

실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정

Calculation of Roughness Coefficient in Gravel-bed River with Observed Water Levels

김 지 성* / 이 찬 주** / 김 원***

Kim, Ji Sung / Lee, Chan Joo / Kim, Won

Abstract

The purpose of this study is to analyse the characteristics of Manning's roughness coefficient according to change of discharge by using observed data obtained from a stable gravel-bed river and to investigate the applicability of the relevant existing empirical methods to it. Observed water level and discharge data are used as input data for the USGS computer program NCALC model for calculation of the roughness coefficient. Calculated values are compared with roughness values which are estimated with four widely used methods. The results show that though the empirical methods are able to give similar roughness values only for flood flow, they seem to have rather high uncertainty because of necessity of subjective judgement and differences of resultant values. Roughness coefficients for normal-low flow cannot be estimated from the existing empirical formulae. Especially, using the Manning equation for calculating them should be careful as this provides a wide range of estimated values in normal-low flow. The relations between the roughness coefficient and characteristic size of bed materials are different from them in flood flow even though they have a close relations.

keywords : roughness coefficient, gravel bed river, field data, relative roughness

요 지

본 연구는 자갈하천에서 실측한 자료를 사용하여 유량 변화에 따른 조도계수의 변화를 분석하고, 기존 조도계수 경험식의 적용성을 검토하는 것이 목적이다. 실측자료를 이용한 조도계수의 산정을 위하여 미 지질조사국의 NCALC 모형을 이용하여 대상구간의 조도계수를 산정하였고, 산정된 결과를 4가지 경험적인 방법에 의해 산정된 조도계수와 비교하였다. 분석결과 기존의 경험적 방법들은 홍수기에 국한하여 근사적인 해를 제공할 수 있으나 판단의 주관성, 방법에 따른 결과의 차이 등으로 인하여 산정결과의 불확실도가 높을 것으로 판단되었다. 평저수기의 조도계수는 기존 경험적 방법으로 산정이 어려울 것으로 나타났으며, 특히 Manning 공식을 이용하여 조도계수를 산정하는 경우, 상한치와 하한치의 범위가 크므로 사용 시 주의가 필요함을 알 수 있었다. 그리고 평저수기에도 조도계수와 하상입

* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 박사후연구원

Post-Doc., River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea
(e-mail: jisungk@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원

Researcher, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

*** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원

Principal Research Fellow, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

도가 상관성이 있는 것으로 확인되었으나 홍수기의 상관성과 다르게 나타남을 확인하였다.

핵심용어 : 조도계수, 자갈하천, 현장자료, 상대조도

1. 서 론

하천 흐름을 지배하는 중요한 물리적 요소는 관성력, 압력차, 중력, 마찰력 등으로 구분할 수 있으며, 이러한 요소들은 하도의 종횡단 형상과 하상의 조도계수에 직접적인 영향을 받는다. 고정상 하천에서 하도의 종횡단 형상은 확정적으로 결정될 수 있지만 하상 조도계수의 산정은 매우 어려운 작업이다. 이는 조도계수가 하도재료 및 하상표면의 특성에 의한 영향, 단면의 횡단면 형상 및 종방향 단면의 형상변화에 의한 영향, 하천구조물 및 유송잡물에 의한 영향, 식생에 의한 영향 등 하천에서 발생할 수 있는 대부분의 흐름저항을 반영하는 척도이기 때문이다.

조도계수는 하천수위와 유속계산 등 흐름해석에 큰 영향을 미치므로 정확한 조도계수의 산정은 홍수위 산정, 하천 시설물의 설계, 호안의 안정성 평가 등을 수행함에 있어 매우 중요하다. 우리나라 하천법에서는 하천정비기본계획의 수립 시에 치수 목적을 위해 빈도별 홍수위를 계산하여 제방 축조 등에 활용하도록 되어 있으며, 이를 위해 조도계수의 산정은 필수적이다. 한편, 최근에는 하천의 환경적 기능이 부각되면서 수생 생물의 서식 환경에 영향을 미치는 저수시의 수위, 유속의 산정, 훼손된 습지의 복원 및 습지조성을 위한 적절한 수리학적 설계 등이 필요한 실정이다. 따라서 저갈수시의 조도계수 산정도 홍수 시 조도계수 산정에 못지않게 매우 중요하다.

최근 국내에서는 조도계수를 보다 객관적으로 산정하기 위하여 하도 특성에 따라 구간을 분리하고 부정류모형을 적용함으로써 실측수위와 계산수위의 차가 최소가 되는 최적 조도계수 산정에 관한 연구가 수행되었다(김원 등, 1995; 황의준, 전경수, 1997; 이정규, 이창현, 2004). 이러한 연구들은 조도계수를 다양한 유량규모에 따라 산정함으로써 연구결과의 활용성을 증가시켰다. 다만 수위 실측자료가 많은 한강하류부에 국한되어 수행되었고 실측수위자료가 없는 하천에서의 적용은 불가능한 한계를 가진다. 이신재와 박상우(2006)는 실측수위가 없는 자갈하천에서 조도계수 산정에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구는 하천 흐름저항이 하상재료의 특정 입도에 의한 영향으로 간주한 기존 연구 결과로부터 벗어나 등가조도(k_s)를 산정하는 방법을 제안하였으며,

정상등류 모형을 이용하여 반복해법으로 수위를 산정하였다. 산정된 수위를 사용하여 기존 연구와 동일하게 부정류모형을 이용하여 조도계수를 역산함으로써 유량 규모에 따른 조도계수를 산정하였다. 이들 연구결과로부터 조도계수는 유량 또는 수심이 증가함에 따라 장애물의 잠김, 사행의 소멸 등으로 감소하는 일반적인 경향을 보이며, 홍수시의 조도계수와 저갈수 시의 조도계수는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 하지만 기존 하천정비기본계획에서 제공하고 있는 조도계수 값은 홍수위 산정에 초점이 맞추어져 있을 뿐만 아니라, 유량이나 수심에 따른 조도계수의 변화가 거의 고려되지 않는 관계로 저수시의 적용이 곤란하다.

Azmon(1992)은 Soreq 강에서 10년간 수집된 홍수기 자료를 사용하여 4가지 방법으로 Manning 조도계수를 산정하고 결과를 비교하였다. 비교 결과 특정단면에서 산정된 조도계수와 구간에서 산정된 조도계수는 차이가 있음을 보였고, Limerinos(1970) 형태의 조도계수 산정식의 적용성을 검증하였다.

Afzalimehr and Anctil(1998)은 280개 자갈하천의 특성자료를 이용하여 기존의 멱함수 및 반대수함수의 마찰계수 산정결과와 실측자료로부터 마찰속도($U_* = \sqrt{ghS}$)를 산정한 후 마찰속도와 실측된 평균유속의 비로 계산된 마찰계수($f = 8(U_*/U)^2$)를 비교하였고, 비교 결과 기존 식들에 의한 산정결과가 상이하며 하천 흐름저항을 정확히 예측하지 못하는 것을 확인하였다. 그들은 수심과 하상재료의 직경비인 상대조도(hd^{-1}), Froude 수($U(gh)^{-1/2}$), 유사관련매개변수(τ_s/τ_c), 단면형상인자($\sqrt{pw^{-1}}$)와 같이 무차원화된 변수들을 사용하여 비선형 회귀분석 결과를 제시하였으며, 대수함수 형태의 유속수직분포에 단면형상요소가 고려되어야 할 필요성과 조정매개변수로 Froude 수와 유사매개변수가 필요함을 확인하였다.

Wohl(1998)은 5개 강의 과거 홍수흔적으로부터 4가지 방법으로 조도계수를 산정하여 홍수량을 계산하였다. 그의 연구결과에 의하면 조도계수는 완만한 경사의 하천에서 작은 조도계수가 계산되는 경우, 방법에 따라 조도계수 산정결과의 차이가 크지만 계산된 홍수량에는 큰 차이를 보이지 않으며, 반대로 큰 조도계수가 계산될 수 있는 급경사 소하천의 경우 조도계수의 변화에 따른 홍수량 계산결과가 큰 차이를 보이지만 방법에 따

른 조도계수 산정결과는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 그는 과거 극한홍수의 흔적을 이용하여 극한 홍수량을 역산하는 과정에서 조도계수의 불확실도로 인한 홍수량 산정의 불확실도는 그다지 민감하지 않은 것으로 결론지었으나 홍수량이 큰 대규모하천에 비하여 수면폭과 수심의 비가 작은 급경사 소하천에서 조도계수의 민감도가 크게 나타남은 조도계수 산정방법에 특별한 주의가 요구됨을 알 수 있다.

본 연구의 목적은 자갈하천에서 실측자료를 이용하여 하천 조도계수를 직접 산정하고 국내외의 하천 조도계수 산정방법의 적용성을 검토하는 것이다. 본 연구를 위하여 지방2급 하천인 달천 일부구간에서 2005년 7월과 2006년 7월 평수시와 홍수시의 연속적인 실측유량, 6개 지점의 실측수위를 사용하여 유량규모에 따른 조도계수를 산정하였다. 그리고 실측 수위자료가 없는 경우 사용되는 국내외의 다양한 조도계수 산정방법을 이용하여 대상하천의 조도계수를 산정한 후 직접 산정된 조도계수와 비교하고 분석함으로써 조도계수 산정에 있어 유의할 점과 적절한 조도계수의 산정방법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 대상 하천 현황

본 연구에서는 남한강 제1지류 달천의 일부구간을 대상구간으로 하였다. 대상구간은 Fig. 1과 같이 충북 괴산군 칠성면 외사리에 소재한 괴산댐으로부터 3.3 km 하류의 쌍천과 합류하는 구간이다. 괴산댐의 유역면적은 675.2 km²로 대상구간의 계획홍수량은 1,750 m³/s이며, 시험하천의 하상재료는 주로 호박돌이고 하상경사는 1/650 정도로서 일반적인 자갈하천의 양상을 보이고 있다. 그리고 상류의 괴산댐에서는 홍수 시 최대 1,000 m³/s 정도의 댐 방류가 행해지고 상류의 강우에 의한 유입 상황에 따라 다양한 규모의 유량이 방류되며 평저수시에도 5~20 m³/s 정도의 발전방류로 인하여 다양한 규모의 유량자료 취득이 용이하다. 대상구간에는 Fig. 2와 같이 총 8종 18대의 수위계가 설치되어 있으며 댐 방류량과 수위 실측자료로부터 다양한 유량 규모에서 조도계수의 산정이 가능하다. 본 연구에서는 2005년 7월, 2006년 7월에 결측없이 가용한 연속적인 수위자료를 취득할 수 있었으며, 하천의 사행과 지류 유입의 영향을 배제할 수 있는 1번~5번 지점 수위, 수전교 수위를 사용하였다.

고정상 하천의 조도계수는 하상재료의 입도와 밀접한 관계가 있다. 따라서 대상구간에서 하상재료의 입도 분포를 조사하였다. 전체 구간에서 Fig. 3과 같이 접근

이 용이한 사주와 여울 12개 지점에서 하상재료를 수집하였으며, 각 지점의 하상재료의 분석결과와 하천의 누가입도분포곡선은 Fig. 4와 같다.

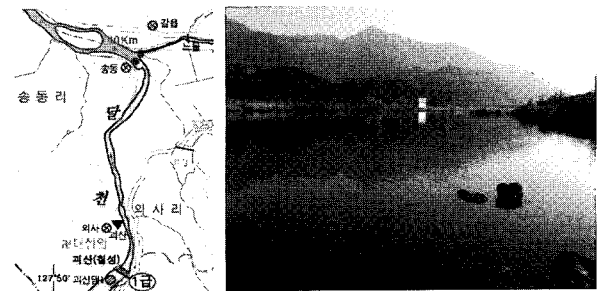


Fig. 1. Study Site

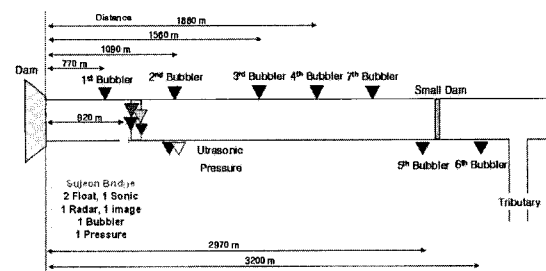


Fig. 2. Location of Water Level Measurement Instruments

Fig. 4로부터 대상하천 하상재료의 통계적 입도 특성을 Table 1과 같이 산정하였다. 여기서 d_{90} 은 통과중량 백분율 90%, d_{84} 는 통과중량백분율 84%에 해당하는 입자의 직경이고, d_{50} 은 하상재료 총중량의 중간값이며, d_{16} 은 통과중량백분율 16%에 해당하는 입자의 직경이다. Limerinos(1970)는 각 특성입도자료로 계산된 값과 실측된 조도계수 매개변수($n/R^{1/6}$)와의 표준편차로부터 각 입도에 가중치를 계산하였고, 가중된 입자의 직경 d_w 을 계산하였다. 그는 d_w 계산을 위하여 84% 입도에는 0.6, 50% 입도에는 0.3, 16% 입도에는 0.1의 가중치를 사용하였다.

입도분포분석결과, 여울에서 수집된 하상재료와 사주에서 수집된 재료는 약간의 차이를 나타내고 있으며 본 연구 대상하천의 평균적인 특징은 각 입경의 산술평균값을 사용하였다.

3. 조도계수 산정

3.1 실측자료를 이용한 조도계수 산정

실측 유량과 실측 수위로부터 직접 조도계수를 산정하기 위하여 미국 지질조사국(USGS)에서 개발된 NCALC 모형(Jarrett and Petsch, 1985)을 사용하였다.

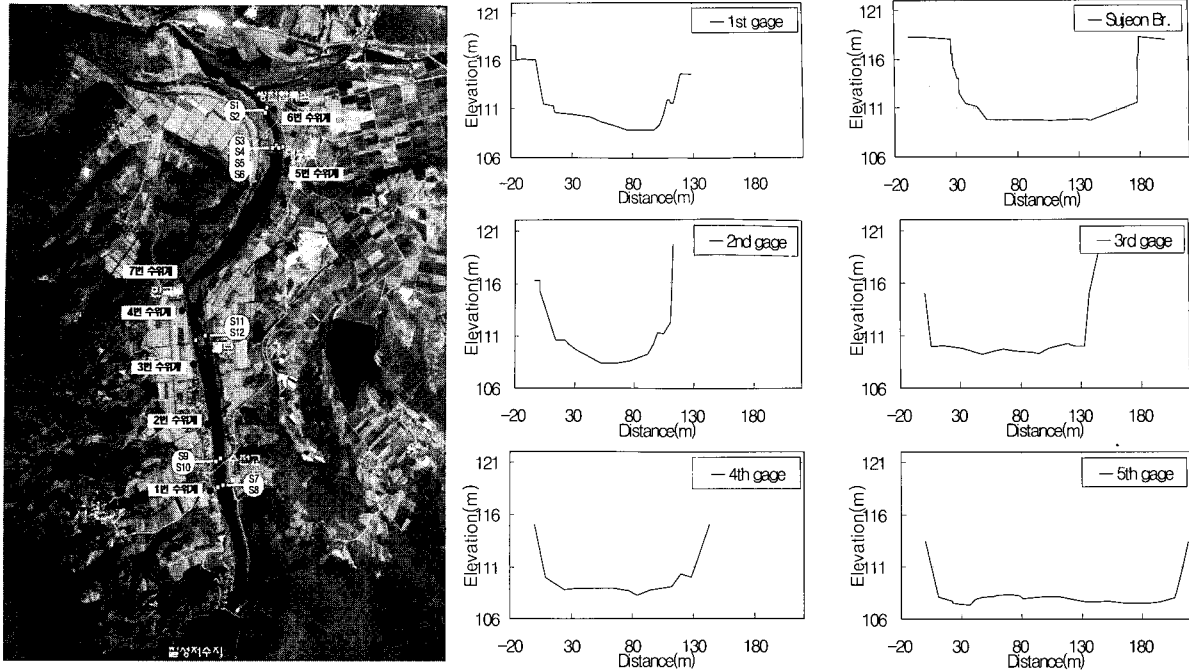


Fig. 3. Location of Sampling the Stream-Bed Materials and Cross Sections of Gage Station

Table 1. Statistical Size Distribution of Bed Materials

Location	$d_{16}(mm)$	$d_{50}(mm)$	$d_{86}(mm)$	$d_{90}(mm)$	$d_w(mm)$	Remark
S1	70.79	109.65	194.98	218.78	156.96	sand bar
S2	48.98	89.13	165.96	190.55	131.21	sand bar
S3	47.86	102.33	208.93	239.88	160.84	sand bar
S4	64.57	151.36	295.12	354.81	228.94	riffle
S5	74.13	141.25	234.42	281.84	190.44	riffle
S6	85.11	158.49	239.88	281.84	199.99	riffle
S7	64.57	162.18	239.88	281.84	199.04	riffle
S8	79.43	162.18	309.03	371.54	242.02	riffle
S9	74.13	138.04	245.47	363.08	196.11	riffle
S10	85.11	165.96	288.40	363.08	231.34	riffle
S11	63.10	120.23	229.09	281.84	179.83	riffle
S12	70.79	151.36	257.04	316.23	206.71	riffle
Average	69.05	137.68	242.35	295.44	193.62	

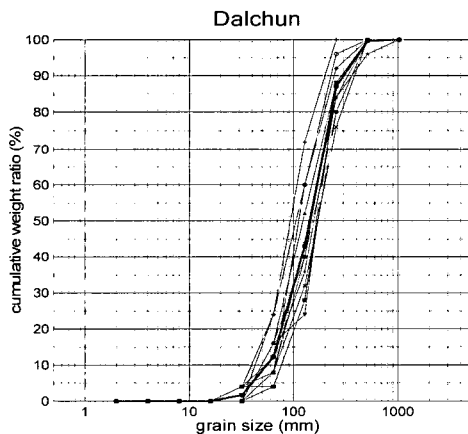


Fig. 4. Cumulative Curves of Bed Materials, Dalchun

NCALC는 Manning 식을 사용하여 구간의 수리특성을 반영하고 조도계수를 계산하는 모형으로 기본이론은 다음과 같다.

일반적으로 등류하천의 유량은 Eq. (1)과 같은 Manning 식에 의해 계산된다. 이 방정식은 에너지경사가 하상마찰에 의한 손실을 반영하도록 수정된다면 부등류 흐름구간에서도 적용성이 입증되어 있다(Jarrett and Petsch, 1985).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량(m^3/s)이며, n 은 Manning 조도계수,

A 는 흐름단면적(m^2), R 은 동수반경(m), S_f 는 에너지경사 또는 마찰경사를 의미한다.

에너지경사 S_f 는 Eq. (2)와 같이 계산된다.

$$S_f = \frac{\Delta h + \Delta h_v - k(\Delta h_v)}{L} \quad (2)$$

여기서 Δh 는 단면사이의 수위차이고, Δh_v 는 속도수두차, L 은 단면사이 거리이며, k 는 수축/확장계수로 단면이 수축되는 경우는 0, 확장되는 경우는 0.5로 가정된다.

대상구간에 m 개의 단면이 존재하는 경우, Eq. (3)으로 조도계수가 산정될 수 있다(Barnes, 1967; Hicks and Mason, 1991).

$$n = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{(h_1 + h_{v_1}) - (h_m + h_{v_m}) - \sum_{i=2}^m (k_{i-1,i} \Delta h_{v_{i-1,i}})}{\sum_{i=2}^m \frac{L_{i-1,i}}{Z_{i-1} Z_i}}}$$

여기서 Z 는 $AR^{2/3}$ 이다.

NCALC는 Eq. (3)과 같이 평균 조도계수를 산정하는 방법 이외에 각 구간에서 계산된 조도계수에 마찰손실수두(h_f)로 가중치를 주어서 평균 조도계수를 산정하는 방법을 제공한다. 가중치는 대상구간의 총 마찰손실수두와 각 구간의 마찰손실수두로 계산되며 Eq. (4)와 같다.

$$n = \frac{n_{1,2} h_{f_{1,2}} + \dots + n_{N-1,N} h_{f_{N-1,N}}}{h_{f_{1,2}} + \dots + h_{f_{N-1,N}}} \quad (4)$$

특정구간의 마찰손실수두가 비교적 큰 경우를 제외하고 일반적으로 Eqs. (3) and (4)의 계산결과는 유사하다. NCALC는 Eq. (1)의 에너지경사에 수면경사를 입력하여 각 단면의 조도계수도 바로 산정하지만, 이 방법은 마찰손실수두의 효과를 무시한 것으로 Eqs. (3) and (4)로 계산된 조도계수를 비교하기 위하여 사용된다.

본 연구의 대상구간에서는 2005년 7월과 2006년 7월에 각각 첨두유량이 계획홍수량의 57%, 71%인 1,000 m^3/s , 1,237 m^3/s 의 홍수사상이 있었으며, 실측 댐방류량과 수위기록으로부터 32개 시점의 자료를 선정하여 조도계수를 산정하였다. 선정된 자료를 사용하여 최소 37 m^3/s 에서 최대 1,237 m^3/s 까지 다양한 유량 규모에

서 조도계수를 산정할 수 있으며, 사용된 자료는 Table 2와 Fig. 5와 같다. Table 2에서 2006년 1번 지점 수위는 수위계 손실로 인하여 수위계가 이전되었으며 따라서 본 연구에서는 고려하지 않았다.

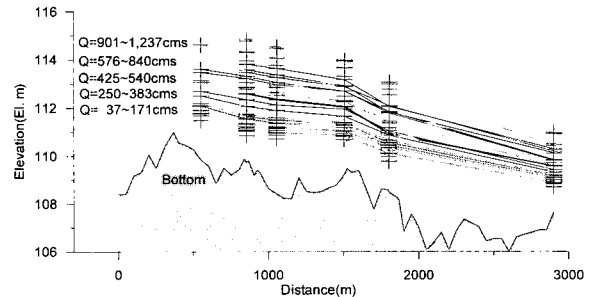


Fig. 5. Water Surface Profiles at Each Event

대상구간의 수위가 실측된 6 지점으로부터 각 단면에 Manning 식을 직접 적용함으로써 유량별 조도계수를 산정할 수 있다. 그러나 Manning 식을 직접 적용하기 위해서는 수면경사를 알아야 하며 선형적인 수면이 나타나지 않는 일반적인 하천에서 수면경사의 결정은 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 대상단면의 상하류 단면 수면경사로부터 대상단면의 수면경사를 지정하였으며 산정된 조도계수의 공간적 시간적 변동은 Fig. 6과 같다.

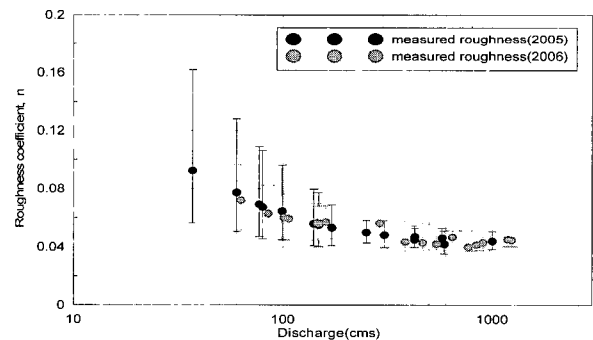


Fig. 6. Spatial and Temporal Change of Manning Roughness Coefficient

Fig. 6에서 오차막대는 각 유량에서 6 지점의 공간적 변동성을 의미하며, 2005년과 2006년 자료로 산정된 조도계수의 변동성은 조도계수의 시간적 변동성을 의미한다. 각 단면에서 유량별 조도계수의 산정결과 유량규모가 커질수록 조도계수의 공간적 변동이 작아짐을 알 수 있다. 이는 평저수기 조도계수의 공간적 변동이 매우 클 수 있음을 의미하며 반면 홍수기에서는 조도계수에 영향을 미치는 지역적 특성이 상당부분 상쇄됨을 판단할 수 있다. Fig. 6에서는 산정된 조도계수가 공간적 변

Table 2. Hydraulic Parameter of Instantaneous Measurements

No.	Event	Q(m ³ /s)	1st gage(m)	Sujeon Br.(m)	2nd gage(m)	3rd gage(m)	4th gage(m)	5th gage(m)
1	2005-07-01 01:30	37.0	111.46	110.83	110.69	110.66	109.76	108.69
2	2005-07-01 17:30	99.0	111.88	111.30	111.12	111.00	110.26	108.96
3	2005-07-02 01:30	60.0	111.66	111.02	110.86	110.79	109.98	108.82
4	2005-07-03 23:30	576.0	113.60	113.32	113.05	112.69	111.84	109.83
5	2005-07-04 03:15	427.0	113.13	112.84	112.57	112.25	111.43	109.59
6	2005-07-04 09:45	250.0	112.49	112.05	111.88	111.64	110.85	109.30
7	2005-07-04 17:15	140.0	112.06	111.51	111.34	111.16	110.42	109.06
8	2005-07-11 05:00	77.0	111.75	111.14	110.96	110.85	110.10	108.88
9	2005-07-11 16:40	1,000.0	114.63	114.33	114.08	113.67	112.77	110.42
10	2005-07-11 22:05	590.0	113.47	113.22	112.96	112.69	111.77	109.80
11	2005-07-12 01:00	425.0	113.05	112.77	112.51	112.28	111.36	109.57
12	2005-07-12 04:30	305.0	112.68	112.33	112.11	111.94	111.03	109.40
13	2005-07-12 13:00	171.0	112.17	111.67	111.48	111.36	110.53	109.14
14	2005-07-12 20:20	148.0	112.08	111.53	111.36	111.25	110.44	109.09
15	2005-07-13 06:00	80.0	111.76	111.14	110.97	110.86	110.11	108.89
16	2006-07-11 00:00	146.0	-	111.61	111.47	111.30	110.56	109.15
17	2006-07-11 19:30	63.0	-	111.06	110.93	110.83	110.08	108.86
18	2006-07-12 19:00	148.0	-	111.62	111.47	111.29	110.56	109.14
19	2006-07-13 12:00	85.0	-	111.19	111.05	110.93	110.21	108.93
20	2006-07-14 04:30	101.0	-	111.30	111.16	111.02	110.31	109.00
21	2006-07-15 07:30	106.5	-	111.34	111.20	111.05	110.34	109.01
22	2006-07-16 12:00	160.0	-	111.72	111.57	111.38	110.65	109.19
23	2006-07-16 19:00	645.0	-	113.48	113.26	112.88	112.08	110.18
24	2006-07-16 20:30	901.0	-	113.97	113.78	113.31	112.54	110.48
25	2006-07-16 21:30	1,183.0	-	114.80	114.49	113.95	113.00	110.91
26	2006-07-16 22:30	1,237.0	-	114.88	114.56	114.00	113.07	110.95
27	2006-07-17 03:30	840.0	-	113.82	113.64	113.17	112.05	110.27
28	2006-07-17 07:30	540.0	-	113.05	112.85	112.48	111.36	109.81
29	2006-07-17 12:30	383.0	-	112.59	112.36	112.06	110.94	109.56
30	2006-07-18 02:30	766.0	-	113.57	113.37	112.93	111.81	110.11
31	2006-07-18 22:30	465.0	-	112.86	112.63	112.29	111.16	109.69
32	2006-07-19 02:30	289.0	-	112.56	112.32	112.02	110.90	109.54

동성뿐만 아니라 유사한 유량규모에서 시간에 따라 상이한 변동성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 부정류 상태의 실제 하천흐름 저항이 동일한 유량조건에서 변할 수 있음을 의미하여 이러한 조도계수의 시간적, 공간적 변화를 Manning 식을 이용하여 산정하는 것은 한계가 있음을 보여준다.

본 연구에서는 대상구간 3.3 km의 평균조도계수를 산정하기 위하여 NCALC 모형을 이용하였으며 Fig. 3의 단면자료와 Table 2의 2005년과 2006년 실측 자료를 이용한 NCALC 계산결과는 Fig. 7과 같다. 여기서 Eq. (1)의 Manning 식으로 계산된 조도계수는 6개 단면에서 계산된 조도계수의 기하평균값이다.

NCALC 계산결과, 각 단면사이의 마찰손실수두로 가중평균된 조도계수(Eq. (4))가 다른 식으로 계산된 조도계수에 비하여 비교적 작은 유량에서 크게 계산되었다. 이는 Fig. 5의 약 600 m³/s 이하에서 마찰손실수두 차

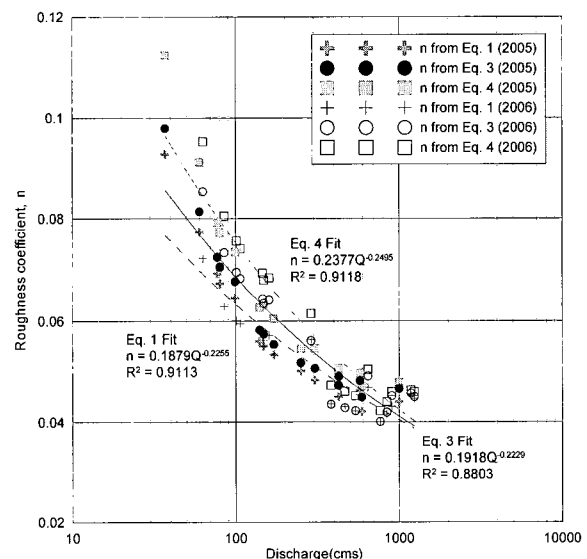


Fig. 7. Manning Roughness Coefficient Calculated by Using NCALC

이가 각 구간에 따라 크게 변화되기 때문에 판단된다. 본 연구의 대상하천은 저수기에 3번 수위계 직하류 부 돌보의 영향으로 배수영향을 크게 받으므로 수전교에서 3번 수위계 사이 구간의 마찰손실수두가 타 구간에 비하여 매우 작게 산정된다. 한편 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 유량에서는 Eqs. (3) and (4)로 계산된 조도계수가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 계산되었으며, 이는 돌보의 배수영향이 더 이상 크게 작용하지 않는 이유로 판단된다. 각 단면에서의 조도계수를 산정하기 위하여 사용된 Eq. (1)의 수면경사는 대상단면의 상하류 단면 수면경사를 사용하였으므로 비물리적인 계산결과 없이 전반적인 조도계수의 유량별 변화를 계산하였다. 그러나 전 유량규모에 있어 Eq. (3)으로 계산된 조도계수보다 비교적 작게 산정되는 것을 알 수 있으며, 따라서 Manning 식에 수면경사를 도입하여 조도계수를 산정함은 주의가 필요할 것으로 판단된다. Eqs. (1), (3) and (4)로 산정된 조도계수의 역함수 회귀분석 결과는 앞서 분석한 바와 같은 경향을 잘 나타내고 있다. 본 연구에서는 Eq. (3)으로 계산된 조도계수로부터 유량별 조도계수를 결정하였으며, $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 유량에서는 조

도계수가 평균 0.044로 계산되었다. 계산된 값과 자갈하천에서 조도계수를 산정하는 기존 경험적 방법의 결과를 비교하여 기존 경험식의 적용성을 검토하고자 한다.

Eq. (3)으로 산정된 결과가 Fig. 6에 나타난 조도계수의 공간적, 시간적 변동을 잘 반영할 수 있는지에 대하여 검토하기 위하여 HEC-RAS 부정류 모형을 사용하였다. 상류단 경계조건으로는 괴산댐 방류량 자료를 사용하였고, 하류단 경계조건은 대수보 직상류의 5번 수위계 수위자료를 사용하였으며, 모의결과는 2005년과 2006년 수전교에서 실측된 TM 수위와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

계산결과는 실측 수위와 비교하여 2005년 사상의 경우 평균제곱오차가 0.105m 로 분석되었고, 2006년 사상의 경우 평균제곱오차가 0.125m 로 분석되었으며 침두 수위의 발생시간 및 크기를 비교하여 3.3km 대상구간에서 평균적인 조도계수의 적정성을 검증하였다.

3.2 미국 지질조사국(USGS) 조도계수 산정

USGS에서는 하천의 조도계수를 산정하기 위하여 Cowan(1956) 식을 사용하였다. Cowan 식은 Table 3과

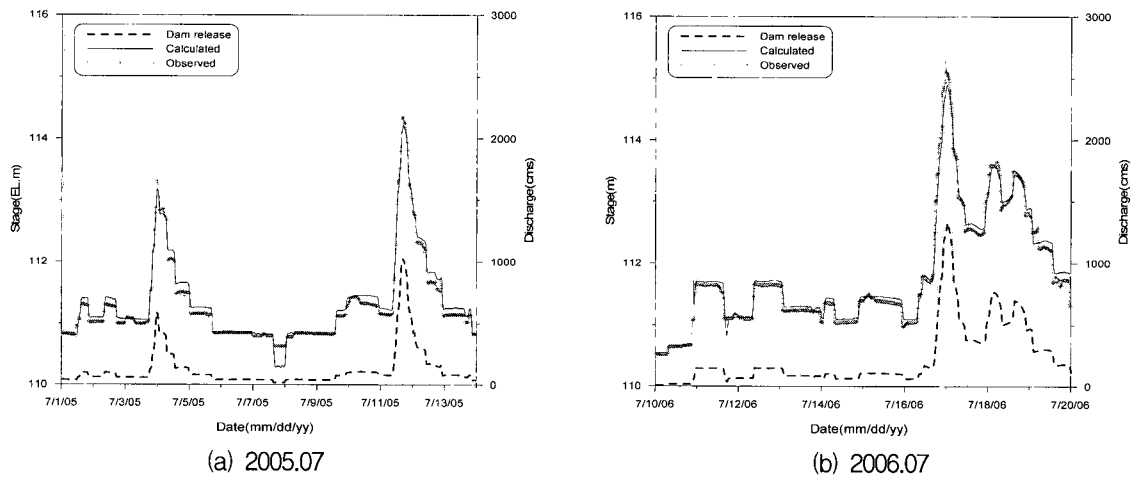


Fig. 8. Comparison of Observed and Calculated Stage by Unsteady Model

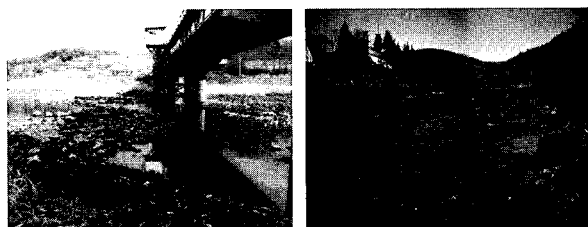
Table 3. The Application of Cowan's Method

Item	Parameter	Guideline	Results	Remark
n_b	Basic coefficient	0.030-0.050	0.030	Cobble
n_1	Irregularity	0.001-0.005	0.002	
n_2	Changes in cross-section	0.001-0.005	0.001	
n_3	Obstruction	0.000-0.004	0.004	
n_4	Vegetation	0.002-0.010	0.002	
	$\text{sum}(n_b+n_1+n_2+n_3+n_4)$		0.039	
m	Meandering	Minor	1.00	$L_m/L_s=0.54$
n	$n=(n_b+n_1+n_2+n_3+n_4)m$		0.039	

L_m is the meander length, and L_s is the straight length: $m=1.0$ for L_m/L_s 1.0-1.2

같이 흐름저항에 영향을 주는 6가지 인자를 고려하였다. 본 연구의 대상구간은 Fig. 9(a)와 같이 하상재료가 주로 호박돌로 구성되어 있으며, Fig. 3의 일부단면형상에서 알 수 있듯이 단면의 불규칙성은 미소한 정도이며, 약간의 종방향 단면 축소가 조사되었다. 교각이나 보와 같은 흐름장애물과 유속잡물의 걸림 등은 심각하지 않은 수준이며, 식생으로 인한 흐름저항은 작을 것으로 판단하였다. Arcement and Schneider(1989)가 제안한 지침서로부터 대상구간의 조도계수를 산정하였으며, 그 결과는 0.039이다.

USGS에서는 실무에서 쉽게 조도계수를 산정하기 위하여 특징적인 하천의 사진에 설명을 덧붙인 지침서를 작성하였다. 본 연구에서는 Barnes(1967)가 작성한 지침서로부터 대상하천의 조도계수를 산정하였다. 참조된 하천(Fig. 9(b))은 하상재료가 주로 굵은 자갈과 호박돌이고 다소 큰 호박돌이 흩어져 있다. 제방 양안에는 약간의 덩굴이 존재하고 수목이 제방에 인접되어 있으며 산정된 조도계수는 0.033이다. 참조된 하천구간과 대상하천 구간을 Fig. 9에 나타내었다.



(a) Study site (b) Reference site

Fig. 9. Comparison of Study Site and Reference Site

USGS의 Cowan 식과 사진자료를 참고한 조도계수의 산정은 현장조사와 더불어 전문성과 공학적 판단이 필요하다. 그러나 조도계수를 산정하기 위한 실측자료가 없을 경우, 여러 가지 흐름저항의 영향을 반영한 하천 조도계수를 근사적으로 산정할 수 있는 점에서 의의가 있다. 산정된 조도계수와 Fig. 7의 비교결과, USGS

의 방법은 홍수기 조도계수 산정의 경우 적용성이 있을 것으로 추정된다.

3.3 경험식에 의한 조도계수 산정

Yen(1992)은 흐름저항을 나타내는 Manning 조도계수의 역사적 배경 및 다양한 현장조건, 적용에 관하여 다양한 논문을 정리하고 편집하였다. 본 연구에서는 이 책에 소개된 논문 일부 경험식을 세 가지 유형으로 구분하고 대상구간에 적용하였다.

3.3.1 Strickler 형태의 경험식

Strickler(1923)는 고정상 하천에서 Manning 조도계수가 하상재료 직경의 1/6승에 비례하는 것을 발견하였다. 이후로 Strickler 형태의 다양한 경험식들이 개발되었으며 Table 4와 같다. 여기서 하상재료입경은 m 단위이며, 대상구간에서 각 식의 산정결과를 Table 4에 나타내었다.

Strickler 형태의 식들은 각각 다른 현장조건에 만제유량(bankfull discharge)에서 개발된 식으로 유량별 또는 수위별 조도계수의 변화를 반영할 수 없으며, 사용된 식에 따라 상이한 조도계수가 산정되었다. 이러한 식의 현장적용을 위한 특별한 제약사항은 없으므로 Strickler 형태의 경험식으로 하천의 조도계수를 산정하는 것은 불확실도가 클 것으로 판단된다.

3.3.2 멱함수 형태의 경험식

자갈 하천에서 마찰계수를 산정하기 위하여 다양한 멱함수 형태의 식이 개발되었다. 이러한 식들은 연직유속분포를 멱함수로 가정한 것이며 Table 5와 같다.

3.3.3 반대수함수 형태의 경험식

반대수함수 형태의 경험식은 대수함수의 연직유속분포를 가정한다. 이는 멱함수 형태의 경험식을 보완하여 $1/\sqrt{f}$ 의 값과 동수반경(또는 수심)과 하상입자직경 비를 반대수지에 도시하고 회귀분석한 결과로 Table 6과 같다.

Table 4. Computed Value from Various Strickler Type Formulae

No.	Investigator	Formula	value of n
1	Strickler (1923)	$n = 0.047d_{50}^{1/6}$	0.034
2	Meyer-Peter and Muller (1948)	$n = 0.038d_{90}^{1/6}$	0.031
3	Keulegan (1938)	$n = 0.039d_{50}^{1/6}$	0.028
4	Bray (1979)	$n = 0.0593d_{50}^{0.179}$	0.042
5	Bray (1979)	$n = 0.0495d_{90}^{0.16}$	0.041

Table 5. Power Formulae

No.	Investigator	Formula	
1	Charlton et al. (1978)	$\sqrt{1/f} = 1.27(h/d_{50})^{0.23}$	Eq. (5)
2	Bray (1979)	$\sqrt{1/f} = 1.36(h/d_{50})^{0.281}$	Eq. (6)
3	Griffiths (1981)	$\sqrt{1/f} = 1.33(R/d_{50})^{0.287}$	Eq. (7)

Table 6. Semilogarithmic Formulae

No.	Investigator	Formula	
1	Limerinos (1970)	$\sqrt{1/f} = 2.03\log(R/d_{50}) + 0.35$	Eq. (8)
2	Bray (1979)	$\sqrt{1/f} = 2.36\log(h/d_{50}) + 0.248$	Eq. (9)
3	Griffiths (1981)	$\sqrt{1/f} = 1.98\log(R/d_{50}) + 0.76$	Eq. (10)

3.3.4 대상하천에서 경험식의 적용

3.3.2절과 3.3.3절에서 조사된 멱함수와 반대수함수 형태의 조도계수 산정식의 적용성을 검토하기 위하여 대상하천의 조도계수를 각 식으로 산정하였다. 조도계수 산정에 필요한 수심 또는 동수반경은 Table 2의 자료순서와 동일하게 32개 자료를 사용하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다. 조도계수 산정을 위한 다른 하나의 인자는 하상재료의 입도이다. 본 연구에서는 통과중량 백분율 50% 입경인 d_{50} 을 사용한 식을 검토하였으며, Fig. 3의 하상재료 수집지점 중에서 수위계가 위치한 단면과의 연관성과 사행의 영향을 고려하여 1번 수위계(S7, S8), 수전교(S9, S10), 3번 수위계(S11, S12)에서 각 평균입자 직경을 사용하였다. 수리특성 매개변수(수심 또는 동수반경)와 d_{50} 입경을 사용하여 3개 지점에서 산정된 유량규모별 마찰계수 제공근의 역수는 Table 8과 같고, Table 8의 자료 순서는 Table 2와 동일하다.

Darcy-Weisbach식과 Manning식의 조합으로부터 마찰계수(f)와 조도계수(n)사이의 관계는 Eq. (11)과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{K_n/\sqrt{8g}}{n/R^{1/6}} = \frac{0.11288}{n/R^{1/6}} \quad (11)$$

여기서 K_n 은 Manning 식의 단위에 따라 사용되는 계수이고, g 는 중력가속도이다. 본 연구에서는 SI 단위를 사용함으로 K_n 값에 1.0을 사용하였다.

Table 7에서는 NCALC 모형으로 산정된 각 단면의 조도계수를 사용하여 조도 매개변수($n/R^{1/6}$)를 계산하였다. NCALC 모형에서 각 단면의 조도계수는

Manning 식에 수면경사를 대입하여 직접 계산된다. 이러한 결과는 에너지경사와 수면경사를 함께 가정함으로써 인하여 실제 조도계수와 다소 차이를 나타낼 수 있으나, 수면경사에 인접 상하류단면 수위에서 계산된 수면경사를 대입함으로써 Fig. 7에서 보여지듯 Eq. (3)으로 계산된 결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 따라서 각 단면의 조도계수는 Eq. (1)로 계산된 값으로 사용하여 조도 매개변수를 계산하였다. 산정된 조도 매개변수와 Eq. (11)을 사용하여 계산된 마찰계수 제공근의 역수를 Table 7에 나타내었다.

6가지의 멱함수와 반대수함수 공식의 마찰계수 산정 결과로부터 Eq. (11)로 계산한 조도계수의 기하평균 값과 NCALC의 Eq. (3)으로 계산한 조도계수를 Fig. 10에 비교하였다.

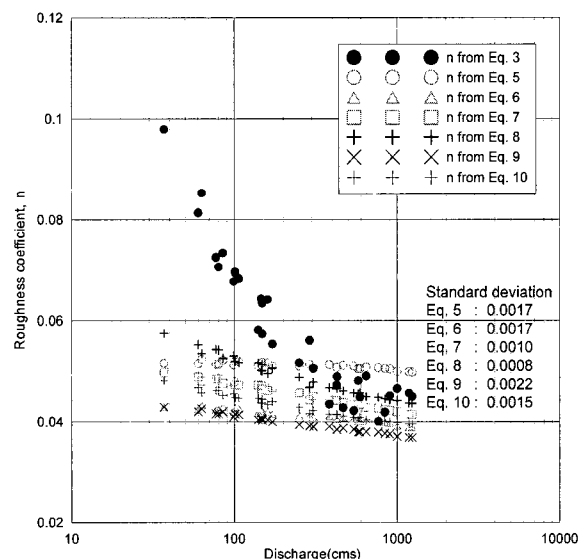


Fig. 10. Comparison of Computed and Measured n Values

Table 7. The Results of Hydraulic Properties, Roughness Parameter($n/R^{1/6}$) and Friction Factor($\sqrt{1/f}$)

No.	1st gage			Sujeon Br.			2nd gage			3rd gage			4th gage			5th gage				
	$h(m)$	$R(m)$	$n/R^{1/6}$	$\sqrt{1/f}$	$h(m)$	$R(m)$	$n/R^{1/6}$	$\sqrt{1/f}$	$h(m)$	$R(m)$	$n/R^{1/6}$	$\sqrt{1/f}$	$h(m)$	$R(m)$	$n/R^{1/6}$	$\sqrt{1/f}$	$h(m)$	$R(m)$	$n/R^{1/6}$	$\sqrt{1/f}$
1	1.96	1.11	0.1618	0.698	1.13	0.72	0.0564	2.001	2.29	1.52	0.0736	1.534	1.46	0.93	0.1072	1.053	1.46	0.84	0.0796	1.418
2	2.38	1.45	0.0965	1.170	1.60	1.01	0.0450	2.508	2.72	1.90	0.0553	2.041	1.80	1.26	0.0643	1.756	1.96	1.20	0.0624	1.809
3	2.16	1.25	0.1282	0.880	1.32	0.86	0.0508	2.222	2.46	1.67	0.0633	1.783	1.59	1.06	0.0795	1.420	1.68	1.02	0.0707	1.597
4	4.10	3.00	0.0410	2.753	3.62	2.73	0.0467	2.417	4.65	3.39	0.0433	2.607	3.49	2.86	0.0528	2.138	3.54	2.63	0.0510	2.213
5	2.56	1.61	0.0797	1.416	1.81	1.15	0.0410	2.753	2.94	1.95	0.0479	2.357	1.96	1.42	0.0570	1.980	2.12	1.34	0.0547	2.064
6	2.99	2.01	0.0584	1.933	2.35	1.61	0.0441	2.560	3.48	2.39	0.0428	2.637	2.44	1.88	0.0544	2.075	2.55	1.74	0.0510	2.213
7	3.63	2.58	0.0434	2.601	3.14	2.31	0.0471	2.397	4.17	2.98	0.0444	2.542	3.05	2.45	0.0529	2.134	3.13	2.26	0.0507	2.226
8	2.25	1.33	0.1091	1.035	1.44	0.93	0.0472	2.392	2.56	1.76	0.0605	1.866	1.65	1.12	0.0672	1.680	1.80	1.10	0.0648	1.742
9	3.97	2.88	0.0354	3.189	3.52	2.64	0.0413	2.733	4.56	3.31	0.0373	3.026	3.49	2.86	0.0512	2.205	3.47	2.57	0.0479	2.357
10	5.13	3.85	0.0383	2.947	4.63	3.57	0.0443	2.548	5.68	4.25	0.0388	2.909	4.47	3.76	0.0508	2.222	4.47	3.44	0.0508	2.222
11	2.58	1.63	0.0771	1.464	1.83	1.16	0.0444	2.542	2.96	1.97	0.0406	2.780	2.05	1.51	0.0596	1.894	2.14	1.35	0.0539	2.094
12	2.67	1.71	0.0691	1.634	1.97	1.27	0.0448	2.520	3.08	2.07	0.0411	2.746	2.16	1.61	0.0588	1.920	2.23	1.44	0.0525	2.150
13	3.18	2.18	0.0493	2.290	2.63	1.86	0.0451	2.503	3.71	2.58	0.0395	2.858	2.74	2.16	0.0582	1.940	2.73	1.90	0.0510	2.213
14	3.55	2.51	0.0402	2.808	3.07	2.25	0.0444	2.542	4.11	2.92	0.0397	2.843	3.08	2.48	0.0544	2.075	3.06	2.20	0.0490	2.304
15	2.26	1.34	0.1067	1.058	1.44	0.93	0.0454	2.486	2.57	1.77	0.0581	1.943	1.66	1.13	0.0656	1.721	1.81	1.11	0.0632	1.786
16	-	-	-	-	1.36	0.88	0.0518	2.179	2.53	1.73	0.0644	1.753	1.63	1.10	0.0790	1.429	1.78	1.09	0.0772	1.462
17	-	-	-	-	1.91	1.22	0.0446	2.531	3.07	2.06	0.0478	2.362	2.10	1.55	0.0632	1.786	2.26	1.47	0.0623	1.812
18	-	-	-	-	1.92	1.23	0.0445	2.537	3.07	2.06	0.0486	2.323	2.09	1.54	0.0619	1.824	2.26	1.47	0.0615	1.835
19	-	-	-	-	1.49	0.95	0.0462	2.443	2.65	1.84	0.0567	1.991	1.73	1.20	0.0673	1.677	1.91	1.17	0.0678	1.665
20	-	-	-	-	1.60	1.01	0.0446	2.531	2.76	1.93	0.0536	2.106	1.82	1.28	0.0640	1.764	2.01	1.23	0.0647	1.745
21	-	-	-	-	1.64	1.03	0.0446	2.531	2.80	1.97	0.0537	2.102	1.85	1.31	0.0637	1.772	2.04	1.26	0.0640	1.764
22	-	-	-	-	2.02	1.31	0.0456	2.475	3.17	2.14	0.0488	2.313	2.18	1.63	0.0634	1.780	2.35	1.55	0.0633	1.783
23	-	-	-	-	3.78	2.87	0.0412	2.740	4.86	3.57	0.0416	2.713	3.68	3.04	0.0515	2.192	3.78	2.84	0.0508	2.222
24	-	-	-	-	4.27	3.28	0.0377	2.994	5.38	4.01	0.0385	2.932	4.11	3.43	0.0468	2.412	4.24	3.24	0.0473	2.386
25	-	-	-	-	5.10	3.96	0.0408	2.767	6.09	4.59	0.0430	2.625	4.75	4.01	0.0512	2.205	4.70	3.64	0.0459	2.459
26	-	-	-	-	5.18	4.02	0.0405	2.787	6.16	4.64	0.0427	2.644	4.80	4.05	0.0499	2.262	4.77	3.70	0.0453	2.492
27	-	-	-	-	2.89	2.10	0.0407	2.773	3.96	2.79	0.0422	2.675	2.86	2.27	0.0581	1.943	2.64	1.82	0.0372	3.034
28	-	-	-	-	3.35	2.50	0.0386	2.924	4.45	3.22	0.0400	2.822	3.28	2.67	0.0555	2.034	3.06	2.20	0.0383	2.947
29	-	-	-	-	4.12	3.15	0.0378	2.986	5.24	3.89	0.0388	2.909	3.97	3.30	0.0533	2.118	3.75	2.82	0.0397	2.843
30	-	-	-	-	3.16	2.33	0.0406	2.780	4.23	3.03	0.0416	2.713	3.09	2.49	0.0567	1.991	2.86	2.02	0.0377	2.994
31	-	-	-	-	3.87	2.94	0.0372	3.034	4.97	3.66	0.0379	2.978	3.73	3.08	0.0512	2.205	3.51	2.60	0.0374	3.018
32	-	-	-	-	2.86	2.07	0.0529	2.134	3.92	2.76	0.0553	2.041	2.82	2.24	0.0748	1.509	2.60	1.78	0.0475	2.376

Table 8. The Results of Friction Factor($\sqrt{1/f}$) Computed by Using Six-Formulations

No.	1st gage(m)						Sujeon Br.(m)						3rd gage(m)								
	d_{50} (mm)	Power			Semilogarithmic			d_{50} (mm)	Power			Semilogarithmic			d_{50} (mm)	Power			Semilogarithmic		
		Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(9)	Eq.(10)		Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(9)	Eq.(10)		Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(9)	Eq.(10)
1		2.253	2.739	2.310	2.046	2.802	2.414		2.015	2.390	2.078	1.721	2.304	2.097		2.193	2.651	2.310	2.046	2.682	2.414
2		2.356	2.893	2.494	2.281	3.001	2.644		2.182	2.635	2.290	2.020	2.661	2.389		2.301	2.811	2.521	2.314	2.897	2.676
3		2.304	2.815	2.390	2.150	2.902	2.516		2.088	2.496	2.187	1.878	2.463	2.250		2.236	2.715	2.399	2.162	2.770	2.527
4		2.670	3.371	3.073	2.922	3.559	3.269		2.633	3.315	3.047	2.896	3.497	3.244		2.680	3.386	3.189	3.037	3.575	3.380
5		2.396	2.953	2.570	2.374	3.076	2.734		2.245	2.728	2.377	2.134	2.787	2.500		2.347	2.880	2.609	2.419	2.984	2.778
6		2.483	3.085	2.739	2.569	3.235	2.925		2.384	2.936	2.618	2.431	3.055	2.789		2.468	3.062	2.827	2.667	3.209	3.020
7		2.596	3.257	2.943	2.789	3.434	3.139		2.548	3.185	2.904	2.749	3.352	3.100		2.598	3.261	3.051	2.900	3.437	3.247
8		2.325	2.848	2.433	2.205	2.944	2.569		2.130	2.558	2.237	1.947	2.553	2.318		2.256	2.744	2.437	2.210	2.808	2.574
9		2.650	3.340	3.037	2.886	3.526	3.234		2.616	3.289	3.018	2.867	3.469	3.215		2.680	3.386	3.189	3.037	3.575	3.380
10		2.811	3.590	3.301	3.142	3.788	3.483		2.787	3.552	3.291	3.133	3.750	3.474		2.837	3.630	3.450	3.278	3.829	3.616
11		2.400	2.959	2.579	2.384	3.084	2.744		2.251	2.736	2.383	2.142	2.798	2.508		2.371	2.916	2.655	2.474	3.030	2.831
12		2.419	2.988	2.615	2.427	3.119	2.786		2.289	2.794	2.446	2.222	2.874	2.585		2.400	2.959	2.704	2.530	3.084	2.886
13		2.518	3.138	2.804	2.641	3.298	2.994		2.447	3.030	2.729	2.558	3.170	2.914		2.535	3.164	2.942	2.789	3.327	3.139
14		2.583	3.237	2.919	2.765	3.411	3.116		2.535	3.165	2.882	2.726	3.328	3.077		2.604	3.269	3.061	2.911	3.447	3.258
15		2.328	2.851	2.438	2.212	2.948	2.576		2.130	2.558	2.237	1.947	2.553	2.318		2.259	2.748	2.443	2.218	2.814	2.582
16	162.18	-	-	-	-	-	-	152.00	2.102	2.517	2.202	1.898	2.494	2.270		2.249	2.734	2.424	2.194	2.795	2.559
17		-	-	-	-	-	-		2.273	2.770	2.418	2.186	2.842	2.551		2.384	2.936	2.675	2.497	3.055	2.854
18		-	-	-	-	-	-		2.276	2.774	2.424	2.193	2.847	2.558		2.382	2.932	2.670	2.491	3.050	2.848
19		-	-	-	-	-	-		2.147	2.583	2.250	1.966	2.588	2.336		2.280	2.780	2.486	2.271	2.856	2.634
20		-	-	-	-	-	-		2.182	2.635	2.290	2.020	2.661	2.389		2.307	2.820	2.532	2.328	2.908	2.689
21		-	-	-	-	-	-		2.195	2.653	2.303	2.037	2.686	2.405		2.316	2.833	2.549	2.348	2.925	2.709
22		-	-	-	-	-	-		2.303	2.813	2.468	2.249	2.899	2.612		2.405	2.967	2.714	2.541	3.093	2.897
23		-	-	-	-	-	-		2.660	3.355	3.091	2.940	3.542	3.287		2.713	3.437	3.246	3.090	3.630	3.433
24		-	-	-	-	-	-		2.735	3.472	3.212	3.058	3.667	3.401		2.782	3.546	3.360	3.197	3.743	3.537
25		-	-	-	-	-	-		2.849	3.650	3.390	3.224	3.849	3.563		2.877	3.693	3.514	3.335	3.891	3.671
26		-	-	-	-	-	-		2.859	3.666	3.405	3.237	3.865	3.576		2.884	3.704	3.524	3.343	3.902	3.680
27		-	-	-	-	-	-		2.500	3.111	2.826	2.665	3.267	3.018		2.560	3.202	2.985	2.833	3.371	3.182
28		-	-	-	-	-	-		2.587	3.243	2.971	2.819	3.418	3.168		2.642	3.328	3.127	2.976	3.512	3.321
29		-	-	-	-	-	-		2.713	3.437	3.175	3.022	3.630	3.367		2.760	3.511	3.323	3.163	3.708	3.504
30		-	-	-	-	-	-		2.552	3.190	2.911	2.757	3.358	3.107		2.606	3.272	3.065	2.915	3.451	3.261
31		-	-	-	-	-	-		2.674	3.377	3.112	2.962	3.566	3.307		2.721	3.450	3.258	3.102	3.644	3.444
32		-	-	-	-	-	-		2.494	3.102	2.814	2.652	3.256	3.006		2.552	3.189	2.973	2.821	3.357	3.170

떡함수 및 반대수함수에 의한 유량에 따른 조도계수의 산정결과는 유량이 감소함에 따라 조도계수가 상승하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 Strickler 형태의 방정식 산정결과 비교와 같이 사용된 식에 따라 상이한 조도계수가 산정되었으며, 이러한 결과는 함수의 형태 차이, 다시 말해서 떡함수 형태와 반대수함수 형태에 의한 원인은 아닌 것으로 판단된다. 대상하천의 경우 400 m³/s 이상의 유량에서 Limerinos 식의 적용성이 있는 것으로 분석되었다. 400 m³/s 이상에서 각 방정식의 조도계수 산정결과와 실측자료로부터 계산된 조도계수의 표준편차를 Fig. 10에 함께 표시하였다.

Limerinos 식은 약 400 m³/s 이하에서 실측된 조도계수에 비하여 매우 작게 산정되고 있다. 비록 Limerinos 식이 동수반경을 인자로 포함하고 있으나 식의 개발과정에 사용된 자료가 다양한 하천의 홍수기 자료에 국한된 원인으로 판단된다. 이는 다른 조도계수 산정식들과 마찬가지로 Limerinos 식이 홍수기 조도계수의 산정에 의미를 지닌다는 것을 알 수 있다.

3.3.5 평저수기 조도계수와 입도와의 상관성

하천에서 발생하는 에너지 손실을 고려하기 위한 Manning 조도계수는 홍수기와 저수기에 상당한 차이를 보이게 된다. 본 연구에서는 평저수기 대상하천의 하상재료 특정입도(d_{16} , d_{50} , d_{84} , d_w)가 흐름저항에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Limerinos에 의해 제안된 절차를 수행하였다. 이를 위하여 Table 8의 3개 지점에서 실측된 유량이 400 m³/s 이하인 총 48개 수위자료(Table 2)를 사용하였다.

하상입도와 마찰계수 사이의 상관성을 분석하는 절차는 다음과 같다.

먼저 실측된 수위자료와 하상재료의 입경으로 다양한 유량규모에서 상대조도 R/d_g 를 계산한다. 여기서 g 는 16%, 50%, 84%, 가중된 입경 w 를 의미한다. 계산된 상대조도와 Table 7에 계산된 $1/\sqrt{f}$ 를 반대수지에 도시하고 Eq. (12)와 같은 최적의 직선 방정식을 회귀한다.

$$1/\sqrt{f} = a + b \log \frac{R}{d_g} \quad (12)$$

여기서 a 와 b 는 상수이다. Limerinos는 11개 하천에서 실측된 홍수자료의 회귀분석 결과로부터 d_{16} 의 경우를 제외하고 나머지 입도에서는 상수 b 가 2.0에서 크게 변하지 않음을 발견하였다. Eq. (13)의 연직유속대수분포식에서 von Karman 상수(κ)에 0.4를 대입할 경우, 상

수 b 는 2.03으로 계산된다. 한편 상수 b 의 약간의 변화는 조도계수 n 의 산정에 그다지 민감하지 않다. 따라서 Limerinos는 모든 입도와 관련된 조도계수 산정식의 상수 b 에 가능하다면 이론적으로 의미를 가지는 2.03을 사용하였다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (13)$$

여기서 u 는 하상에서 수직거리 y 에서의 유속이고, u_* 는 전단유속이며 y_0 는 특성길이이다.

본 연구 대상구간에서 평저수기 실측자료로부터 회귀한 조도계수 산정결과는 Eqs. (14)~(17)와 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.74 \log \frac{R}{d_{16}} - 1.5 \quad (14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3.06 \log \frac{R}{d_{50}} - 0.98 \quad (15)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.96 \log \frac{R}{d_w} - 0.54 \quad (16)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.93 \log \frac{R}{d_{84}} - 0.28 \quad (17)$$

본 연구에서 평저수기 대상구간에서 실측된 자료의 회귀분석결과는 모든 하천에서 일반화될 수는 없다. 다만 평저수기의 조도계수가 특정입도와 상관성이 있다는 정성적 결과와 상수 b 가 이론적인 값 2.03과는 달리 상당히 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 d_{16} 의 경우를 제외하고 나머지 입도에서는 매우 유사한 상수 b 가 추정되어 Limerinos의 연구결과와 동일한 경향을 나타내었다. 산정된 회귀식들에 Eq. (11)을 적용하면 Eqs. (18)~(21)과 같은 조도계수 산정식이 완성된다.

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0.11288}{2.74 \log(R/d_{16}) - 1.5} \quad (18)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0.11288}{3.06 \log(R/d_{50}) - 0.98} \quad (19)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0.11288}{2.96 \log(R/d_w) - 0.54} \quad (20)$$

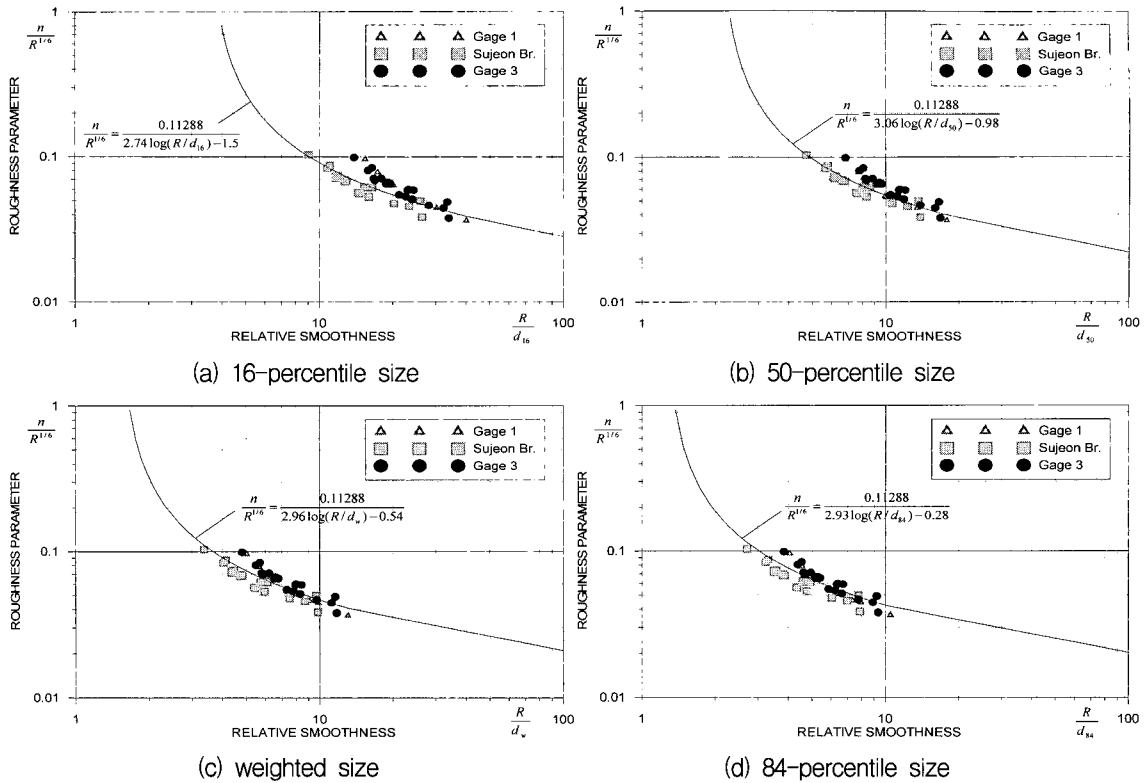


Fig. 11. Relation of Roughness Parameter to Relative Smoothness based on Each-Percentile Size of Bed Materials

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0.11288}{2.93 \log(R/d_{84}) - 0.28} \quad (21)$$

하상재료의 각 입도에서 실측 자료와 회귀분석 결과식의 비교는 Fig. 11과 같다.

4. 결 론

본 연구에서는 자갈하천인 달천의 다양한 유량규모에서 실측된 수위자료를 이용하여 조도계수를 직접 산정하였다. 그리고 기존의 다양한 경험식을 이용한 조도계수 산정결과와 비교하여 하천의 적용성을 검토하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 실측유량 및 수위자료를 사용하여 Manning 식으로 조도계수를 산정하는 것은 현장조건이 등류조건을 만족할 수 있는가에 좌우된다. 평저수기에 이러한 조건이 충족되는 하천은 흔하지 않으므로 다수 지점의 수위자료를 이용하여 구간 평균 조도계수를 산정할 필요가 있다.
- 2) USGS의 조도계수 산정방법은 근사적인 조도계수 값을 제공할 수 있으나 주관적인 판단이 필요하며, Strickler 형태의 산정식, 멱함수 형태의 산정식, 반대수함수 형태의 산정식들은 식에 따라 상

이한 결과를 제공함으로써 일반적인 해를 제공할 수 없다. 뿐만 아니라 이러한 연구결과들은 홍수기에 국한되어 있으므로 평저수기에는 적용이 제한될 수 있다.

- 3) 대상하천인 달천의 경우, 400 m³/s 이상의 홍수에서 반대수함수 형태인 Limerinos 식의 적용이 타당할 것으로 판단되며 실측자료를 이용한 조도계수의 산정결과와 식에 의해 계산된 조도계수는 0.0006~0.0048 정도의 차이를 나타내는 것으로 분석되었다.
- 4) 평저수기 유량자료와 하상재료의 특정입도와의 상관성 분석 결과, 홍수기와 마찬가지로 연관성이 있는 것으로 분석되었다. 그러나 그 특성이 상이하야 홍수기 자료와 분리하여 분석할 필요성을 확인하였으며 향후 평저수기 하천의 조도계수 산정에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 이신재, 박상우 (2006). "수위-유량 자료가 부재한 자갈 하천의 조도계수 산정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp. 985-996.
- 이정규, 이창현 (2004). "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 23-32.
- 충청북도 (1995). **달천 하천정비기본계획보고서**
- 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산 모형: 모형의 보정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- Afzalimehr, H. and Anctil, F. (1998). "Estimation of gravel-bed river flow resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 10, pp. 1054-1058.
- Arcement, G. J. and Schneider, V. R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339.
- Azmon, B. (1992). "Manning coefficient of roughness - a case study along Soreq stream, 1971-1981." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 132, pp. 361-377.
- Barnes, H.H., Jr. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849.
- Bray, D.I. (1979). "Estimating average velocity in gravel-bed rivers." *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1122.
- Cowan, W.L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficients." *Agricultural Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
- Charlton, D., Brown, P.M. and Benson, R.W. (1978). "The hydraulic geometric of some gravel rivers in Britain." *Report INT 180*, Hydraulics Research Station, Wallingford, England.
- Griffiths, G.A. (1981). "Flow resistance in coarse gravel-bed rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 7, pp. 899-918.
- Hicks, D.M. and Mason, P.D. (1991). *Roughness characteristics of New Zealand Rivers*, DSIR Marine and freshwater, Wellington.
- Jarrett, R.D., and Petsch, H.E. Jr. (1985). *Computer program NCALC user's manual - verification of Manning's roughness coefficient in channels*, U.S. Geological Survey Water - Resources Investigations Report 85-4317.
- Keulegan, G.H. (1938). "Laws of turbulent flows in open channels." *J. Res. Nat. Bureau Standards*, 21(Research Paper 1151), pp. 707-741, Washington, D.C.
- Limerinos, J.T. (1970). *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport." *Proc. 3rd Meeting of IAHR*, Stockholm, Sweden, pp. 39-64.
- Strickler, A. (1923). "Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitzahlen fur Strome, Kanale und geschlossene Leitungen." *Mitteilungen des Eidgenossischen Amtes fur Wasserwirtschaft 16*, Bern, Switzerland (Translated as "Contributions to the question of a velocity formula and roughness data for streams, channels and closed pipelines." by T. Roesgan and W. R. Brownie, Translation T-10, W. M. Keck Lab of Hydraulics and Water Resources, Calif. Inst. Tech., Pasadena, Calif. January 1981).
- Wohl, E. E. (1998). "Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 219-223.
- Yen, B.C. (1992). *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

(논문번호:07-66/접수:2007.07.12/심사완료:2007.08.29)