

사립조도와 하상형상조도를 고려한 내성천 하류의 흐름저항 분석 Flow Resistance Analysis for Lower Naesung Stream Considering Grain and Bedform Roughness

지 윤* / 김 지 성** / 이 찬 주***
Ji, Un / Kim, Ji-Sung / Lee, Chan Joo

Abstract

Roughness coefficients calibrated by flow modeling using the 1-dimensional numerical model were analyzed for the downstream section of Naesung Stream in this study. Also, the bedform configuration at the Hyangseok Station was predicted for measured and simulated hydraulic conditions of flows and total flow roughness was estimated with the coefficient of grain roughness. The Manning's n coefficients calibrated by numerical modeling and estimated by considering of grain and bedform roughness were compared and examined. As a result, the Manning's n by numerical modeling was greater than the coefficient range estimated by grain and bedform roughness at the low flow regime due to the other factors such as vegetation, sinuosity, and sand bar. However, the Manning's n by numerical modeling was included in the coefficient range by grain and bedform roughness at the transition and high flow regime over 500 m³/s of flow discharge.

Keywords : bedform configuration, flow resistance, grain roughness, Naesung stream, roughness coefficient

요 지

본 연구에서는 내성천 하류 구간을 대상으로 검보정된 1차원 수치모형을 이용하여 흐름모의를 수행함으로써 추정된 구간 조도계수에 대해 분석하였다. 또한 실측 및 모의된 수리조건을 이용하여 향석 지점에서의 하상형태 예측을 수행하였으며 사립조도에 의한 흐름저항 계수 값을 고려하여 총 흐름저항 조도계수를 산정하였다. 수치모의에 의해 추정된 구간 조도계수와 사립조도 및 하상형태에 의한 흐름저항 계수를 추정한 결과 값을 상호 비교 분석하였으며 그 결과, 저수류 영역 흐름에서는 사립조도 및 하상형태에 의한 흐름저항 외에 식생, 만곡도, 사주 등의 기타 요인들에 의한 영향이 크게 반영되어 수치모의 상의 조도계수 값이 사립조도 및 하상형태에 의해 추정 가능한 조도계수 범위보다 크게 산정되는 것으로 나타났다. 그러나 500 m³/s 이상의 천이구간 및 고수류 영역에서는 사립조도 및 하상형태 예측에 의한 조도계수 범위에 수치모의에 의해 검증된 Manning 조도계수가 포함되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하상형태, 흐름저항, 사립조도, 내성천, 조도계수

* 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: juncivil@gmail.com)

Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

** 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: jisungk@kict.re.kr, Tel: 031-995-0826)

Corresponding Author, Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

*** 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: jisungk@kict.re.kr)

Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

1. 서 론

하천에서의 흐름과 유사이송을 분석하기 위해서는 흐름 저항 예측 또는 산정 과정이 반드시 필요하다(Wu and Wang, 1999). 하천의 흐름저항을 나타내는 계수는 공간적 규모에 따라 점(Point), 단면(Cross section), 구간(Reach)에서의 값으로 구분할 수 있으며, 흐름저항 계수 산정에 있어서 공간적 규모가 증가함에 따라 하상재료 입경 이외에 하천의 기하형상, 흐름의 비균일성 및 공간적/시간적 가속 영향 등이 추가된다(Yen, 2002). 하천의 흐름저항을 나타내는 대표적인 매개변수는 Manning 조도계수이며, Manning 조도계수는 하천 수리특성 분석을 위한 가장 기초적인 변수이면서, 모든 수리특성에 영향을 미치는 매우 중요한 변수이다. 하천계획 수립시 Manning 조도계수는 주로 구간 규모로 추정되고 있으며(Lee et al., 2007), 구간 조도계수를 추정하는 방법은 실측자료를 이용한 조도계수 산정 방법, 국내외 현장사진이 포함된 조도계수 자료집과 비교하는 방법, 하상재료의 특성에 따른 경험식으로 산정하는 방법 등이 있다(Kim et al., 2007a), 한편 Kim et al. (2011)은 하천의 기초 자료조사가 부족한 국내 하천여건상 수리학적 모형을 이용한 방법이 객관적이고 정확한 방법임을 제시하였다. 실제로 홍수사상에 대한 실측자료가 충분히 가용할 경우, 계산 수위와 실측 수위가 서로 일치하도록 구간 조도계수를 조정하여 수치모형을 보정하고 검증하는 방법은 국내외적으로 일반적인 방법이다(Kim et al., 1995; Vidal et al., 2007; Kim and Kim, 2013). Bae et al. (2012)은 1차원, 2차원, 3차원 수치모형에서 적용하는 흐름저항 매개변수인 Manning 조도계수의 지정방법에 대하여 검토하였으며 1차원 모형이 모든 저항요인을 하상마찰에 의한 에너지손실에 흡수시키고 있는 반면, 2차원 및 3차원 모형은 하상마찰과 와류에 의한 에너지손실을 분리하여 반영하고 있음을 명시하였다. 그러나 수치모형 검토용으로 추정된 조도계수는 사용된 모형의 지배방정식의 한계뿐만 아니라 하천기하 형상, 시스템으로 유입/유출되는 수문자료 등 모형구축에 사용된 자료의 한계 등을 모두 포함하고 있으므로 추정된 조도계수에 대한 물리적 의미에 대해 검토할 필요가 있다.

충적하천의 경우 하상형태와 조도는 시간에 따라 변동되며 이러한 하상변화와 조도계수의 변화를 정량적으로 산정하는 것은 매우 어려운 문제이다(Wu and Wang, 1999). 흐름에 의해 하상의 형태가 변하고, 변한 하상형태에 의해 동시에 흐름 특성이 변한다(Woo, 2001). 따라서 이렇게 상호 작용을 하는 흐름과 하상은 어느 한 변수를

알고 다른 변수를 구하는 전통적인 방법이 통용되지 않는다. 충적하천에서 수심과 유량과의 관계는 등류에서도 고 정상 하천과 같이 하나의 수심이 하나의 유량 값에 대응되지 않고 어느 한 수심에 대해 두 개의 유량이 존재할 수 있으며 하천 기하 경계가 같아도 하상형태의 변화에 따라 Manning 조도계수 값이 3배 이상의 차이를 보일 수 있다(Woo, 2001). Einstein and Barbarossa (1952), Engelund and Hansen (1967), Alam and Kennedy (1969), Griffiths (1989) 등은 모래하천의 흐름저항을 사립자에 의한 저항과 모래하상의 하상형태 변화에 따른 저항으로 구분하여 계산할 수 있는 경험적 혹은 준경험적인 방법들을 제안한 바 있다. Li and Liu (1963), Richardson and Simons (1967), 그리고 Karim (1995)은 이동상 하도에서의 전체 흐름저항 계수 혹은 전체 조도계수를 산정하는 방법을 제시하기도 하였다. 국내에서는 이와 같은 경험적 혹은 준경험적 하상형태 예측 방법들을 이용하여 Ji et al. (2008)이 낙동강 하류의 배수면 곡선 계산 자료를 기초로 하상형태를 예측하고 하상형태가 제시하고 있는 조도계수의 범위를 이용하여 낙동강 하류의 조도계수를 검증한 바 있다.

본 연구의 목적은 내성천 하류구간에서 1차원 수치모형의 검토용으로 추정된 조도계수의 물리적 의미를 검토하는 것이며, 이를 위하여 하상재료에 의한 저항과 하상형태 변화에 따른 저항으로 구분하여 각각 조도계수를 추정하였다. 이는 모래하천의 구간 흐름저항이 사립자에 의한 저항과 하상형태 변화에 따른 저항으로 구분하여 계산할 수 있다는 기존의 방법을 적용한 것이다. 본 연구에서는 미공병단에서 개발된 1차원 수치모형인 HEC-RAS version 4.1 (USACE, 2010)을 이용하여 내성천 하류구간에 대한 조도계수 검토를 수행함으로써 유량별 조도계수를 추정한 후, 사립자 조도에 의한 흐름저항 계수는 Meyer-Peter and Müller (1948)와 Manning-Strickler 공식을 이용하여 계산하였고, 하상형태의 변화는 Simons and Richardson (1963, 1966) 방법을 이용하여 하상형상을 예측하고 하상형태 조도에 의한 흐름저항 계수를 추정하였다. 마지막으로 수치모형과 경험적/준경험적 방법으로 산정된 조도계수를 비교함으로써, 수치모형으로 산정된 조도계수의 한계와 의미를 정량적으로 분석하였다.

2. 내성천의 수리 및 지형학적 특성

내성천은 낙동강의 제 1 지류하천으로서 그 유역은 소백산맥 남부의 경북 북부 내륙 지역에 위치하고 있으며, 북쪽으로는 한강 유역, 남쪽 및 동쪽으로는 낙동강 유역

을 접하고 있고 유역면적은 1,814.7 km²에 달한다(MLTM, 2013). 내성천 본류는 경북 봉화군 물야면 오전리에서 발원하여 낙화암천, 토일천, 영주서천, 옥계천, 석관천, 한천, 금천을 차례로 합류한 후 경북 예천군 용궁면 향석리에서 낙동강에 합류하고, 유로연장은 108 km이며, 본류와 지류를 포함하여 유역내 총 10개의 수위관측소가 있다(Fig. 1).

내성천 유역은 본류를 중심으로 크게 두 부분으로 구분된다. 본류의 북쪽은 유역면적의 대부분을 차지하고 있으며, 화강암 및 편마암복합체로 구성되어 있다. 본류의 남쪽은 전체 유역면적의 10% 내외로 북쪽에 비해 상대적으로 좁으며 남서-북동 방향으로 대상의 편마암 지질 및 화강암으로 구성되어 있다(MLTM, 2013). 이러한 유역의 특성으로 인해 주요 지류는 모두 북쪽에서 우안으로 유입한다. 내성천은 소백산맥 자락에 속하는 본류 및 주요 지류의 최상류 고지대와 유역이 경상충군에 속하는 지질로 구성된 금천 유역을 제외하고는 전체적으로 유역의 고도와 평균경사가 비교적 낮으며, 하계망이 조밀하게 발달되

어 있다. 이러한 특성으로 인해 조립질의 모래가 주종인 화강암 풍화토가 하천에 쉽게 공급될 수 있는 환경을 조성하며, 내성천이 모래하천의 특성을 유지하는데 크게 기여하고 있다.

영주댐부터 낙동강합류점까지 하상재료 조사를 실시한 결과 내성천의 대표입경은 댐 하류 일부 구간을 제외하고는 중앙입경(d_{50})을 기준으로 1 mm에서 2 mm 정도로서 조사(coarse sand)에 해당하므로 하상은 사립자의 하상과에 의하여 조도가 좌우되는 특성을 나타내고 있다(Fig. 2).

본 연구에서는 비교적 최근 측정성고가 풍부한 내성천 향석 지점의 자료를 이용하여 내성천 하류구간의 수리특성을 분석하기 위하여 죽전 수위관측소에서 낙동강 본류의 달지 수위관측소까지를 대상구간으로 결정하였다. 대상구간 내에는 향석 지점에서 약 3 km 하류에 금천이 합류하고 다시 약 1 km 하류에 낙동강 본류가 합류하므로, 금천과 내성천 합류점 상류의 낙동강을 측방유입으로 고려하였으며, 그 밖의 지류는 내성천 본류에 비하여 그 규

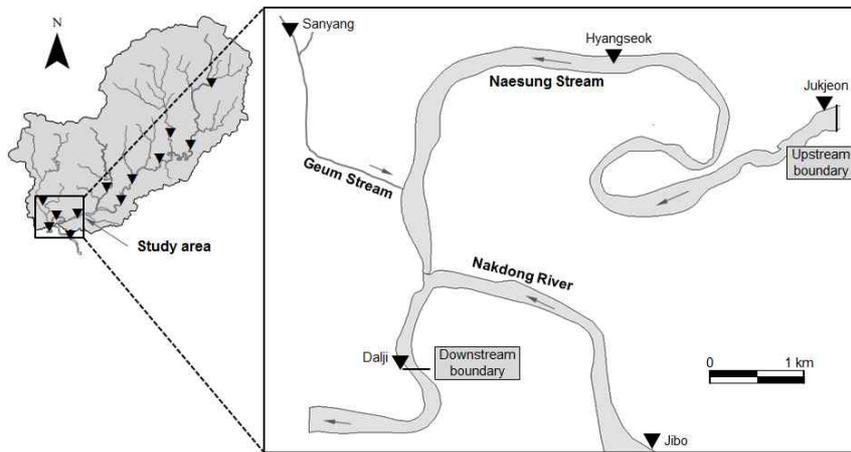


Fig. 1. Study Reach

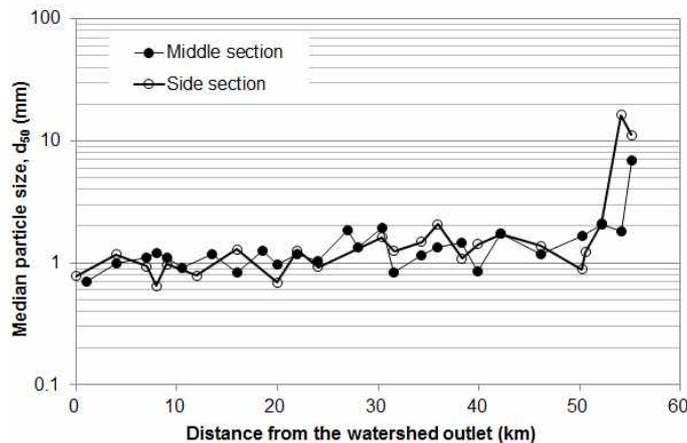


Fig. 2. Representative Bed Material Size Along the River (KICT, 2012)

모가 미미하므로 수치모형 구성에서 제외하였다. 따라서 상류단 경계 조건인 죽전 수위표와 지류인 금천의 산양 수위표, 낙동강 본류의 지보 및 달지 수위관측소 자료가 분석에 활용되었다(Table 1).

3. 수치모형을 이용한 하천 조도계수 추정

혼적 수위 또는 실측 수위를 이용하여 조도계수를 역산할 경우, 부등류 또는 부정류 계산방법을 사용할 수 있다. 비교적 구간거리가 짧은 경우, 부등류와 부정류 계산에 의하여 산정된 조도계수는 유량이 상승하거나 하강하는 시점을 제외하고 유사한 결과를 나타낸다(Kim et al., 2007b). 이는 조도계수 산정 구간 내에서 유량과 수위의 시간에 따른 변화가 크지 않기 때문이다. 본 연구대상 구간의 경우, 실측수위 자료를 향석 지점의 6km 상류인 죽전 지점, 5km 하류인 달지 지점에서 취득할 수 있으므로 HEC-RAS 모형의 부등류 해석과 부정류 해석을 모두 수행하여 그 결과를 비교하였다.

3.1 부등류 해석

대상구간의 흐름저항 특성을 분석하기 위하여 먼저 부등류 해석을 수행하였다. 하천 단면은 최근 하천기본계획 수립 성과인 2012년 측량자료를 사용하였고, 해석 조건은 유량조사사업단에서 2010년, 2011년 내성천 향석 지점에서 측정한 44개 수리특성 자료(Table 2)를 기준으로 하였다. 각 조건에서 측정된 향석 지점의 유량을 상류단 경계 조건으로 사용하였고, 이와 동일한 시점의 산양 지점(금천) 그리고 지보 지점(낙동강)의 유량으로부터 측방유입량을 산정하였으며, 하류단 경계조건은 달지 지점의 수위를 지정하였다. 시행착오법으로 향석 지점에서 계산된 수위와 측정된 수위가 일치하도록 조도계수를 추정하였으며, 그 결과 향석 지점에서 측정된 수위와 계산된 수위는 평균제곱근오차가 4 cm 정도로 부등류 해석모형이 잘 보정되었음을 확인할 수 있다(Fig. 3). 부등류 해석에 의해

추정된 Manning 조도계수와 에너지경사를 각각의 유량 조건마다 Table 2에 함께 나타냈다.

3.2 부정류 해석

수치모의 대상구간의 연장은 11 km이고, 상류단으로 부터 약 6 km 떨어져 향석 수위관측소가 위치하고 있으므로 향석 지점의 측정값이 전 구간에서 정상 상태를 유지하고 있음을 확인할 수 없다. 따라서 부정류 모의에 의한 유량별 조도계수 추정을 추가로 수행하였다. 부정류 모형의 보정에 사용된 홍수사상은 최근 3년간(2010~2012년) 발생한 홍수사상 중 최고 수위를 나타내었던 2011년 6월 24일부터 6월 28일까지의 홍수사상이며, 두 번째로 높은 수위를 나타내었던 2010년 9월 11일부터 9월 16일까지의 홍수사상으로 모형을 검증하였다. 선택된 사상의 기간은 다양한 유량규모의 재현을 고려하였고, 동일 기간 금천(산양), 낙동강(지보)의 유입 유량과 달지 지점의 수위를 각각 측방유입, 하류단 경계조건으로 사용하였다.

상류단 경계지점인 죽전의 경우, 2006년 이후 유량측정이 수행되지 않았고 근거리 하류에 위치한 향석 지점에서

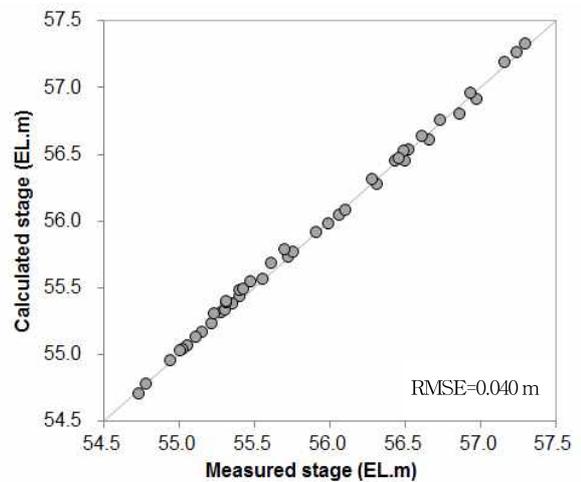


Fig. 3. Comparison between Measured and Computed Data at the Hyangseok Station

Table 1. Water Level Gauging Stations at Naesung Stream

Station	Location (Longitude/Latitude)	Period of observation	Drainage Area (km ²)	Purpose
Jukjeon	128-20-54/36-35-03	1973-01-01 ~ Current	1,484	Upstream Boundary
Hyangseok	128-19-10/36-35-11	2007-01-26 ~ Current	1,527	Point of analysis
Sanyang	128-15-47/36-36-38	1968-01-01 ~ Current	215	Lateral inflow
Jibo	128-21-54/36-31-49	1988-01-01 ~ Current	4517	Lateral inflow
Dalji	128-17-47/36-33-21	1962-07-01 ~ Current	6,375	Downstream Boundary

Table 2. Measured Hydraulic Data (Data source from MLTM, 2011; MLTM 2012) and Calculated Manning's n at the Hyangseok Station in Naesung Stream

Date (YYYY-MM-DD)	Measured data					Calculated data	
	Discharge, Q (m ³ /s)	Water level, H (El.m)	Flow depth, h (m)	Channel width, W (m)	Velocity, V (m/s)	Energy slope, Sf	Manning's n
2010-08-07	32.90	54.78	0.56	108.8	0.54	0.000187	0.049
2010-08-10	28.70	54.73	0.56	100.1	0.51	0.000167	0.049
2010-08-10	48.10	54.94	0.63	128.1	0.6	0.000278	0.048
2010-08-11	73.20	55.15	0.82	131.0	0.68	0.000433	0.048
2010-08-11	111.50	55.40	0.94	151.7	0.78	0.000560	0.046
2010-08-12	92.00	55.28	0.93	133.3	0.74	0.000598	0.047
2010-08-12	81.30	55.21	0.87	131.8	0.71	0.000633	0.048
2010-08-12	60.60	55.05	0.73	129.6	0.64	0.000344	0.048
2010-08-13	57.60	55.02	0.70	129.2	0.64	0.000324	0.048
2010-08-13	68.60	55.11	0.78	130.5	0.67	0.000402	0.048
2010-08-14	101.80	55.35	0.91	149.2	0.75	0.000575	0.047
2010-08-14	94.20	55.30	0.95	133.8	0.74	0.000592	0.047
2010-08-15	183.70	55.72	1.00	211.6	0.87	0.000531	0.041
2010-08-15	233.90	55.91	1.18	213.3	0.93	0.000549	0.040
2010-08-16	191.50	55.75	1.02	212.4	0.88	0.000535	0.041
2010-08-16	143.10	55.55	0.82	212.4	0.82	0.000534	0.042
2010-09-07	279.10	56.06	1.32	214.1	0.98	0.000560	0.038
2010-09-07	293.50	56.10	1.36	214.4	1.01	0.000563	0.038
2010-09-07	257.50	55.99	1.26	213.8	0.96	0.000554	0.039
2010-09-12	437.40	56.50	1.75	216.6	1.16	0.000600	0.036
2010-09-12	503.30	56.66	1.90	217.6	1.22	0.000606	0.036
2010-09-12	589.90	56.86	2.09	218.7	1.29	0.000618	0.035
2010-09-12	641.80	56.97	2.19	219.3	1.34	0.000630	0.035
2010-09-13	363.60	56.31	1.56	215.6	1.08	0.000581	0.037
2011-07-10	512.99	56.61	1.79	217.9	1.31	0.000607	0.036
2011-07-10	472.87	56.52	1.71	217.4	1.28	0.000610	0.036
2011-07-10	380.45	56.28	1.48	216.0	1.19	0.000582	0.037
2011-07-10	460.53	56.49	1.68	217.2	1.26	0.000594	0.036
2011-07-10	657.29	56.93	2.10	219.7	1.43	0.000616	0.035
2011-07-11	773.54	57.16	2.31	220.8	1.51	0.000629	0.035
2011-07-11	851.54	57.30	2.45	221.4	1.57	0.000647	0.035
2011-07-11	816.13	57.24	2.39	221.2	1.54	0.000645	0.035
2011-07-11	563.66	56.73	1.91	218.6	1.35	0.000612	0.036
2011-07-12	438.32	56.43	1.62	216.8	1.25	0.000600	0.036
2011-07-12	448.35	56.46	1.65	217.0	1.25	0.000603	0.036
2011-08-07	57.07	55.00	0.77	110.1	0.67	0.000322	0.048
2011-08-08	89.93	55.23	0.78	146.1	0.79	0.000605	0.047
2011-08-08	121.71	55.40	0.87	160.3	0.87	0.000549	0.045
2011-08-08	124.95	55.42	0.88	162.4	0.88	0.000546	0.044
2011-08-08	103.63	55.31	0.82	151.3	0.83	0.000571	0.047
2011-08-09	104.52	55.31	0.83	151.7	0.83	0.000570	0.047
2011-08-09	137.40	55.47	0.90	167.4	0.91	0.000537	0.043
2011-08-09	169.52	55.61	0.91	193.4	0.96	0.000527	0.041
2011-08-10	194.27	55.70	0.95	204.6	1.00	0.000536	0.041

최근까지 유량측정이 수행되고 있다. 죽전지점의 2006년 수위-유량관계 곡선은 최대 41.94 m³/s까지만 실측 수위-유량 자료를 활용하였고, 이보다 큰 유량 규모에서는 계획 홍수량-홍수위를 이용하여 외삽 하였으므로 실측자료 이상의 유량 규모에서 수위-유량관계 곡선의 적정성을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 2010년부터 2012년까지 향석 지점에서 측정된 유량 성과로부터 죽전지점의 고수위 측정 자료를 보완하였으며, 향석 측정지점의 죽전 수위를 측정된 유량과 연계하였다(Fig. 4). 이는 죽전 지점과 향석 지점 사이에서 추가적인 유량의 유입이 없다는 것을 가정 한 것이다. 2006년 죽전 수위-유량관계 곡선과 본 연구에서 새롭게 작성된 죽전 수위-유량관계 곡선을 산술 축에 도시하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4로부터 죽전의 2006년 수위-유량관계곡선은 고수위에서 유량을 과대 추정하고 있음을 알 수 있다. 과대 추정의 정도를 살펴볼 때, 수위(H)가 2.76 m일 때까지 거의 동일한 값을 나타내지만 수위가 4.36 m일 때 약 140%, 수위가 5.26 m일 때 약 160%로 수위가 높아질수록 그 정도가 증가하고 있어 상류단 경계조건으로서 활용성이 부족한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 상류단 경계조건으로 고수위 자료에 대하여 향석 지점 실측성과로부터 보완한 회귀분석 결과를 사용하였다.

모형 보정 및 검증을 위한 경계조건은 Fig. 5와 같고, 향석 지점의 수위비교 결과는 Fig. 6과 같다. 비교결과, 향석 지점의 실측 수위와 계산 수위의 침투 도달시간 및 크기가 잘 일치하여 본 연구에서 사용한 상류단 경계조건의 적용성을 확인하였고, 부정류 모형의 보정 및 검증 결과는 각각 평균제곱근오차가 7 cm, 4 cm로 나타나 조도계수가 잘 추정되었음을 알 수 있다.

부정류 해석 및 2011년 6월 부정류 해석으로 추정된 유량별 조도계수 및 에너지경사의 변화를 Fig. 7에 함께 나

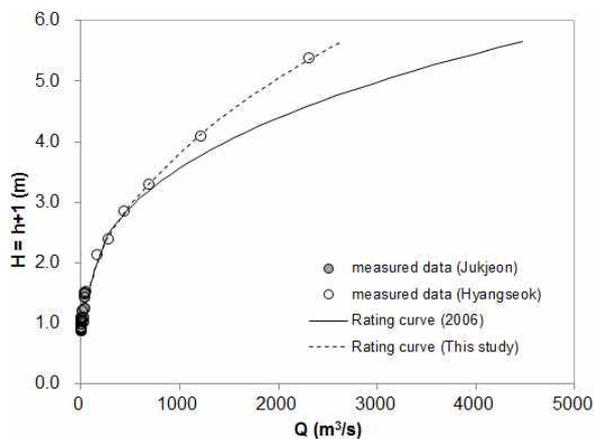


Fig. 4. Stage-Discharge Relationship at the Jukjeon Station

타내었다. 비교결과, 유량이 500 m³/s를 넘는 경우, 부정류 및 부정류 해석에 의한 조도계수와 에너지경사가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으나, 이보다 작은 유량 규모에

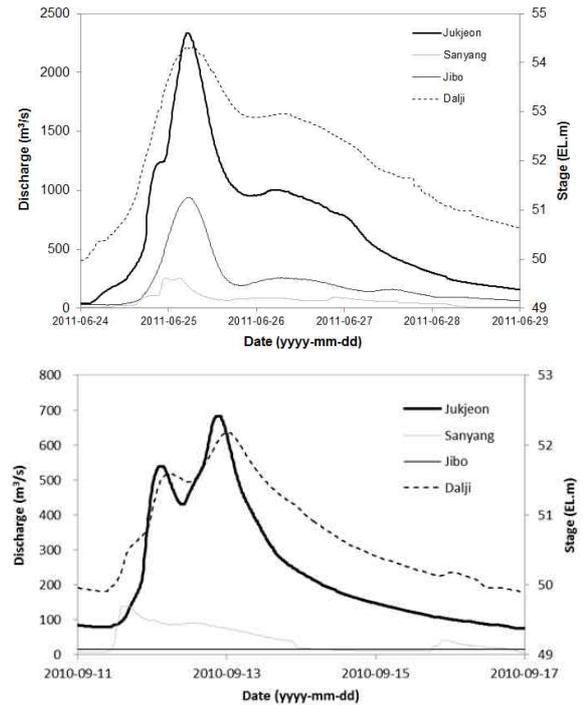


Fig. 5. Boundary Conditions for Unsteady Analysis

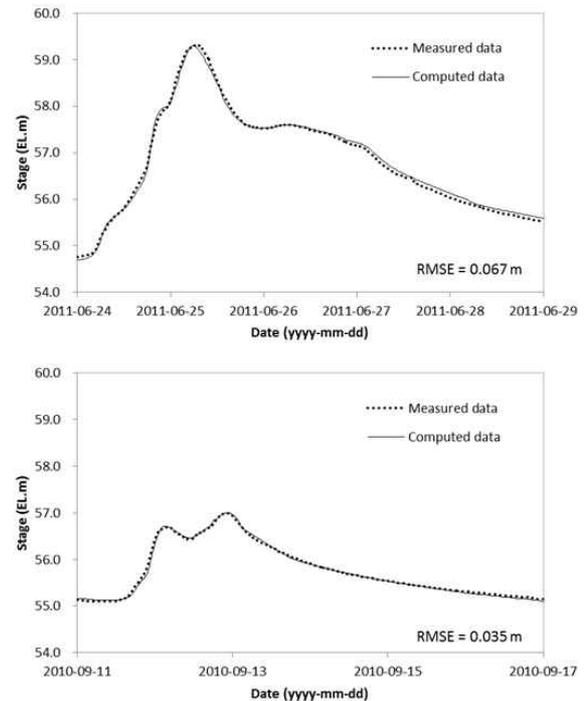
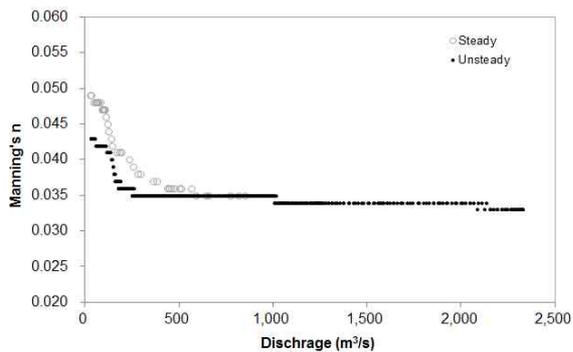


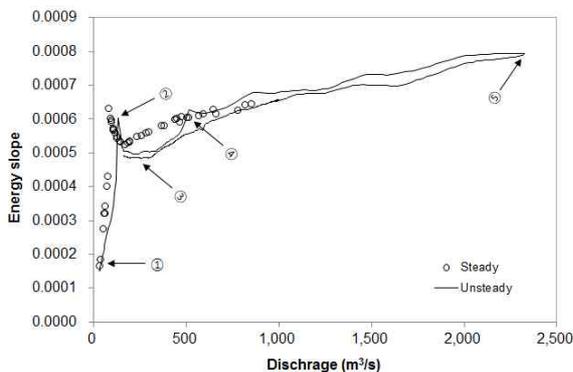
Fig. 6. Model Calibration and Verification Results at the Hyangseok Station

서는 부정류 해석에 의한 조도계수 추정 결과가 부정류 해석에 의한 결과보다 낮게 산정되었다. 즉 대상구간에서 향석 지점의 유량이 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하인 경우는 대상구간의 정상상태 유무가 조도계수 추정에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

수치해석으로 추정된 구간 조도계수는 해당 하천구간에서 발생할 수 있는 모든 저항요인, 즉 하상재료, 하도의 불규칙성, 식생, 만곡 등에 의한 저항을 모두 포함한 값이다. Fig. 7(b)의 부정류 해석에 의한 에너지 선의 변화를 순차적으로 살펴보면 Fig. 8과 같다. 홍수발생 초기 상태 ①의 경우, 향석 하류부는 에너지 손실이 중방향 최심화 상고의 불규칙성에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 상류부는 만곡부 저수로 하폭 감소에 따른 에너지 경사의 상승이 나타나는 것을 알 수 있다. 향석 상류 및 하류의 이러한 흐름저항 특성은 ② 시점까지 계속되다가, ③ 시점에서는 향석 하류부의 지형적 저항 요인이 상당부분 잠식되고 있음을 알 수 있으며, ④ 시점에 이르러 향석 상류 만곡부 또한 저수로를 완전히 율류하여 전 구간에서 지형적 저항요인에 의한 국부적인 에너지 손실이 거의 사라짐을 확인할 수 있다. 따라서 ④ 시점의 향석 유량 500



(a) Manning's n by flow



(b) Energy slope by flow

Fig. 7. Variation of Calculated Manning's n and Energy Slope by Flow Discharge

m^3/s 이상에서의 조도계수는 모든 구간에서 동등하게 발생 가능한 하상재료 및 하상형태에 의한 흐름저항이 지배적일 것으로 판단된다. 그러나 이러한 결과는 향석지점의 수위를 재현하기 위하여 구간 조도계수를 조정함으로써 보정된 모형의 수치해석 결과이므로 향후 각 유량조건에서 다수의 지점에서 측정된 수위 및 유량 자료를 활용하여 검증할 필요가 있다.

4. 사립자 및 하상형태를 고려한 흐름저항

유량에 따라 변화되는 흐름저항의 주요 지배요소를 세부적으로 검토하기 위하여 하상재료에 의한 저항과 하상형태에 의한 저항을 각각 분석하였다. 기존의 경험식을 적용하여 유량 크기 및 시간에 따른 수리조건 변화에 대한 하상형태 변화를 추정하였으며, 이를 사립자에 의한 조도계수와 함께 고려함으로써 내성천 향석 지점에서의 흐름저항 분석을 수행하였다. 이로써 수치모형에 의한 조도계수 추정 방법이 이동상 하천의 특성을 고려하지 못한 채 고정된 하천단면을 사용하는 한계가 있음에도 불구하고, 이동상 하천에서 적용할 수 있는지를 간접적으로 확인할 수 있다.

4.1 사립조도에 의한 흐름저항

이동하상에서 흐름 저항은 사립자의 크기에 직접 관련이 있는 사립조도(grain roughness)에 의한 저항과 하상형태와 그 변화에 의한 형상조도(form roughness)에 의한 저항으로 구분할 수 있다(Yang, 2003). 따라서 총적 하천의 총 조도(total roughness)를 Manning 조도계수로 표현한다면, 이 값은 두 저항요인이 복합되어 산정된 것이다.

사립조도에 의한 Manning의 n 값을 산정하는 방법은 주로 유사 입경의 함수로 정의한 경험공식들을 사용할 수 있다. Strickler (1923)는 Manning의 n 을 하상토 입도 크기의 함수로 Eq. (1)과 같이 나타내었으며 이는 균일사로 포설

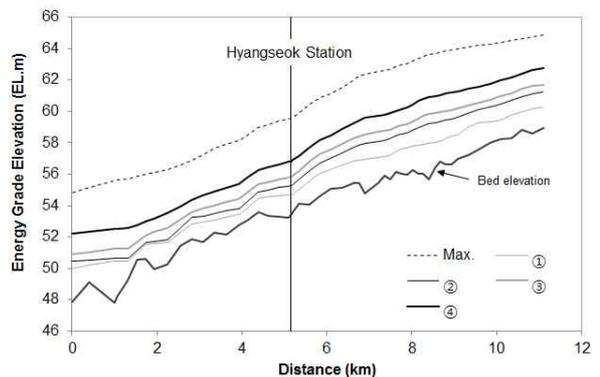


Fig. 8. Profiles of Energy Grade Elevation

된 작은 실험실 인공수로에서 도출된 것이므로 혼합사로 이루어진 자연하천에 적용할 수 없다. 따라서 Meyer-Peter and Müller (1948)는 Strickler (1923)의 공식을 Eq. (2)와 같이 변형시켰으며 장갑화 되지 않은 하상에서의 Manning 조도계수를 근사적으로 계산하는데 활용할 수 있다. Lane and Carlson (1953)은 자갈하상인 San Luis Valley 하도에 대해서 유사한 유형의 공식을 제안한 바 있으며 Manning 조도계수 값이 혼합사의 75% 통과입径의 1/6에 비례하는 것으로 나타났다(Yang, 2003).

$$n = \frac{d^{1/6}}{21.1} \quad (1)$$

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (2)$$

여기서, d 는 균일사의 입경(m)을 나타내며 d_{90} 은 혼합사의 90% 통과입径(m)을 나타낸다.

내성천의 경우는 하상이 모래로 이루어진 장갑화되지 않은 하천이므로 Meyer-Peter and Müller (1948)의 공식을 적용하여 사립조도에 의한 Manning 조도계수를 계산하였으며 그 결과 사립조도에 의한 Manning 조도계수는 0.014인 것으로 나타났다.

흐름 저항은 일반적으로 Chezy 계수 C , Manning 조도 계수 n , 또는 Darcy-Weisbach 마찰계수 f 로 나타낼 수 있으며 상관관계는 Eq. (3)과 같다. 흐름 저항 계수는 평균유속(연직유속분포로부터 산정)과 마찰속도(u_*) 비의 향으로 표현될 수 있기 때문에 흐름 저항은 또한 유속분포와 직접적인 연관이 있다(Chien and Wan, 1999). 즉, 수리학적으로 거친 하상(hydraulically rough boundary)에 대해서는 사립조도 또는 표면마찰로 인한 저항을 다음과 같이 로그 유속공식으로 표현할 수 있다(Einstein, 1950).

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}} \frac{1}{n} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{12.2R}{k'_s} \right) \quad (3)$$

여기서, u_* 는 마찰속도($u_* = \sqrt{ghS_f}$), V 는 평균유속, k'_s 은 등가입자조도($k'_s \approx 6.8d_{50}$, $k'_s \approx 3d_{90}$), R 은 동수반경을 나타낸다. Eq. (3)의 로그 유속공식은 다양한 범위의 h/d_s 에 대해 적용 가능하며 Julien (2002)은 수리학적으로 거친 단면의 하천 자료를 활용하여 Eq. (3)을 Eq. (4)와 같이 근사화하였다.

$$\frac{V}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{2h}{d_s} \right) \quad (4)$$

여기서, d_s 는 하상입자의 크기이며 일반적으로 d_{50} 을 의

미한다.

Fig. 9는 Julien이 현장자료를 이용하여 근사화한 로그 유속공식(Eq. (4))과 Manning-Strickler 공식 그리고 내성천 향식 지점에서의 현장 관측 수리자료(Table 1)를 함께 나타낸 것이다. Julien (2002)은 산지하천과 같이 수심에 비해 입자크기가 매우 큰 구간($h/d_s < 10$)에서는 Manning-Strickler 공식이 실제 하천자료와 차이가 있음을 제시하였고 일반적인 하천수리 조건($100 < h/d_s < 10,000$)에서는 Manning-Strickler 공식이 하천에서 측정된 자료들과 비교적 잘 일치하고 있다고 평가하여 실무적으로 사립조도 추정에 대한 Manning-Strickler 공식의 적용성을 확인하였다. 내성천 향식 지점의 경우, 수심과 하상도 입도 크기의 비(h/d_s)가 대략 500과 3,000 사이에 분포하고 있어 Manning-Strickler 공식을 이용하여 사립조도에 의한 흐름저항 계수를 추정하였다. 현장관측 수리자료 및 하상도 중앙입경(0.001 m) 자료를 활용하여 추정한 Manning의 n 은 0.020 ($n = 0.064 \times 0.001^{1/6}$)로 산정되었으며, Meyer-Peter and Müller (1948)의 공식(Eq. (2))에 의한 사립조도 Manning의 n 값 0.014보다는 조금 크게 산정되었다.

이러한 사립조도의 경우 모래하천에서는 하상형태의 발생 및 변화로 인해 Manning의 n 값이 0.05까지 증가되기도 한다(Julien, 2002). 따라서 내성천의 경우도 사립자 저항을 고려하여 산정한 흐름저항과 함께 하상형태를 예측하여 흐름저항의 변화를 분석할 필요가 있다.

4.2. 하상형태 예측

다양한 흐름과 유사 이송 조건에서의 흐름 저항의 변화를 이해하기 위해서는 하상형태에 대한 이해가 필요하다(Yang, 2003). 일반적으로 하상형태는 흐름영역(flow regime)이 저수류 영역(lower flow regime)인지 고수류 영역(upper flow regime)인지에 따라 구분된다. 저수류 영역에서는 사련(ripple)과 사구(dunes), 그리고 천이구간에서는 사구

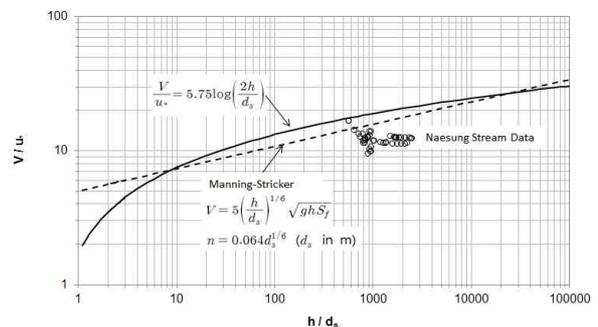


Fig. 9. Comparison of Grain Resistance and Velocity Formulations

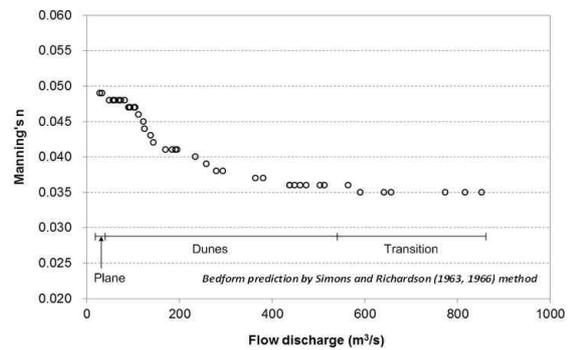
부터 평탄하상(plane bed) 또는 반사구(antidune)까지의 하상형태가 발생하고 고수류 영역에서는 유사이송이 있는 평탄하상, 반사구, 쇠반사구(antidune breaking wave), 중복과, 슈트와 풀(chutes and pools)로 구분된다. 흐름저항과 유사 이송에 대한 하상형태의 강한 상관관계 때문에 하상형태의 형상과 차원을 예측하려는 여러 경험적 또는 준경험적 해석 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 내성천의 향석 지점에 대해 유량조사사업단에서 2010년과 2011년에 유사량 조사를 위해 측정된 수리특성(Table 2) 조건을 적용하여 향석 지점의 하상형태를 고수류 영역과 저수류 영역의 모든 하상형태를 예측할 수 있는 Simons and Richardson (1963, 1966) 방법을 이용하여 예측하였다. Simons and Richardson (1963, 1966)의 하상형태 예측 그래프(Julien, 1998)에서 내성천의 향석 하상도 중앙입경(1 mm)에 해당하는 하상형태 변화는 수류력(stream power, $\tau_0 V = \gamma q S_f [lb/ft.s]$)의 범위에 따라 수류력이 0.041보다 작을 경우 저수류 영역의 평탄하상, 0.041보다 크고 1보다 작을 경우 사구, 1보다 크고 2.6보다 작을 경우 천이영역, 2.6보다 큰 경우 반사구와 고수류 영역의 평탄하상으로 구분된다. 그 결과 Fig. 10(a)와 같이 유량 크기에 따른 각각의 하상형태가 예측되었으며 이를 수치모의 상의 Manning 조도계수 검정 값과 비교하였다. 유량이 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 미만인 경우 향석 지점에서의 하상형태는 평탄하상인 것으로 나타났고, $40\text{ m}^3/\text{s}$ 이상 $550\text{ m}^3/\text{s}$ 미만인 경우 하상형태는 사구의 형태인 것으로 예측되었으며, $550\text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 유량조건에서는 천이구간의 하상형태가 예측되었다. 이 결과는 부등류 해석에 의한 에너지경사를 입력자료로 활용하여 하상형태를 예측하였으므로 하상형태를 구분하는 경계 유량조건이 일부 조정될 수 있음을 주의하여야 한다. 따라서 부정류 흐름 조건에서도 동일한 방법을 적용하여 하상형태의 변화를 추정하였으며, $1,000\text{ m}^3/\text{s}$ 이하의 유량조건에서는 부등류 해석에 의한 하상형태 구분과 크게 다르지 않음을 확인하였고 그 결과는 Fig.

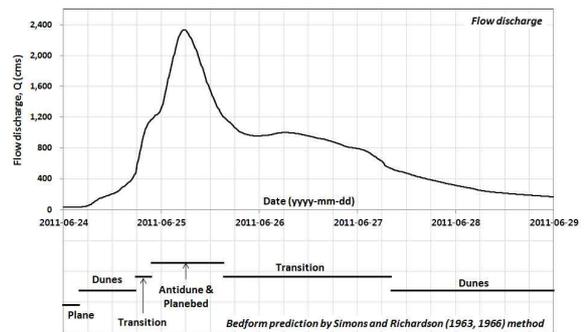
10(b)와 같다. 한편 $1,000\text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 유량조건에서는 고수류 영역의 하상형태인 반사구와 평탄하상이 발생하는 것으로 예측되었다.

4.3. 사립조도 및 하상형태에 의한 흐름저항 분석

유량 및 수리조건 변화에 따른 하상형태에 의한 흐름저항 조도계수의 범위는 Simons and Richardson (1971)에 의해 제시되었으며 추후 Julien (1998), Woo (2001), Yang (2003) 등의 문헌에서 정리된 바 있다. 본 논문에서는 Julien (1998) 문헌에 정리된 하상형태별 일반적인 조도계수 값 범위를 참고하여 Table 3(4번째 열)에 향석 지점의



(a) Steady flow condition



(b) Unsteady flow condition

Fig. 10. Bedform Prediction for Steady and Unsteady Flow Conditions

Table 3. Comparison of Manning's n at the Hyangseok Station in Naesung Stream

Unsteady Flow range (m^3/s)	Manning's n by unsteady modeling	Bedform prediction by Simons and Richardson (1963, 1966)	Manning's n by bedform (Julien, 1998)	Manning's n by grains
< 500	0.043 or 0.035~0.043	Plane bed or Dunes	0.014 or 0.020~0.040	Meyer-Peter and Müller (1948): $n=0.014$
500~1,000	0.034~0.035	Transition	0.014~0.025	Manning-Stricker: $n=0.020$
1,000~2,300	0.033~0.034	Antidunes & Plane bed (Upper flow regime)	0.010~0.020	

유량 범위에 따른 하상형태별 조도계수 값을 나타내었다. 그 결과, 하상형태가 저수류 영역의 평탄하상의 경우 0.014, 500 m³/s 이하의 유량에서 발생하는 사구의 하상형태에서는 Manning의 *n* 값이 0.020에서 0.040의 범위를 갖는다. 또한 천이구간의 흐름영역에서는 0.014에서 0.025, 고수류 영역인 반사구 및 평탄하상의 경우는 0.010에서 0.020의 조도계수를 나타낸다.

4.1절에서 계산된 사립조도에 의한 흐름저항 조도계수 (0.014 or 0.02)는 Table 3의 마지막 5번째 열에 정리하였으며 이 값을 하상형태에 의한 흐름저항 조도계수 범위와 함께 고려하여 전체 조도계수 값을 추정하였다. 사립조도 및 하상형상 조도를 모두 고려한 전체 조도계수 값을 앞서 부정류 수치모의에 의해 추정된 조도계수(Table 3의 두 번째 열)와 비교하면 평탄하상(Plane bed) 발생 유량 범위에서는 수치모의에 의해 추정된 조도계수 값이 사립조도 및 하상형상 조도를 모두 고려한 전체 조도계수 값보다 크게 산정되는 것으로 나타났고, 사구(Dune) 발생 이상의 유량 범위에서는 수치모의로 추정된 조도계수가 사립조도 및 하상형상 조도를 모두 고려한 값의 범위에 속하는 것으로 평가되었다. 일반적으로 비교적 짧은 구간에서는 평탄하상에서 사구가 발생할 경우 하상형상 조도가 증가하는 경향을 나타내게 된다(Table 3의 4번째 열). 그러나 본 연구에서 수치모형으로 추정된 구간 조도계수는 이와 같은 특성을 재현할 수 없었으며, 이는 Fig. 8에서 검토한 바와 같이 500 m³/s 이하의 유량 규모에서 수치모형으로 추정한 상대적으로 긴 구간 조도계수에 사립조도 및 하상형태뿐만 아니라 하천에서 발생할 수 있는 다른 저항요인 즉, 하도의 불규칙성, 식생, 만곡도 등이 반영된 것으로 판단된다. 한편 사구에서 천이영역 및 고수류 영역에서의 하상형태로 변화될 경우 하상형상 조도가 감소하는 일반적인 현상은 수치모의에 의한 조도계수 추정결과에서도 잘 나타났고, 조도계수 값 또한 사립조도와 하상형상 조도를 모두 고려한 흐름저항 계수 범위에 포함되는 것으로 나타나 수치모형으로 추정된 구간 조도계수의 물리적 의미를 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 내성천 향석 지점에서 실측된 수문자료 및 홍수사상의 실측자료를 활용하여 모형을 검보정함으로써 조도계수 값을 추정하였으며, 시간에 따른 유량변화를 고려하여 흐름저항의 변화를 분석하였다. 이동하상에서 흐름 저항은 사립조도에 의한 저항과 하상형태와 그

변화에 의한 형상조도에 의한 저항으로 구분할 수 있다는 전제하에 수치모형으로 추정된 조도계수 값을 사립조도 및 하상형태를 고려하여 계산된 조도계수 값과 비교하였으며 그 결론을 정리하면 다음과 같다.

부등류 해석으로 계산된 수위와 측정된 수위가 일치하도록 조도계수를 추정하여, 향석 지점에서 측정된 수위와 계산된 수위의 평균제곱근오차 4 cm가 되도록 모형을 보정하였다. 보정된 모형을 기초로 부정류 모형의 보정을 수행하였고, 2011년 사상으로 보정된 모형은 2010년 사상으로 검증되었다. 부등류 해석과 부정류 해석으로 추정된 조도계수의 변화를 분석한 결과, 유량이 500 m³/s를 넘는 경우, 부등류 및 부정류 해석에 의한 조도계수와 에너지 경사가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으나, 이보다 작은 유량 규모에서는 부정류 해석에 의한 조도계수 값이 부등류 해석에 의한 조도계수 값보다 적은 것으로 나타났다. 내성천의 경우 유량이 500 m³/s 이하인 경우는 분석하고자 하는 구간의 흐름상태가 정상상태인지 확인하는 것이 조도계수 추정에 중요한 변수임을 알 수 있다. 부정류 해석에 의한 흐름특성 분석에 의하면 유량이 증가함에 따라 흐름저항에 미치는 인자의 변화가 발생하는 것으로 나타났으며 특히 향석 유량이 500 m³/s에 이르면 향석 상류 만곡부 또한 저수류를 완전히 월류하여 전 구간에서 지형적 저항요인에 의한 국부적인 에너지 손실이 거의 사라짐을 확인하였다.

수치모형을 이용한 흐름 해석을 통해 도출된 수리조건을 적용하여 내성천 향석 지점의 하상형태를 분석한 결과, 500 m³/s를 전 후로 하상형태가 저수류 영역의 평탄하상 및 사구에서 천이영역으로 바뀌는 것으로 나타났으며 1,000 m³/s 이상의 유량에서는 고수류 영역의 반사구 및 평탄하상 형상이 발생하는 것으로 예측되었다. 부정류 수치모의에 의해 산정된 조도계수 값과 사립조도 및 하상형태에 의한 흐름저항 계수를 합한 값의 범위를 비교함으로써, 저수류 영역의 평탄하상이 발생하는 저유량 범위에서는 수치모의에 의한 조도계수 값이 사립조도 및 하상형태에 의한 조도계수 값보다 크게 산정되는 것을 확인하였다. 또한 사구 발생구간인 500 m³/s 이하에서 조도계수 변화 폭이 큰 것으로 나타나 평탄하상 및 사구 발생 유량 구간에서는 흐름저항에 미치는 주된 저항인자에 사립조도 및 하상형태 외에 하천의 사행도, 식생, 사주 등의 다양한 요인들이 내포되어 있을 것으로 판단된다. 천이영역 및 고수류 영역에서의 하상형태 변화 양상과 부정류 흐름모의에 의한 조도계수 값의 변화는 일반적인 저항특성의 변화를 잘 나타내었으며, 특히 부정류 수치모의에 의한 조

도계수 값은 사립조도 및 하상형태를 고려한 흐름저항 계수 값을 합한 범위에 포함되는 것으로 나타나 이때의 흐름저항에 영향을 미치는 주된 인자는 사립조도 및 하상형태인 것으로 추정되며, 따라서 잘 보정된 수치모형으로 추정된 조도계수가 물리적 의미를 충분히 포함하고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 ‘(13주요-산업) 구조물로 인한 하천 지형 및 식생 변화 분석’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Alam, A.M., and Kennedy, J.F. (1969). "Friction factors for flow in sand-bed channels." *Journal of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 95, No. 6, pp. 1973-1992.
- Bae, J.S., Shin, C.H., Lee, J-K., and Yoon, S.B. (2012). "Analysis of Effect of Roughness Coefficient on Numerical Simulation for Stream Flow." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 151-158.
- Chien, N., and Wan, Z. (1999). *Mechanics of Sediment Transport*, ASCE Press, Reston, Virginia, U.S.
- Einstein, H.A. (1950). "The bed load function for sediment transportation in open channel flows." Technical Bulletin no. 1026, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., U.S.
- Einstein, H.A., and Barbarossa, N.L. (1952). "River channel roughness." *Trans. ASCE*, Vol. 117, pp. 1121-1132.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport. Thechnisk Forlag, Copenhagen, Demark.
- Griffiths, G.A. (1989). "Form resistance in gravel channels with mobile beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 340-355.
- Ji, U., Julien, P.Y., Park, S., and Kim, B. (2008). "Numerical Modeling for Sedimentation Characteristics of the Lower Naksong River and Sediment Dredging Effects at the Nakdong River Estuary Barrage." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4, pp. 405-411.
- Julien, P.Y. (1998). *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Julien, P.Y. (2002). *River Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Karim, F. (1995). "Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp. 15-25.
- Kim, J., Kim, H., and Lee, J-K. (2011). "Review of Roughness Coefficient Characteristics for Rivers in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 9, pp. 695-710.
- Kim, J-S., Lee, C.J., and Kim, W. (2007a). "Calculation of Roughness Coefficient in Gravel-bed River with Observed Water Levels." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 10, pp. 755-768.
- Kim, J-S., Lee, C.J., and Kim, W. (2007b). "Uncertainty Analysis in Estimation of Roughness Coefficient using the Field Measurement Data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 10, pp. 801-810.
- Kim, S.H., and Kim, J-S. (2013). "Effect of Chungju Dam Operation for Flood control in the Upper Han River." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 537-548.
- Kim, W., Kim, Y.S., and Woo, H.S. (1995). "Estimation of Channel Roughness Coefficients in the Han River Using Unsteady Flow Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 28, No. 6, pp. 133-146.
- Korea Institute of Construction Technology (2013). *Analysis of Change in River Morphology and Vegetation Due to Artificial Structures-Year 2012*, Report of Korea Institute of Construction Technology, Korea (in Korean)
- Lane, E.W., and Carlson, E.J. (1953). "Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials." *Proceedings, Minnesota International Hydraulic Convention*.
- Lee, C.J., Kim, W., and Kim, J.S. (2007). "An investigation on methods for estimation of roughness coefficient in domestic rivers." 2007 *Proceedings, Korea Water Resources Association*, pp. 966-970.
- Li, C.H., and Liu, J.M. (1963). *Resistance of alluvial rivers*, Report of Nanjing Hydraulic Research Institute,

- China (in Chinese).
- Ministry of Land, Transport and Maritime. (2011). Hydrological Survey Report-Year 2010, Report of Hydrological Survey Center., Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime. (2012). Hydrological Survey Report-Year 2011, Report of Hydrological Survey Center., Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2013). Basic River Plan for the Naesungcheon Watershed-Downstream (Modified) (in Korean).
- Meyer-Peter, P.E., and Müller, R. (1948). "Formulas for bed load transport." Proceedings of the 3rd International Association for Hydraulic Research, Stockholm, pp. 39-64.
- Richardson, E.V., and Simons, D.B. (1967). "Resistance to flow in sand channels." *Proceedings, 12th Congr. of IAHR*, Vol. 1, pp. 141-150.
- Simons, D.B., and Richardson, E.V. (1963). "Form of bed roughness in alluvial channels." *Trans. ASCE*, Vol. 128, pp. 284-323.
- Simons, D.B., and Richardson, E.V. (1966). Resistance to flow in alluvial channels, Professional paper 422-J, Washington, D.C., U.S. Geological Survey.
- Simons, D.B., and Richardson, E.V. (1971). "Flow in alluvial channels." *River Mechanics*, Vol. 1, ed. Shen, H. W., Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, U.S.
- Strickler, A. (1923). "Beiträzozur Frage der Gerschwindigkeits formel und der Rauigkeitszahlen für Strome Kanale und Geschlossene Leitungen." *Mitteilungen des Eidgenossischer Amtes für Wasserwirtschaft*, Bern.
- USACE (2010). HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 4.1, Hydrologic Engineering Center, David, CA.
- Vidal, J.-P., Moisan, S., Faure, J.-B., and Dartus, D. (2007). "River model calibration, from guidelines to operational support tools." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22, pp. 1628-1640.
- Woo, H. S. (2001). *River Hydraulics*, Cheong Moon Gak Publisher, Korea.
- Wu, W., and Wang, S. (1999). "Movable bed roughness in alluvial rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 12, pp. 1309-1312.
- Yang, C.T. (2003). *Sediment Transport: Theory and Practice*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, U.S.
- Yen, B.C. (2002). "Open Channel Flow Resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 1, pp. 20-39.

논문번호: 13-058	접수: 2013.07.05
수정일자: 2013.09.26/10.18/ 10.21/11.04	심사완료: 2013.11.04