6 모형을 이용하여 한탄강 홍수조절댐 건설로 인한 퇴사현상을 분석하였다.

하상변동에 관한 선행 연구들은 주로 실측된 유사량 자료를 사용하지 않고 경험공식을 통해 유사량을 추정해서 장기하상변동의 모형의 입력자료로 사용하였으며, 단기간의 사상을 이용하여 모형을 검증하였다. 실제 측정된 신뢰도 있는 유사량 사용 및 장기적인 실측자료를 이용한 모형 검증이 필요할 것으로 판단되었다.

본 연구는 경기도 파주시에 위치한 문산천 유역의 유사량을 실측하여 신뢰성 있는 자료를 구축하고 기존에 사용되고 있는 유사량 추정공식과 비교·분석하여 적합한 유사량 추정방법을 제시하고자 한다. 또한 측정된 유사량 자료를 하상변동 모형에 적용하여 문산천의 장기하상변동을 예측하였다. 연구에 사용된 수치모형으로는 1차원 준정상류 모형인 HEC-6와 하천유관 방법을 도입한 준 2차원 모형인 GSTARS이며, 하상변동의 실제 측정치와 비교하여 모형의 검증을 수행한 후 최종적으로 HEC-6 모형을 이용하여 문산천의 장기하상변동을 예측하였다.

2. 대상하천의 개요

문산천은 경기도 파주시 탄현면 내포리 임진강 하류부 좌안측으로 유입되어 임진강에 합류하는 유역면적 188.20km², 유로연장 29.2km인 한강의 제2지류로서 유역의 동쪽은 신천유역과 서남쪽으로는 탄포천 및 곡릉천 유역, 그리고 북쪽으로는 임진강 본류와 접하고 있다. 조수의 영향을 받는 하류 하상부는 점토로 형성되어 있고 상류부는 굽은 모래와 자갈의 골재가 분포되어 있다. 하폭은 하류부에서 약 200m, 중상류부에서는 130m정도이며 하상구배는 하류부에서 1/5,300으로 아주 완만하고 상류부는 1/540로서 다소 급한 편이다.



Fig. 1. Basin of Munsancheon

Fig. 1은 본 연구의 대상구간인 문산천 국가하천 구간의 현황도이다. 총 11.6km 구간에 해당하며 연당보, 너부여보, 백서보 3개의 보와, 주월교, 정의선철교, 옥석교 등 9개의 교량, 1개소의 전차방호벽이 설치되어있다. 하류부인 임진강 합류점에서부터 약 5.6km 상류지점까지는 조수의 영향을 받는 감조하천 구간으로 대상구간 전체에 식생이 많이 발달되어 있으며, 홍수시 유사의 이동량이 많고 하류부 쪽으로 갈수록 유사퇴적에 의한 하중도가 발달되어 있는 모습을 보이고 있다.

3. 유사 측정 및 경험공식과의 비교·분석

3.1 유사 측정 및 분석

일반적으로 하천유사는 이송형태에 따라 부유사와 소류사로 구분되며, 부유사는 하천의 표면 및 수중으로 부유하는 세립질 토사를 말하고 소류

사는 유수에 의해 하천바닥을 구르거나 도약하면서 흐르는 조립질 토사를 말한다. 소류사는 실측하기 어렵고 실측시에도 정확도를 담보할 수 없기 때문에 이론식에 의해 계산하였다.

본 연구에서는 실측한 부유사자료와 함께 하상토 자료를 이용하여 소류사량을 산정하고 최종적으로 미채취된 구간 단면의 총 유사량을 추정하는 수정 아인슈타인 절차(Modified Einstein Procedure, MEP)를 이용하여 전유사량을 산정하였다. 수정 아인슈타인 절차는 미국의 지질조사국(USGS)에서 제안한 방법으로서, 부유사량의 실측과 수정 아인슈타인 방법을 통해 하천에서 총유사량을 추정하는 방법이다. 이와 더불어 적합한 유사량 추정 공식을 제시하기 위해 Toffaleti, Shen & Hung,

Acker & White, Yang 공식 등과 같은 경험공식을 이용하여 유사량을 추정한 후 상호 비교검토하였다.

본 연구의 대상하천에서 부유사 측정지점은 문산천 내 옥석교지점이며, 측정시기는 우기인 2008년 7월, 2009년 7월, 그리고 평수기인 2010년 3~5월이다. 유사량과 더불어 수리량(유속, 수심)을 동시에 측정하였고, 측정장비로 D-74(Depth-integrating suspended-sediment sampler)를 이용하였다.

유사량은 옥석교 지점에서 총 23회 측정하였고 관측결과를 Table 1에 정리하였다. 측정된 유량의 범위는 1.77~175.81m³/s이고, 부유사량의 범위는 0.11~630.69 ton/day이다. 이 측정값을

Table 1. Sediment of Munsancheon

No.	Date	Area (m ²)	Velocity (m/s)	Discharge (m ³ /s)	Suspended Sediment Concentration (mg/l)	Suspended Sediment (ton/day)	Bed Sediment (ton/day)	Total Sediment (ton/day)
1	08.07.26	185.02	0.80	148.12	39.53	505.87	44.76	550.63
2	08.07.26	176.81	0.76	133.54	46.26	533.71	32.67	566.38
3	08.07.26	169.50	0.74	126.20	26.14	285.08	28.48	313.56
4	08.07.26	161.62	0.67	108.79	39.31	369.49	32.45	401.94
5	08.07.26	155.64	0.52	80.79	20.79	145.12	11.99	157.11
6	09.07.09	210.68	0.83	175.81	41.52	630.69	25.11	655.80
7	09.07.09	202.75	0.81	164.34	34.76	493.62	29.29	522.91
8	09.07.09	194.95	0.54	104.78	32.39	293.25	34.96	328.21
9	09.07.09	187.29	0.52	98.12	32.03	271.54	76.74	348.28
10	09.07.09	179.78	0.53	94.40	29.10	237.30	29.88	267.18
11	09.07.09	172.41	0.40	69.20	29.38	175.67	16.69	192.36
12	09.07.14	176.08	0.47	83.43	19.00	136.96	76.11	213.07
13	09.07.14	183.52	0.48	87.17	14.34	107.99	15.40	123.39
14	09.07.09	14.23	1.25	17.76	10.20	15.65	0.00	15.65
15	09.07.09	15.43	1.73	26.70	12.30	28.37	0.00	28.37
16	09.07.09	19.11	1.95	37.35	13.80	44.53	0.00	44.53
17	10.03.19	2.75	0.64	1.77	1.00	0.15	0.00	0.15
18	10.03.19	2.86	0.66	1.87	0.70	0.11	0.00	0.11
19	10.05.20	7.58	0.80	6.07	4.60	2.41	0.00	2.41
20	10.05.20	7.36	0.90	6.63	2.80	1.60	0.00	1.60
21	10.05.20	7.25	0.64	4.67	3.40	1.37	0.00	1.37
22	10.05.20	7.14	0.71	5.08	2.10	0.92	0.00	0.92
23	10.05.20	7.03	0.83	5.86	1.30	0.66	0.00	0.66

이용하여 수정 아인슈타인 절차에 의해 산정된 총유사량의 범위는 0.11~655.80ton/day로 분석되었다. 평수기, 갈수기 때에는 소류사가 발생되지 않음을 확인할 수 있다.

Table 1에 나타난 유량-총유사량 관계를 Fig. 2와 같이 도출하였다. 유량-총유사량 관계는 독립변수 유량에 대한 종속변수 총유사량을 추정하는 회귀 분석에 의해 수립되었고 회귀분석 방법으로는 최소자승법을 이용하였다.

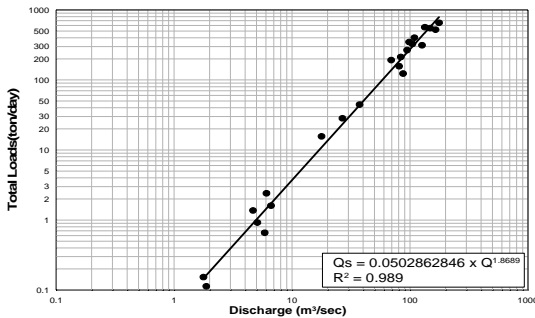


Fig. 2. Sediment Rating Curve of Munsancheon

이와 같은 분석을 통해 얻어진 옥석교 지점의 유량-총유사량 관계곡선은 아래 식과 같다.

$$Q_s = 0.0502862846 \times Q^{1.8689} \quad (1)$$

여기서, Q_s 는 전유사량(ton/day), Q 는 유량(m^3/s)을 의미한다.

위 식에 나타난 옥석교 지점 유량-총유사량 관계의 결정계수는 0.989로, 수리학적 상관성이 양호한 결과를 보여주고 있다.

3.2 경험공식에 의한 유사량 추정 및 비교·분석

유량-유사량 측정자료가 없을 시에는 여러 경험식으로 유사량을 추정할 수 있다. 경험식에 의한 유사량은 유황, 유량규모별 수면폭, 수심, 수면경사와 같은 수리특성, 하상구성물질의 특성(D35, D50, D60, D90, 비중, 입도)을 기초자료로 추정하였다. 또한 『하천유사량 산정방법의 선정기준 개발(1989, 한국건설기술연구원)』에서 제시하고 있는 Yang, Englund & Hansen, Ackers & White 공식 등 7개의 경험공식을 이용하여 유사량을 산정하였다. 제시된 경험공식의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristic of Methods

Methods	Year	Calculated Sediment	Calculation Theory
Englund & Hansen	1967	Total Sediment	Energy Model
Toffaletti	1968	Bed Sediment, Suspended Sediment	Dispersion-Transport Modes
Shen & Hung	1971	Total Sediment	Experimental Formula
Ackers & White	1973	Total Sediment	Energy Model
Yang(1973), Yang(1979)	1973 1979	Total Sediment	Experimental Formula, Energy Model
Ranga Raju	1981	Total Sediment	Experimental Formula
Rijn	1984	Bed Sediment, Suspended Sediment	Dispersion-Transport Modes

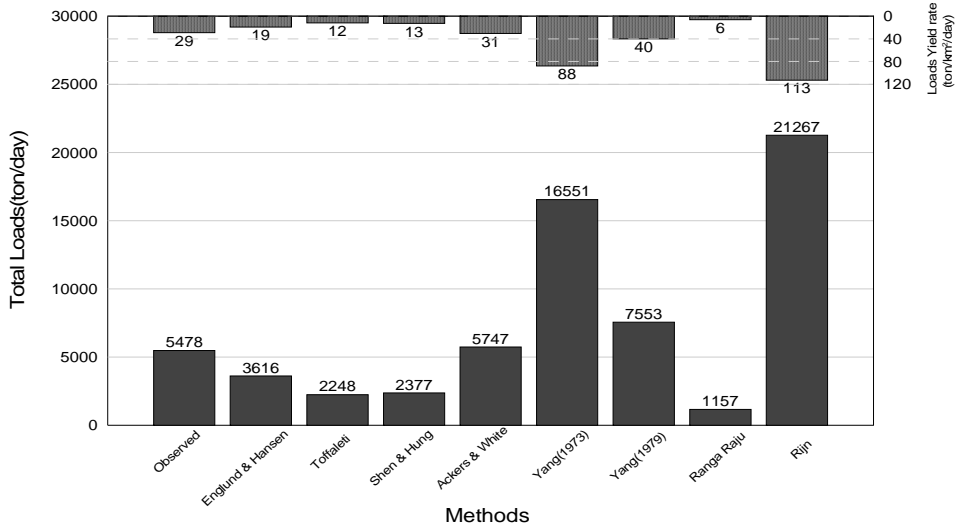


Fig. 3. Comparison of Calculated and Measured Sediment Discharge in Munsancheon

각 경험공식에 의한 연유사량 산정결과는 Fig. 3과 같다. 최대 비유사량은 112.88ton/km²/year (Rijn 방법), 최소 비유사량은 6.14ton/km²/year (Ranga Raju 방법)으로 두 방법의 결과치가 21배에 이르러 편차가 심한 것으로 나타났다. 이는 경험공식 특성상 유역의 특성을 나타내기에는 입력 변수가 한정되어 있고, 입력 변수의 민감도가 높아서 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 제시된 7가지의 공식을 이용하여 계산된 총유사량을 실측 및 실험에 의한 총유사량과 비교할 때 Ackers & White 공식이 실측치와 매우 유사한 값을 나타내었고 Ranga Raju, Rijn의 공식은 오차가 크게 나타나 적용하기에 어려운 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실측자료에 의한 결과값은 경험공식에 의한 추정값 보다는 합리적이라 판단되어 실측자료에 의해 산정한 유사량을 문산천 유역의 유사량으로 채택하였으며, 문산천 유역의 연간 총유사량은 5,478ton/year에 이르며, 비유사량은 29.23ton/km²/year이다. 산정된 유량-전유사량 관계곡선식을 하상변동 모형의 입력변수로 채택하여 모의하였다.

4. 수치모형 적용 및 장기하상변동 예측

4.1 수치모형의 입력자료와 경계조건

본 연구에서는 수치모형을 이용하여 문산천의 장기하상변동을 예측하기 위해 하상도, 유량, 유사량을 2008년부터 2010년까지 직접 측정하였으며, 측정된 데이터를 실내 실험을 통해 각각의 주요 입력인자를 추출하여 사용하였다. 이 외에 지형 데이터와 수문 데이터를 기존의 관측자료를 이용하여 사용하였으며 모형 적용과정에 대한 연구 흐름도는 Fig. 4와 같다.

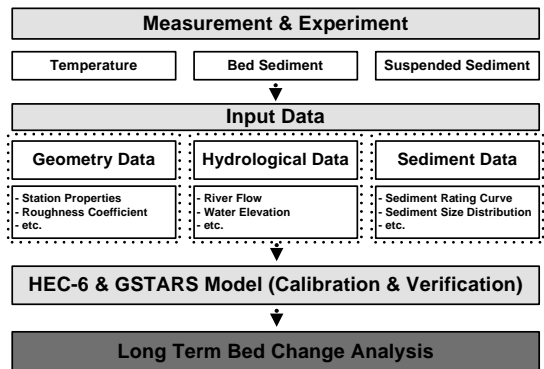


Fig. 4. Study Flow of Long Term Bed Change Analysis

하상변동의 모의를 위한 모형의 지형자료를 구성하기 위하여 모의 대상구간인 문산천 국가하천 11.6km 구간을 2009년도에 200m 간격으로 측량된 총 58개 단면자료와 구조물이 위치한 1개 단면을 사용하였으며, 모형의 검증을 위해 1997년도의 횡단면 자료를 사용하였다.

본 연구의 과업구간에 유량 및 수위 관측소가 없는 실정이므로 문산천이 합류하는 임진강에 위치하고 있으며, 가장 근접하여 있는 적성수위관측소를 채택하였다. 수위-유량 관계식을 통해 산정된 2000년부터 2009년까지 10년 동안 적성지점의 일유입량을 사용하였다.

1년, 10년 및 20년 기간의 장기하상변동을 모의하기 위해서는 20년 동안의 유량자료가 필요하므로 본 연구에서는 향후 발생하는 유량이 과거와 같은 성향을 나타내는 것으로 가정하여 2000년부터 2009년까지 과거 10년간의 적성지점의 일유입량을 유역면적비와 연평균강우비를 고려하여 문산천 유역에 해당하는 유량으로 환산한 후 하상변동 예측기간 만큼 유량을 반복하여 적용하였다. 환산된 결과는 Fig. 5와 같다.

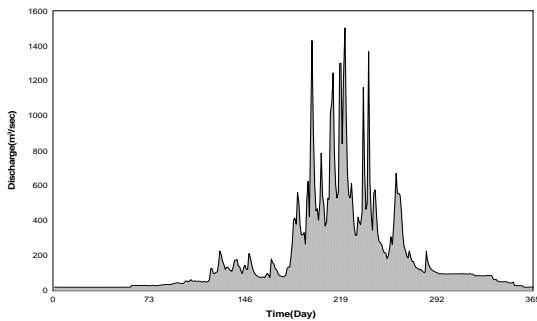


Fig. 5. Average Inflow of Study Area (2000~2009)

하상변동 수치모형은 계산시 연속적인 유출수 문곡선을 몇 개의 막대그래프 형태로 나누어 적용한다. 이때 각각의 수문사상을 정상류(steady flow) 상태로 가정하며, 지속기간의 단위는 일(day)이다. 이 지속기간은 이동상 모형의 실행시 계산시간과 계산결과의 안정성에 매우 큰 영향을 끼친다. 따라서 본 연구에서는 저유량시는 최대

16일, 고유량시는 최소 1일 간격의 지속기간으로 분할하여 1년동안 약 51개의 막대수문곡선 형태로 Fig. 6과 같이 유량조건을 재구성하였다.

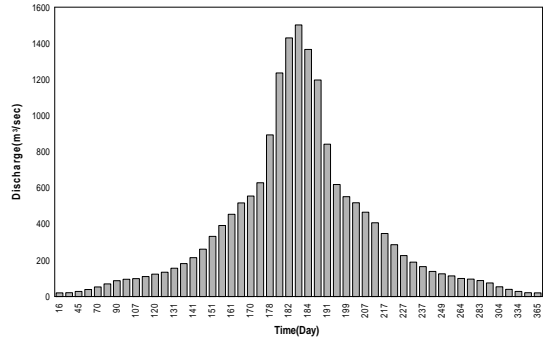


Fig. 6. Distributed Inflow of Study Area

하상변동모의를 위해서는 유입유량에 따른 최하류 단면의 기점수위가 필요하다. 재구성된 유량을 사용하여 연구대상유역의 최하류 단면인 No. 0의 기점수위를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

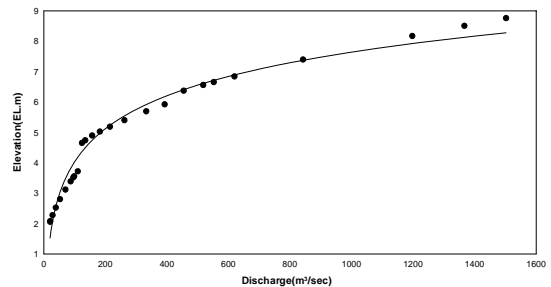


Fig. 7. Water Surface Elevation of No. 0(EI.m)

유사량자료는 본 연구에서 실측자료를 이용하여 유도한 유사량 공식을 사용하였으며, 또 하나의 민감한 입력변수인 하상토 자료를 구축하기 위해 1km 간격으로 12개 지점에서 하상시료를 직접 채취하였다. 채취된 시료는 입도분석 시험을 통해 각각 12개 입경등급으로 구분하여 입경-누적통과 백분율을 산정하였다.

하상재료의 누적통과백분율을 계산하여 입도분포곡선을 작성한 결과 감조구간인 하류부분에서는 대부분이 점토질의 특성을 나타내었고, 중상류부

의 충격하천 구간은 상류로 올라갈수록 세립질 모래 및 조립질의 자갈입자가 많이 분포하는 것으로 나타났다.

4.2 모형 검증

하상변동 예측모형인 HEC-6와 GSTARS모형

의 검증을 위해 1997년의 연구대상구간에 적용하여 10년 후 하상변동을 모의하고 그 결과를 2009년 측량성과와 비교 분석하였다. 각 모형의 수문 및 유사량 입력조건은 모두 같게 하였으며, 실측된 최심하상고와의 비교를 통해 모형의 검증 결과를 Fig. 8~9에 도시하였다.

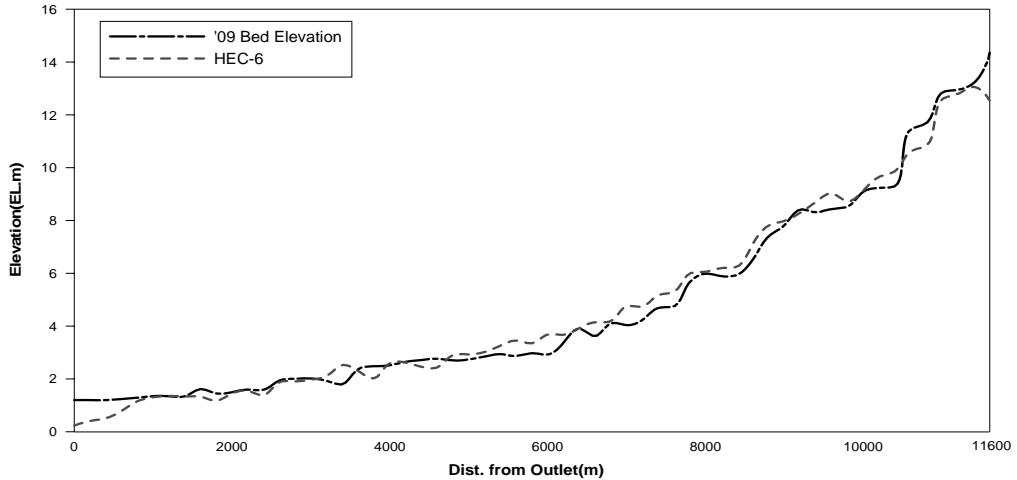


Fig. 8. Comparison of Observed and Simulated Bed Change (HEC-6)

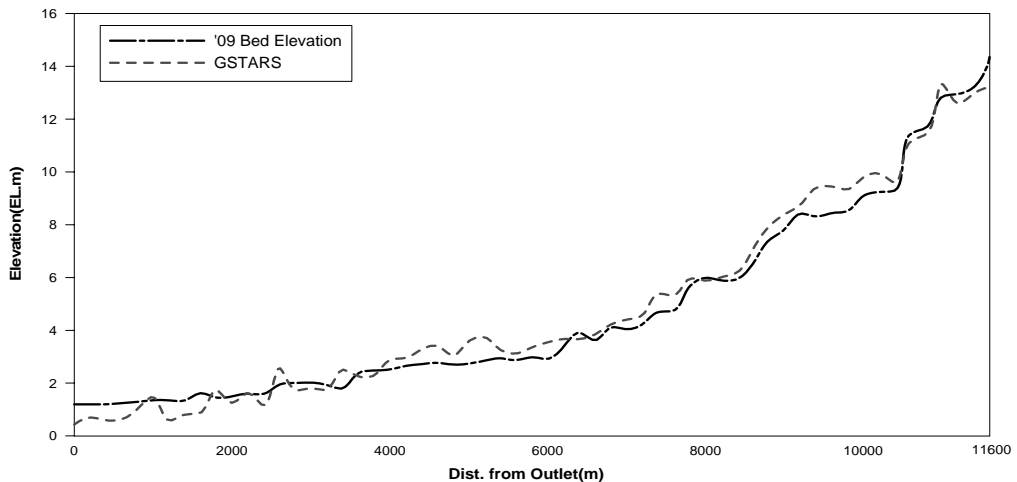


Fig. 9. Comparison of Observed and Simulated Bed Change (GSTARS)

하상변동 모의 검증결과를 정량적으로 비교하기 위해 2009년의 문산천 횡단 실측자료를 기준으로 각 모형별 RMSE(Root Mean Square Error)를 산정한 결과 HEC-6 모형은 0.45,

GSTARS 모형은 0.53으로 나타났다. 각 모형별 최심하상고의 실측값과 계산값의 상관도를 Fig. 10에 도시하였다.

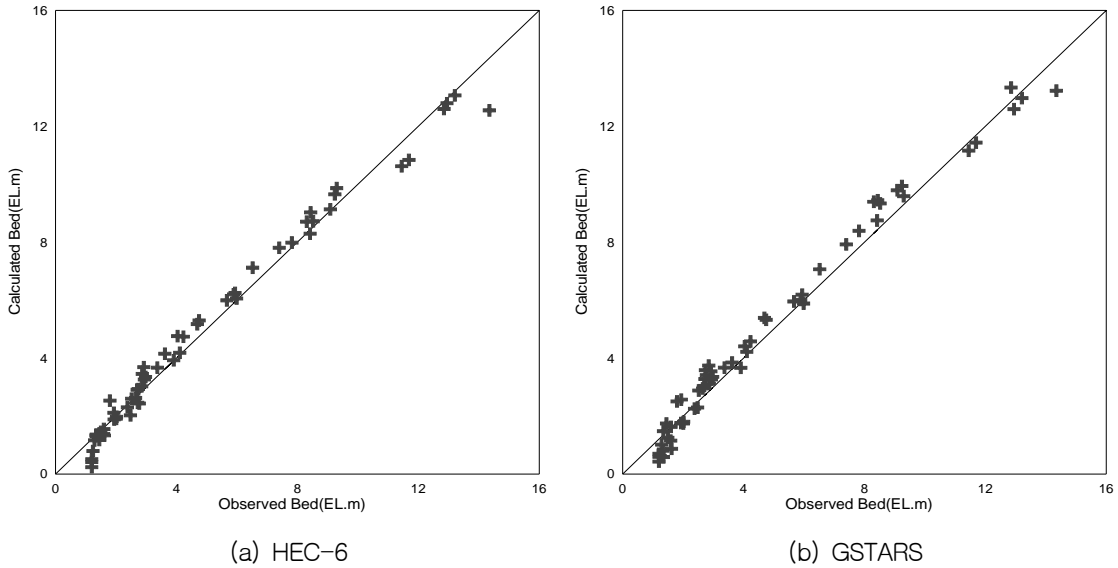


Fig. 10. Comparison of Calculated and Observed Bed Elevation

비교 결과 HEC-6 모형이 GSTARS 모형보다 실측값에 대한 오차가 적게 나타났지만 두 모형 모두 전반적으로 실측값을 잘 나타내어 장기적인 하상변동 예측시 모두 적용이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 정상적인 결과 외에 GSTARS 모형은 활동층의 두께를 각 단면별로 지정할 수 없기 때문에 보와 같은 구조물의 영향 및 하천의 특수한 상황을 반영하여 모의하기 어려운 점이 있다. 특히, 문산천과 같이 상류부 3개보의 영향 및 감조하천의 특성을 반영하여야 하는 경우 전체 구간의 장기적인 하상변동을 예측하기에는 어려움이 있다.

따라서 본 연구는 HEC-6 모형을 사용하여 문산천의 장기하상변동을 예측하였다. 하지만 GSTARS의 경우 횡단면의 변화도 모의 할 수 있는 큰 장점이 있어 실측자료를 이용한 모형의 검증에 바탕으로 연구의 목적 및 하천의 특성에 맞는 모형의 선택이 중요한 것으로 판단된다.

HEC-6 모형의 검증 결과 하류부는 유출구로부터 1,000m 구간을 제외하면 실측 하상고와 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 상류부는 국부적으로 퇴적 및 세굴이 발생하는 구간이 있지만

일부 구간을 제외하면 실제 하상고에 가까운 모의 결과를 나타내는 것으로 예측되었다. 따라서, 모형 검증에 사용된 수문 및 유사량 입력자료들이 타당한 것으로 판단된다.

이를 종합적으로 평가해 볼 때 HEC-6 모형이 문산천의 장기하상변동을 예측에 적절한 모형이며 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있다고 판단되어 이 연구의 장기하상변동 예측에 사용하였다.

4.3 장기하상변동 예측

연구대상 구간의 장기하상변동특성을 검토하기 위해 검정을 통해 구축된 HEC-6 모형을 사용하였으며, 1년, 10년, 20년 경과시 최심 하상고가 변동되는 양상을 분석하였다. 실제 하상의 변화를 정량적으로 파악하기 위해 2009년도 하천에 설치되어 있는 구조물 12개소를 기존의 단면에 추가하였다. 특히, 하상유지 시설물인 3개소의 보는 자연적인 현상으로는 침식이 발생하기 어려운 구조물이기 때문에 활동층의 두께를 0으로 제한하였다.

Fig. 11~13에 각각 1, 10, 20년 후의 최심하상고 변화를 도시하였다.

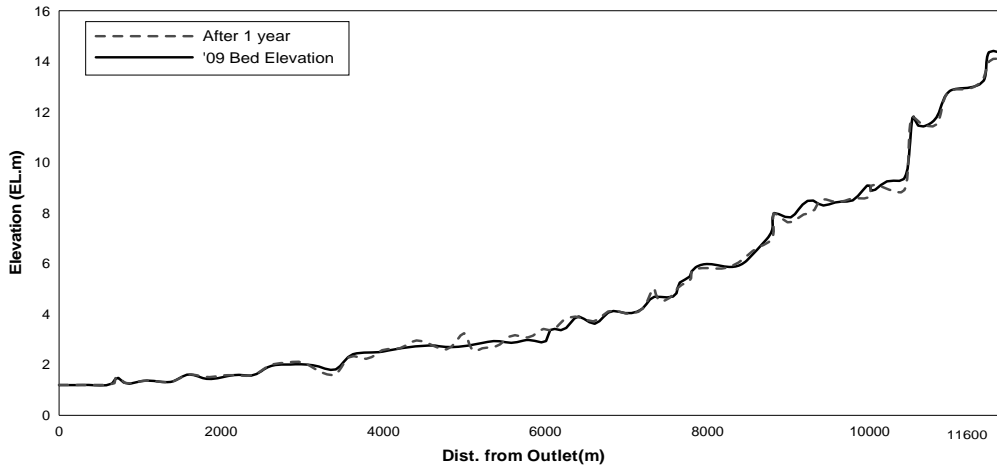


Fig. 11. Long Term Bed Change of Study Area (After 1 year)

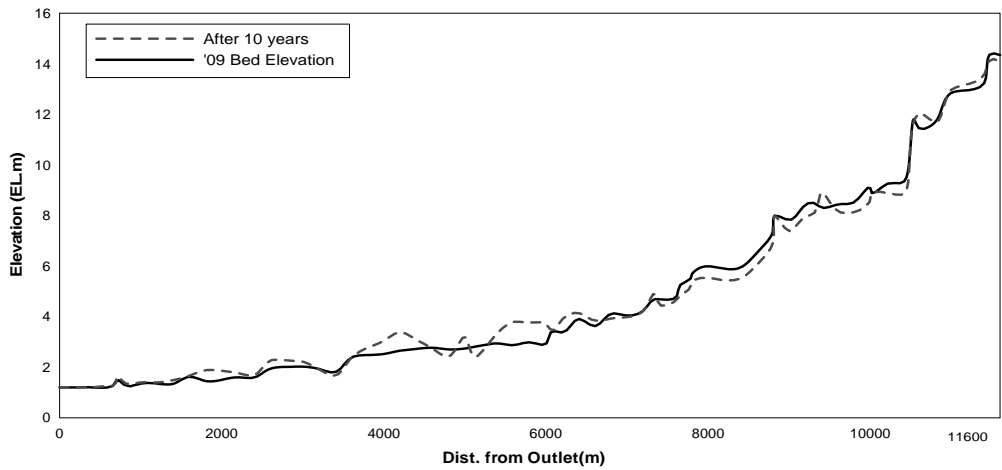


Fig. 12. Long Term Bed Change of Study Area (After 10 year)

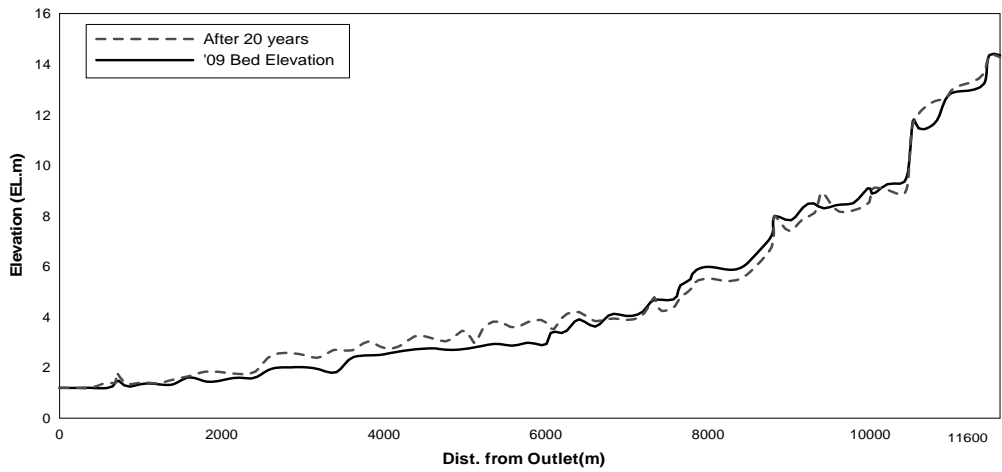


Fig. 13. Long Term Bed Change of Study Area (After 20 year)

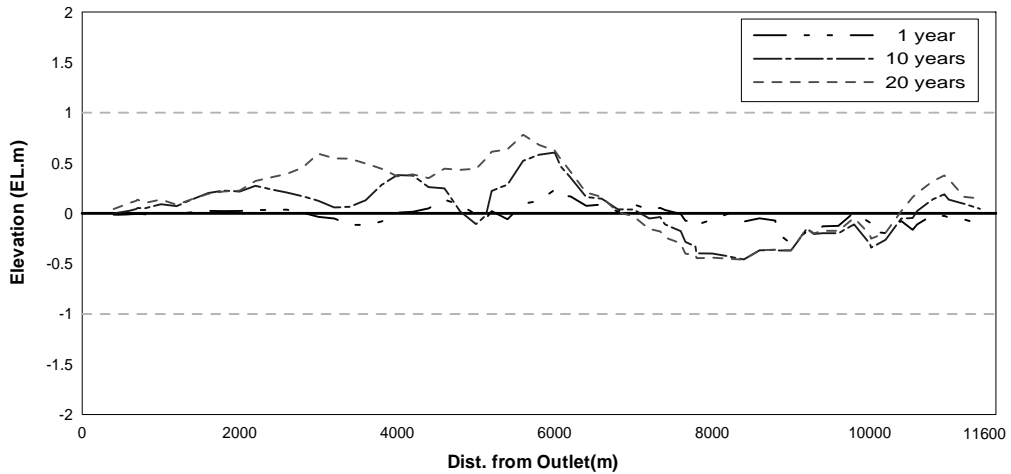


Fig. 14. Long Term Bed Change Trend

분석 결과 1년 후의 하상변화량은 큰 변화 없이 평형상태를 나타냈다. 10년경과 후의 하상변동 범위는 -0.41m~0.85m로 연구대상구간 총 11.6 km 구간에서 유출구로부터 7,000m까지는 국부적으로 퇴적이 발생되었고, 그 이상의 상류부에서는 대부분의 구간에서 침식이 발생하는 것으로 나타났다. 20년경과 후 하상변화량은 하상변동 범위는 -0.47m~0.91m로 감소하천의 영향을 많이 받는 유출구로부터 2,000m까지는 평형상태를 나타내며, 하류부인 2,000m~7,000m 구간에 퇴적활동이 지배적이다. 상류부에서는 10년경과 시와 비슷한 양상으로 침식활동이 발생하였으나 10,545m 상류에 위치한 너부여보의 영향으로 유입되는 유사가 쌓여 유입구부터 너부여보 사이 구간에는 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다.

문산천의 1년, 10년, 20년 경과시 유사이송에 따른 퇴적 및 침식의 변화를 분석하였으며, 경년별 최침하상과 변동 양상을 Fig. 14에 도시하였다.

유출구로부터 7,000m 이상 상류부의 경우 침식이 지속되다가 10년 후에는 8000m~10000m 구간의 하상이 안정화되어 평형상태에 도달하는 것으로 분석되었다. 하류부의 경우 대부분의 구간에서 퇴적이 발생하여 20년 후에는 유출구로부터 2000m 지점까지는 안정화 되는 경향을 보이고, 그 이상의 구간에서는 퇴적활동이 지속적으로 발

생할 것으로 예측되고 있다. 상류부에서 침식이 주로 발생하는 이유는 급한 하상경사 및 자갈과 모래로 이루어져 있는 하상구성 재료의 영향이며, 하상유지시설물인 3개의 보도 많은 영향을 주고 있다. 하류부는 조수의 영향을 받는 감소하천으로서 점토질의 특성을 보이며, 완만한 경사로 유속이 느리고 감소부의 영향으로 대부분 구간에서 퇴적이 발생하였다.

이를 종합적으로 평가해 볼 때 문산천의 경우 상하류 특정 구간에서 20년 후의 하상상태로 안정화 될 것으로 판단되며, 감소영향을 받는 하류부 구간에서는 퇴적활동이 지속적으로 발생할 것으로 예측되나 하상의 변동량은 1m 이내로 유의한 수준에 있다. 하지만 이는 향후 발생하는 유량이 과거와 같은 성향을 나타내고, 장기적으로 하상변동에 영향을 주는 여러 하도 인자들의 변화는 없을 것으로 가정한 것이다. 따라서, 하도 내의 굴착 및 매립 등과 같은 인위적인 요인과 기후변화로 인한 대규모 홍수와 같은 자연적인 요인으로 인해 하상변동량은 모의 결과 보다 크게 나타날 가능성이 있다. 특히, 감소부의 영향을 받는 하류부에서 유출구로부터 거리 2,000m~7,000m 사이 구간에 퇴적이 지속적으로 증가되고 있어 추후 하천관리계획 수립시 반영될 필요성이 있다.

5. 결 론

본 연구는 대상유역 유사량을 실측하여 특성을 분석하고 기존의 유사량 추정 공식과 비교·분석하여 신뢰성 있는 유사량 추정방법을 제안하고자 하였다. 또한 문산천을 대상으로 수리·수문 및 유사 이동에 대한 수치모형을 실험하여 장기하상변동 특성을 분석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 2008년~2010년 동안 문산천의 하상도 및 갈수기, 평수기, 홍수기 때의 부유사를 측정하였으며, 실내시험을 통해 총유사량을 산정하였다. 총유사량 산정결과 연간 총유사량은 5,478ton/year에 이르며, 비유사량은 29.23ton/km²/year로 나타났다.
- (2) 기존에 사용되고 있는 7가지의 유사량 추정 경험공식을 이용하여 계산된 총유사량을 실측 및 실험에 의한 총유사량과 비교하였다. Ackers & White공식이 실측치와 매우 유사한 값을 나타내어 문산천과 비슷한 유역에서 유사량을 직접 실측하지 못할 경우 Ackers & White공식의 사용이 추천된다. 하지만 현재까지 유사이동에 관한 지식은 신뢰도 높은 유사량 추정에 이르지 못하고 있어 이 연구에서는 2008년~2010년까지 실측된 자료를 이용하여 문산천의 유량-총유사량 관계식을 유도하였으며, 그 결과는 $Q_s = 0.0502862846 \times Q^{1.8689}$ 이다.
- (3) 장기하상변동 예측을 위해 HEC-6와 GSTARS 모형의 검증을 수행하여 결과를 비교·분석하였다. 분석결과 HEC-6 모형이 GSTARS 모형보다 실측값을 대한 오차가 적게 나타났으며, 검증결과 하류부는 유출구로부터 1,000m 구간을 제외하면 실측 하상고와 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 상류부는 국부적으로 퇴적 및 세굴이 발생되는 구간이 있지만 일부 구간을 제외하면 실제 하상고에 가까운 모의 결과를 나

타내는 것으로 예측되었다. 따라서, 모형 검증에 사용된 수문 및 유사량 입력자료들이 타당한 것으로 판단되며, HEC-6 모형이 문산천의 장기하상변동을 예측하기에 적합한 것으로 판단되었다.

- (4) 수치모형을 이용하여 문산천의 1년, 10년, 20년 경과시 최심 하상고가 변동되는 양상을 분석하였다. 분석결과 1년경과 후의 하상변화량은 큰 변화 없이 평형상태를 나타냈으며, 10년경과 후의 하상변동 범위는 -0.41m~0.85m, 20년경과 후 하상변동 범위는 -0.47m~0.91m로 감소하천의 영향을 많이 받는 유출구로부터 2,000m까지는 평형상태를 나타내며, 하류부인 2,000m~7,000m 구간에 퇴적활동이 지배적이다. 상류부에서는 10년 후 까지 침식활동이 발생하였으나 10,545m 상류에 위치한 너부여보의 영향으로 유입되는 유사가 쌓여 유입구부터 너부여보 사이 구간에는 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다.
- (5) 이를 종합적으로 평가해 볼 때 문산천의 상하류 특정 구간에서 향후 20년 후의 하상상태로 안정화 될 것으로 판단되며, 감소 영향을 받는 하류부에서는 퇴적활동이 지속적으로 발생할 것으로 예측되나 하상의 변동량은 1m 이내로 유의한 수준에 있다. 그러나 하도 내의 굴착 및 매립 등과 같은 인위적인 요인과 기후변화로 인한 대규모 홍수와 같은 자연적인 요인으로 인해 하상변동량은 모의 결과 보다 크게 나타날 가능성이 있다. 특히, 감소부의 영향을 받는 하류부에서 유출구로부터 거리 2,000m~7,000m 사이 구간에 퇴적이 지속적으로 증가되고 있어 향후 하천관리계획 수립시 반영될 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발

사업인 ‘대규모 하천정비에 따른 자연재해 환경변화 및 방재체계 재구축’ 과제의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2006). 한국수문조사연보 2006.
 한국건설기술연구원 (1989). 하천유사량 산정방법의 선정기준 개발.
 한국건설기술연구원 (1991). 하상변동 예측모형의 비교분석.
 김성원, 고병련, 조정석 (1998). “결정론적 유사량 산정공식의 민감도 분석에 관한 연구.” **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제7권, 제5호, pp. 581-590.
 서일원, 김대근, 이재형 (1995). “GSTARS 모형을 이용한 하상변동 해석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제6호, pp. 1679-1687.
 손명원 (1986). “댐건설로 인한 하도형태의 변화-대청댐하류구간을 사례로.” **대한지리학회지**, 대한지리학회, 제21권, 제1호, pp. 37-44.
 안상진, 윤석환, 백남대 (2002). “수치모형을 이용한 하상변동 예측.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회 제35권, 제6호, pp. 693-701.
 이재수, 윤용남 (1995). “한강분류의 하상변동에 관한 연구.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제4호, pp. 875-884.
 임창수, 손광익, 이재준, 윤세의 (1999). “수치모형을 이용한 하상변동 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제2호, pp. 131-142.
 지운, 손광익, 김문모 (2009). “홍수조절댐에서의 배사관 설치에 따른 상류 하천의 하상변동에 관한 수치모의 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제4호, pp. 319-329
 Karim, M.F. and Holly, F.M. (1983). *Computer simulation prognosis of the degradation of the Missouri river between gavins point*

dam and Iowa's southern border, Iowa Institute of Hydraulic Research.
 Parker, G. and Paola, C. and Leclair, S. (2000). "Probabilistic Exner Sediment Continuity Equation for Mixtures with No Active Layer.", *Journal of Hydraullic Engineering*. ASCE, Vol. 126, No. 11, pp. 818-826.
 Kumar, S.J. (2001). "Development of Integrated Sediment Rating Curves Using ANNs.", *Journal of Hydraullic Engineering*. ASCE, Vol 127, No. 1, pp. 30-37.
 Sharma, S. and Kavvas, M.L. (2005). "Modeling Noncohesive Suspended Sediment Transport in Stream Channels Using an Ensemble-Averaged Conservation Equation.", *Journal of Hydraullic Engineering*. ASCE, Vol 131, No. 5, pp. 380-389.
 Thomas, W.A and Prasuhn, A.L. (1977). "Mathematical modeling of sediment transport scour and deposition in river channels.", *17th congress, IAHR*, Vol. 1, pp. 137-144.
 Tingsanchali, T. (1996). "Experimental investigation and Analysis of HEC-6.", *Journal of Hydrological Processes*. ASCE, Vol. 10, Issue 5.
 Yang, C.T. (1998). *Simulation and Prediction of River Mophologic Change Using GSTARS 2.0*, International Conference on Hydro-Sience and Engineering, Cottbus/Berlin, Germany.
 Yang, J.C. (1986). *Numerical simulation of bed evolution in multi-channel river system*, Ph. D, Thesis Dissertation, The University of Iowa.

논문접수일 : 2011년 07월 05일

심사의뢰일 : 2011년 07월 08일

심사완료일 : 2011년 08월 24일