

자갈하천의 조도계수 특성 분석

Analysis of Roughness Coefficient in Gravel-bed Rivers

이찬주* · 김용진** · 김지성*** · 김 원****

Lee, Chan Joo · Kim, Yong Jeon · Kim, Ji Sung · Kim, Won

Abstract

The purpose of this study is to analyse characteristics of roughness coefficient based on bed-material size of the gravel-bed rivers using field data obtained from nine domestic rivers. Roughness coefficient is calculated using Manning's equation. Roughness coefficient decreases with increasing discharge, but above a certain discharge, it tends to be constant. Similarly, roughness coefficient shows reverse relationship with relative smoothness (R/D). The regression equation adopting theoretically derived value of 2.03 as log coefficient indicates close similarity with the previous equation proposed by Limerinos (1970). Roughness coefficient values converged above certain discharges lie in the range from 0.024 to 0.045. From them, empirical equations based only on bed-material size are derived and compared with those suggested by the previous studies.

Keywords : roughness coefficient, gravel-bed river, bed-material, relative smoothness

요 지

본 연구는 국내 9개 하천에서 실측한 자료를 사용하여 하상재료의 입경에 기초한 자갈하천의 조도계수 특성을 분석하는데 그 목적이 있다. 조도계수는 Manning 식을 역산하여 산정하였다. 산정된 조도계수는 유량에 따라 대체로 감소하였으며, 일정한 유량 이상에서는 수렴하는 특성을 나타냈다. 마찬가지로, 상대수심(R/D)이 증가함에 따라 조도계수는 감소하는 경향을 보여주었으며, 실측 자료를 이용하여 적합식을 구한 결과 Limerinos(1970) 식과 매우 유사한 결과를 보여주었다. 일정한 유량 이상에서 수렴된 조도계수값은 0.024~0.045의 범위에 있었으며, 이를 기초로 하상재료만을 고려한 조도계수 산정식을 도출하고 기존의 식과 비교하였다.

핵심용어 : 조도계수, 자갈하천, 하상재료, 상대수심

1. 서 론

자갈하천(gravel-bed river)은 하상을 구성하는 주된 입자가 중경(intermediate axis) 기준으로 2 mm 이상 256 mm 이하인 자갈(gravel) 또는 호박돌(cobble)로 이루어진 하천으로, 종종 256 mm 이상의 입경을 가진 전석(boulder)을 포함하기도 한다. 자갈하천은 하상의 상당한 두께에서 자갈이 덮여있는 경우, 자갈층이 모래 내지는 그보다 세립질의 기질층 위에 얇게 포장되거나 장갑화되어 있는 경우, 또는 기반암 위에 자갈층이 얇게 덮인 경우 등의 유형으로 나타난다(Neill 과 Hey, 1982).

자갈하천에서는 자갈층이 하상표면의 대부분을 덮고 있으므로 흐름에 대한 저항은 주로 자갈입자로 구성된 하상표면과의 접촉에 의해 발생한다. 이 점에서 유권(flow regime) 변화에 따라 하상과(bedform)가 변하고 흐름 저항이 달라지

는 모래하천과 뚜렷이 구별된다. 자갈하천에서는 상당히 빠른 유속과 전단응력을 가하는 흐름 조건이 가해지기 전에는 흐름 저항의 주요인인 하상층이 변형되지 않고 그 형태를 유지하므로 그 이하 범위의 흐름 조건에 대해서는 하상의 거칠기를 주요인으로 고려하는 조도계수 산정이 가능하다.

자갈하천의 조도계수를 산정하는 정량적인 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 그 하나는 하상의 거칠기만을 고려하는 것으로 하상재료의 대표입경과 조도계수와의 직접적인 관계를 수립하는 방법이다. 그중 대표적인 것은 Strickler(1923)의 연구로 그는 Manning의 n 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계가 있음을 이론적으로 제시하였다. 이후에 여러 연구자들이 실험 또는 현장 실측한 자료를 기초로 하상재료와 크기와 조도계수를 관련시키는 식을 제시하였다(Keulegan, 1938; Meyer-Peter와 Muller, 1948; Garde와 Raju, 1978; Hey, 1979; Bray, 1979). 다른 하나는 수심 변화에 따른 흐름 저항의

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 연구원 (E-mail : c0gnitum@kict.re.kr)

**한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 연구원

***정회원 · 한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 박사후연구원

****정회원 · 한국건설기술연구원 하천해양환경연구실 책임연구원

변화를 반영하여 동수반경으로 표시되는 수심과 하상재료 대표입경의 비율인 상대수심(relative smoothness, R/D)을 고려하는 방법이다(Limerinos, 1970; Bray, 1979; Griffiths, 1981, Hey, 1979). 여기 속하는 식들은 연직유속분포에 관한 함수에 따라 멱함수식이나 대수함수식의 형태를 취한다. 이와 함께 수심과 조고의 비율을 반영하여 조도계수를 산정하는 연구나(Colebrook과 White, 1937; Keulegan, 1938) 하상재료의 입경분포 특성과 항력계수를 고려하여 등기조고를 산정하고 이를 토대로 흐름 저항을 산정하는 연구(김지성 등, 2009)도 수심의 조도계수 변화를 고려하는 방법과 같은 맥락에서 이해할 수 있다.

이처럼 외국에서는 자갈하천의 조도계수에 관한 다양한 연구가 이루어졌으며, 여러 현장의 자료가 수집, 축적되어 실제 하천에서 조도계수를 산정할 때 활용도를 높이고 있다. 나아가 다양한 하천에 대해 현장 실측에 의해 조도계수를 산정하여 그 결과를 보급하는 일도 병행하고 있다(Hick와 Mason, 1991; Coon, 1995). 이에 비해 국내에서는 최근의 일부 연구(유권규 등, 1993; 김지성 등, 2007)를 제외하고는 조도계수 산정과 관련된 현장 실측 연구가 거의 이루어지지 못하여 외국의 방법들을 도입하여 활용하는데 그치고 있는 실정이며, 이에 따라 현장 자료에 기반한 조도계수 산정보다는 부등류 모형 등에 의한 결과를 더 많이 활용하는 편이다(이찬주 등, 2007). 조도계수가 하천의 흐름 해석에 미치는 영향을 고려하면, 외국에서 개발된 식이라도 국내 하천에 대한 적용과 검증이 필요하며, 가능하다면 국내 하천의 특성을 반영하여 수정, 보완되는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 우리나라의 자갈하천에 대한 현장 실측을 실시하고, 이를 기초로 조도계수를 산정하며 그 특성을 분석

하였다. 먼저 유량 변화에 따른 조도계수 특성을 살펴본 후 상대수심 변화를 고려한 조도계수 특성과 하상재료 입경에 따른 조도계수 특성을 분석하였다. 이 과정에서 가용한 자료의 범위 내에서 경험식을 제시하고, 기존 연구에서 제시된 여러 식들과 비교, 분석하였다.

2. 대상하천 특성

본 연구에서 분석한 하천은 국내의 대표적인 자갈하천 9개 지점이다(그림 1). 실측 대상 구간은 대체로 직선형의 구간으로 길이는 지점에 따라 300~1,200 m이며, 이는 강터하폭의 2~10배의 범위이면서, Darlymple과 Benson(1968)이 경사면적법 적용을 위해 제시한 기준인 수심의 75배를 충분히 넘는 구간으로 선정하였다. 9개 지점 중에서 곡성, 괴산, 화춘 등 3개 지점은 여울과 웅덩이가 비교적 뚜렷하게 번갈아 나타나고 있는 구간이고, 나머지 6개 지점은 상대적으로 하상의 굴곡이 작은 지점이다. 모든 지점에서 강터의 불규칙성은 미미하며, 모든 지점에서 측정된 유량 범위에 대해 하천 단면은 단단면이거나 주하도에 비해 강터 윗부분의 고수부지가 매우 협소한 특성을 나타내고 있다. 식생은 강터과 하상에 드문드문 분포하고 있는데, 조도계수에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 실무적인 측면에서의 적용성을 주로 고려하므로 개별 자갈하천에서 발생하는 이러한 다양한 흐름 저항 요인들은 별도로 고려하지 않았다.

실측된 유량 범위에 대해 수심 변화는 지점에 따라 최소 1 m(월곡)부터 최대 6 m 이상(곡성, 적성)이며, 유량 역시 중소규모 하천에서는 변화폭이 1,000 cms 이내이고 대하천인 섬진강, 홍천강, 임진강에서는 2,000 cms 이상이다. 수면경사



그림 1. 연구 대상 지점

표 1. 대상 지점의 구간 특성과 실측 조건

하천명	지점	유역면적 (km ²)	구간거리 (m)	강턱하폭 (m)	수심범위 (m)	유량범위 (m ³ /s)	수면경사	실측연도
섬진강	곡성	1,663.5	972	105	0~6.3	6~2,894	0.0009~0.0015	2007
달천	괴산	675.2	1,102	130	0~3.5 0~4.1	63~1,237	0.0015~0.0017	2005 2006
홍천강	회춘	523.2	600	110	0~4.5	15~1,291	0.0024~0.0028	2008
금호강	동춘	1,556.6	300	190	0~2.6	144~772	0.0007~0.0011	2008
평창강	방림	402.5	760	95	0~3.4	3~525	0.0045~0.0049	2007
홍천강	서면	1,325.4	1,230	253	0~5.0	22~2,761	0.0006~0.0015	2007
금강	이원	2,963.1	1,054	225	0~5.9	23~1,436	0.0003~0.0005	2007
금강	월곡	111.0	200	50	0~1.0	2~111	0.0038~0.0044	2009
임진강	적성	6,784.0	900	250	0~6.1	101~3,717	0.0001~0.0003	2009

를 보면, 이원, 적성 지점의 경우 1/2,000 이하로 매우 완만하며, 곡성, 동춘, 서면 지점의 경우 1/2,000~1/1,000 범위이고, 괴산, 회춘, 방림, 월곡 지점의 경우 1/600~1/200 사이로 비교적 급한 경사를 나타내고 있다. 현장 실측은 2005년부터 2009년 사이에 이루어졌다.

각 지점에서 하상 표면의 거칠기를 나타내는 대표입경을 도출하기 위해 하상재료를 채취하여 입경분석을 실시하였다. 이원 지점과 적성 지점은 자갈과 모래가 섞여 나타나는 하상 특성을 가지고 있으므로 이를 반영하여 사주(bar)와 평하상(run)의 표면에서 증량표본법(bulk sampling)을 사용하여 하상재료를 채취하였다. 이 때, 표본의 양은 최대 크기를 갖는 자갈 입자 증량의 20배 가까이 되도록 하여 표본 양이 적어서 발생할 수 있는 오차를 줄이고자 하였다. 나머지 7개 지점은 하상 표면이 거의 자갈만으로 이루어져 있거나 하상이 장갑화된 특성을 가지고 있으므로 선격자법(grid-by-number)으로 여울, 사주, 평하상 등의 위치에서 고루 샘플링하였다. 개별 입자는 디지털 캘리퍼스를 이용하여 중경(intermediate axis)을 측정하였다. 입자 중경을 측정한 선격자법과 증량표본법은 입경 대표값을 상호 변환할 때 변환계수가 필요하지 않으므로 동일한 잣대로 파악될 수 있으며 이에 따라 상호 비교가 가능하다(ISO, 1992). 표 2에는 지점별로 구한 대표입경이 제시되어 있다.

3. 실측 수위와 유량을 이용한 조도계수 산정

흐름 저항을 나타내는 조도계수 중에 가장 널리 활용되는

표 2. 지점별 대표입경값

지점	D ₁₆ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₈₄ (mm)	D ₉₀ (mm)	표본채취법
곡성	104.5	255.0	719.0	866.9	선격자법
괴산	70.1	141.8	241.7	299.7	선격자법
회춘	36.5	83.7	145.5	208.6	선격자법
동춘	25.0	65.9	163.5	241.0	선격자법
방림	41.7	99.8	208.6	247.4	선격자법
서면	35.1	65.4	134.4	148.0	선격자법
이원	1.5	32.7	105.1	153.0	증량표본법
월곡	27.7	93.0	254.2	335.3	선격자법
적성	0.4	2.1	94.4	134.0	증량표본법

것은 Manning 조도계수(n , 이하 조도계수라 한다)로 이는 현장 실측 자료를 이용하면 간단히 역산하여 얻을 수 있다. n 값은 폭이 넓은 개수로에서 넓은 범위의 상대수심에 적용될 수 있으므로 충분히 거친 흐름에 대한 등류 해석에서 가장 널리 활용되며, 하상마찰에 의한 손실을 에너지경사에 적절히 반영할 수 있을 경우 부등류 흐름에서도 적용성이 있는 것으로 알려져 있다(Jarrett과 Petsch, 1985). 이에 따라 본 연구에서는 실측 유량과 실측 수위로부터 Manning 식을 이용하여 조도계수(n)를 역산하였다(식 1).

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

여기서 Q 는 유량(m³/s)이며, n 은 Manning 조도계수, A 는 흐름단면적(m²), R 은 동수반경(m), S_f 는 에너지경사 또는 마찰경사를 의미한다. 에너지경사 S_f 는 식 (2)와 같이 계산된다.

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

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 개의 단면이 존재하는 경우, 식 (3)으로 조도계수가 산정될 수 있다(Hicks와 Mason, 1991).

$$n = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{(h_1 + h_{v_1}) - (h_m + h_{v_m}) - \sum_{i=2}^m (k_{i-1,i} \Delta h_{v_{i-1,i}})}{\sum_{i=2}^m \frac{L_{i-1,i}}{Z_{i-1} - Z_i}}} \quad (3)$$

여기서 Z 는 $AR^{2/3}$ 이다. 본 연구에서는 주로 대상 구간의 상류와 하류단에 설치한 수위계로 실측하므로 상하류 두 개 또는 그 이상의 단면을 이용하여 식 (3)에 의해 조도계수를 계산하였다.

넓은 범위의 수위 및 유량에 대해 조도계수를 산정하기 위해 9개 지점의 하천에 대해 여름철 홍수기를 포함하는 최소 2개월 이상의 기간 동안 상하류 지점에서 수위를 실측하였다(그림 2). 수위계는 대기압 및 온도 보정이 가능한 정밀도 5 mm의 기포식 자동수위기록계와 정밀도 1 mm의 압력식 수위계가 사용되었다. 수위계는 상하류 단면에 설치되었고 필요에 따라 중간 단면에 추가 설치되었다. 모든 수위계

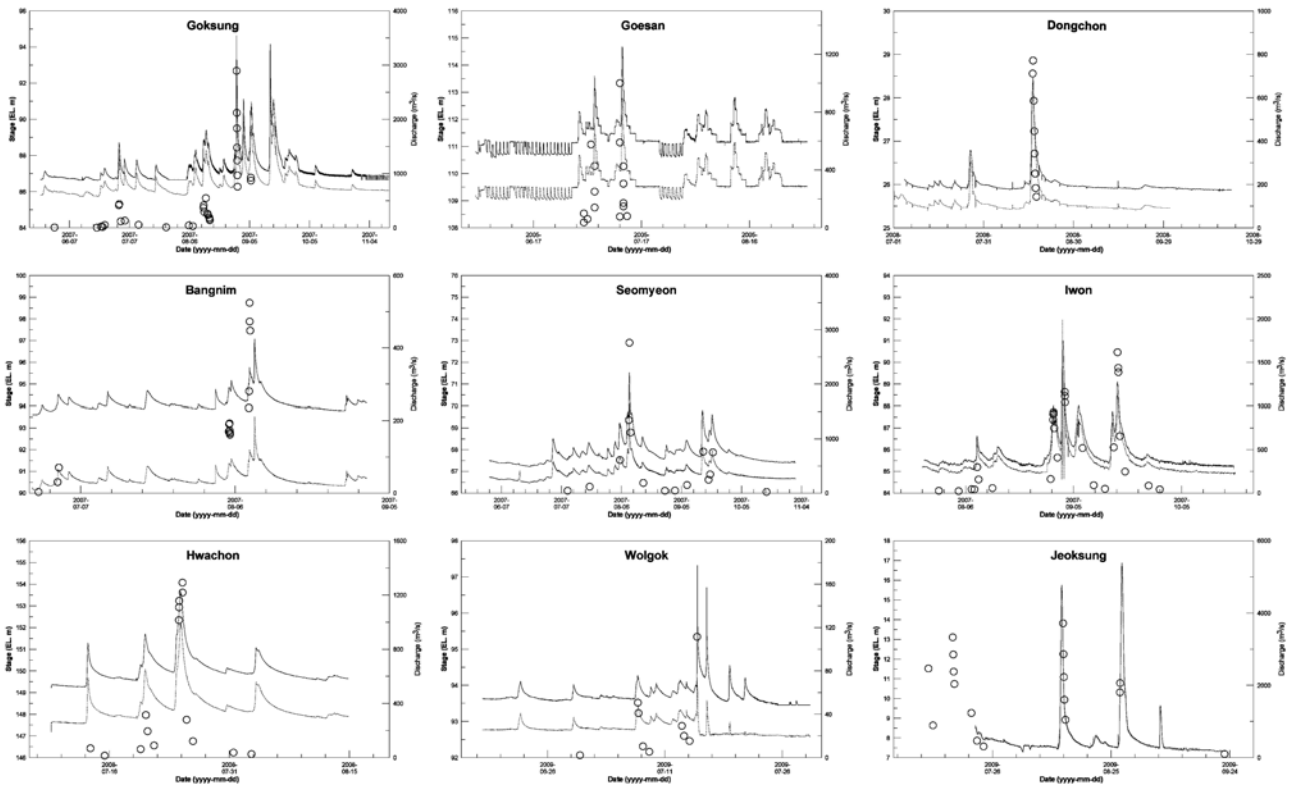


그림 2. 각 지점에서의 수위와 유량 실측

는 수준 측량을 통해 연결되어 상대표고가 결정되었으며, 이를 통해 동시간대의 수면 차이가 연속적으로 계산되었다. 다만, 동춘, 이원, 적성 지점에서는 하류 단면에 이미 설치되어 운영되고 있는 국토해양부의 수위관측소 자료를 이용하면, 이 때의 정밀도는 1 cm 이다. 수위 측정은 최소 15분 간격으로 실시하였다. 유량은 지류의 유입이 없거나 상대적으로 미미한 상류 또는 하류에 위치한 관측소에서 수위 측정과 동시에 실측한 자료를 이용하였으며, 서면 지점의 경우 2006년에 개발된 수위-유량관계식에 의해 계산된 유량을 이용하였다. 유량 측정 성과도 그림 2에 표시되어 있다.

4. 결과 및 분석

4.1 유량에 따른 조도계수 변화

실측 자료를 이용하여 유량에 따른 조도계수를 산정한 결과는 그림 3과 같다. 9개 지점 모두에서 조도계수는 유량이 증가하면서 대체로 일정하게 감소하다가 점차 조도계수가 수렴하는 특징을 나타내고 있다. 이러한 특징은 기존의 연구에서 나타난 경향과 대체로 일치한다. 유량의 증가는 유속과 수심의 증가를 야기하므로 이에 따라 하상의 흐름 지체 효과가 상대적으로 감소하게 된다. 본 연구의 9개 지점은 모두 실측 범위에서는 단단면 하도의 성격을 가지므로 단면 변화에 기인한 조도계수의 일시적 증가가 거의 발생하지 않은 것도 한 원인으로 볼 수 있다.

그림 3에서 볼 수 있는 다른 한 가지 특징은 곡성, 괴산, 화촌 등 3개 지점의 경우 유량에 따른 조도계수의 감소 정도가 큰 반면, 다른 6개 지점은 조도계수가 유량에 따라 보다 완만하게 감소하여 하천에 따라 다른 특성을 반영하는 것으로 보인다. 두 그룹의 자료에 대한 회귀식을 보면, 유량

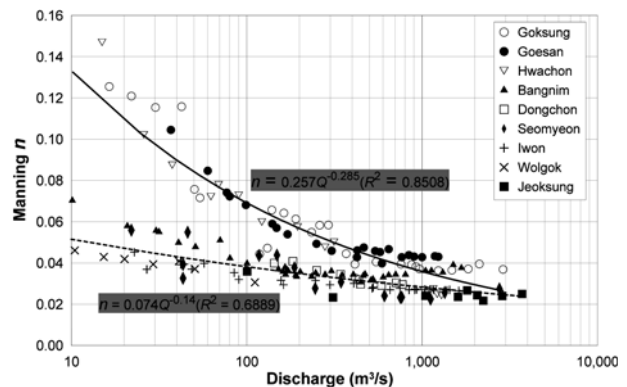


그림 3. 유량에 따른 조도계수의 변화

에 따른 조도계수의 감소 정도(기울기)가 거의 2배에 달한다는 것을 알 수 있다. 또한 y 절편의 경우에도 곡성, 괴산, 화촌 등 3개 지점은 0.257에 달하는 반면, 나머지 6개 지점은 0.07 정도로 확연한 차이가 발생하고 있다. 이러한 차이를 쉽게 설명할 수는 없지만, 두 그룹에서 볼 수 있는 뚜렷한 차이가 있다. 즉, 곡성, 괴산, 화촌 지점은 구간 거리가 길면서 구간 내에 여울과 웅덩이가 반복되고 있다. 이로 인해 유량이 매우 적은 저수시에 상하류 단면 간에 수면경사가 선형적인 특성을 나타내지 않으므로 조도계수를 NCALC 모형으로 계산할 때 조도계수가 과다하게 계산될 수 있다. 그러므로 이러한 조건을 가지는 하천에서는 저수시에 하도의 긴 구간을 하나로 보고 조도계수를 산정하기 보다는 여울과 웅덩이 구간을 구분하여 별도의 조도계수를 산정하는 것이 더 타당할 것으로 생각된다. 이와 관련하여 이찬주 등(2008)은 호박돌 하천에서 경사면적법을 이용한 유량 산정시에 여울과 웅덩이와 같은 구간 특성에 따라 뚜렷한 조도계수의 차이가 있음을 지적한 바 있다.

4.2 수심에 따른 변화를 고려한 조도계수의 특성

하도의 흐름 저항에 관련되는 요소에는 하상재료, 하상과, 하도의 불규칙성, 만곡, 거석이나 장애물, 식생 등이 있다. 이들 중에서 자갈하천은 하상과의 변화의 영향이 상대적으로 적다는 점을 고려하면 가장 객관적으로 정량화시킬 수 있고, 유용성이 가장 큰 것은 하상재료에 관계된다. 만일 다른 요인들이 통제되는 조건, 즉 직선에 가깝고 규칙적인 단면을 가지고 있으며, 장애물이나 식생이 없는 하도에서는 하상재료가 1차적이면서도 대부분의 흐름 저항의 요인이 된다고 할 수 있다. 그런데, 하상재료가 흐름을 지체시키는 효과는 수심이 깊은 흐름보다는 수심이 얇은 흐름에서 더욱 크다는 점이 조도계수의 산정시 고려되어야 한다(Limerinos, 1970). 이로 인해 기존의 연구들은 상대수심에 주목하였다. 본 연구에서도 역시 이 점을 반영하여 상대수심에 따른 조도계수 특성을 살펴보고자 하였다. 이 때 조도계수를 나타내는 값으로는 일반적인 n 을 사용하지 않고 Darcy-Weisbach 마찰계수와 직접 비교하는 조도인자 $n/R^{1/6}$ 로 변환하여 사용하였다.

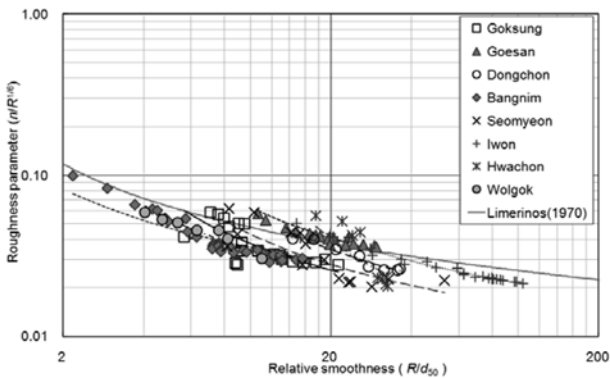
그림 4는 9개 하천의 실측 자료를 상대수심(relative smoothness, R/D)과 조도인자와의 관계에서 지점별로 도시한 그림이다. 그림 4(a)는 대표입경을 D_{50} 으로 채택한 경우이고, 4(b)는 D_{84} 를 이용한 경우이다. 적성 지점은 모래의 비중이 커서 D_{50} 분석에는 포함되지 않고 D_{84} 를 이용한 경우만 포함되었다. 또한 앞의 4.1절에서 여울과 웅덩이의 영향으로 수면경사가 선형적인 특성을 나타내지 않아 조도계수가 다소 크게 산정되는 것으로 파악되었던 곡성, 괴산, 화춘 지점의 저수시 자료는 본 분석에서는 제외하였다. 그림 4의 (a), (b)에서 중간의 회색선은 Limerinos 식을 나타내며, 참고로 제시되어 있다.

그림 4에서 나타나는 전체적인 경향은 상대수심이 증가함

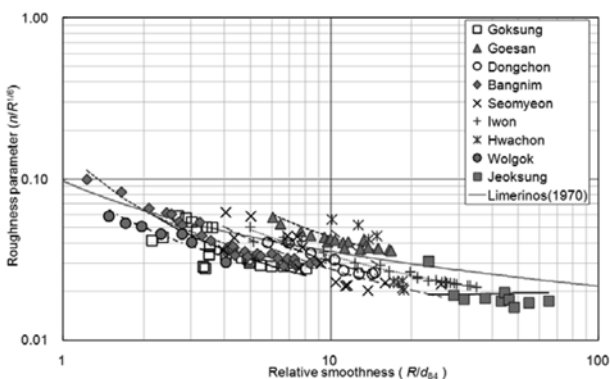
에 따라 조도인자가 감소한다는 점이다. 이 결과는 유량에 따라 조도계수가 감소하였던 그림 3에서의 경향과 일치한다. 또한 상대수심 증가에 따라 조도인자가 감소하는 기울기 역시 지점별로 비슷하다. 그런데, Limerinos 식의 기울기를 기준으로 보면, 방림과 월곡 지점 정도를 빼고는 대개 좌상에서 우하 방향으로 Limerinos 식과 교차하는 양상을 나타내고 있고 그 기울기는 약간 크게 나타났다. 자료의 분포 관점에서 D_{50} 을 나타내는 그림 4(a)에서는 괴산, 곡성, 화춘 지점의 일부 자료만이 Limerinos 식의 위쪽으로 분포하는 반면, D_{84} 를 나타내는 그림 4(b)에서는 괴산 자료의 대부분과 화춘, 서면, 방림, 이원 지점의 일부 자료가 Limerinos 식의 위쪽에 분포한다. 그리고 기타 지점에서 자료가 Limerinos 식의 아래쪽에 분포하는 것으로 나타났는데, 이로 볼 때 더 많은 지점에서 조도인자가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 한편, 방림, 월곡 지점은 상대수심이 비교적 작고 조도계수가 높은 쪽에, 이원, 적성 지점의 경우 상대수심은 깊고 조도계수가 낮은 쪽에 분포하여 하천의 특성에 따라 분포의 위치가 변한다는 점도 나타나고 있다.

그림 5는 적성 지점을 제외한 8개 지점 자료를 모두 이용하여 전체적이고 보다 일반화된 경향을 도출할 목적으로 도시하였다. 그림 5(a)는 D_{50} 을 기준으로 한 것이고 그림 5(b)는 D_{84} 를 대표입경으로 채택한 경우이다. 그림 5(a)와 5(b)를 비교하여 보면, D_{84} 를 기준으로 한 그림 5(b)가 Limerinos 식을 중심으로 더 고른 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 지점별로 분석할 경우와는 달리 상대수심 증가에 따른 조도인자의 감소 정도인 기울기 역시 전체적으로 보면 Limerinos 식의 기울기와 비슷한 것을 알 수 있다.

이러한 특성을 보다 자세히 분석하기 위해, Limerinos 식과 본 연구의 실측 자료를 이용하여 구한 경험식을 비교하고자

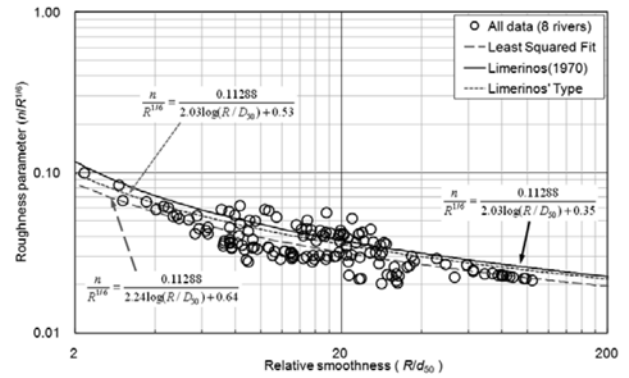


(a)

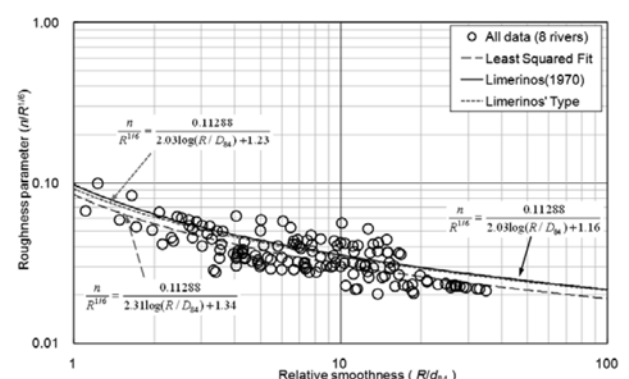


(b)

그림 4. 대상 지점별 상대수심과 조도인자와의 관계



(a)



(b)

그림 5. 상대수심과 조도인자에 관한 적합식 비교

표 3. 상대수심에 따른 조도계수 산정식

구분	대표입경	식	RMSE	
Limerinos(1970)	D_{50}	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{R}{D_{50}}\right) + 0.35$	(7) 0.235	
	D_{84}	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{R}{D_{84}}\right) + 1.16$	(8) 0.229	
본 연구	최소자승법 적합식	D_{50}	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.24 \log\left(\frac{R}{D_{50}}\right) + 0.64$	(9) 0.247
		D_{84}	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.31 \log\left(\frac{R}{D_{84}}\right) + 1.34$	(10) 0.248
	상수 b 에 이론값 사용 (Limerinos Type)	D_{50}	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{R}{D_{50}}\right) + 0.53$	(11) 0.225
		D_{84}	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{R}{D_{84}}\right) + 1.23$	(12) 0.228

하였다. Limerinos(1970)는 상대수심과 조도인자와의 관계에 대한 Chow(1959), Vennard(1961) 및 Leopold와 Wolman(1957)의 연구를 토대로 다음과 같은 형태로 상대수심과 조도인자의 관계를 나타내는 일반식을 수립하였다(식 4).

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0.1128}{a + b \log\left(\frac{R}{D_r}\right)} \quad (4)$$

여기서 a 와 b 는 상수이며, 이중 상수 b 는 연직유속분포가 대수법칙을 따른다고 할 경우, 대수식에 von Karman 상수 (κ)를 0.4로 대입하고 $1/\sqrt{f}$ 와 $n/R^{1/6}$ 사이 관계를 아래 식 (5)에 따라 변환하여 2.03으로 계산할 수 있다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} = \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{f}} \quad (5)$$

여기서 u 는 하상에서 수직거리 y 에서의 유속이고, u_* 는 전단유속이며 y_0 는 특성길이이다. 식 (6)은 식 (4)와 식 (5)를 결합하여 얻어지는 식으로 Manning 조도계수와 마찰계수 사이의 변환식이다.

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

여기서 K_n 은 Manning 식의 단위에 따라 사용되는 계수이고, g 는 중력가속도이다. 본 연구에서는 SI 단위를 사용하므로 K_n 값에 1.0을 사용한다. Limerinos는 캘리포니아주의 11개 하천에 대한 실측 자료를 토대로 경험식을 도출한 결과 상수 b 가 2.03에서 크게 변하지 않음을 확인하였으며, Leopold와 Wolman(1957)의 경우 현장 조사 결과를 토대로 2.0을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 실측 자료를 활용하여 일반식(식 4) 형태를 가지는 두 가지 적합식을 도출하였다. 그 하나는 단순한 최소자승법 적합식으로 상수 a 와 b 가 모두 회귀분석을 통해 도출하였고, 다른 하나는 Limerinos 식과 마찬가지로 상수 b 를 이론적인 유도값인 2.03으로 고정된 적합식인데, 실측치와의 RMS 오차가 가장 작아지도록 상수 a 를 결정하였다. 대표입경 D_{50} 과 D_{84} 에 대해 구한 식이 표 3에 제시되어 있다.

표 3을 보면, 최소자승법 적합식과 Limerinos 형의 식 모두에서 D_{50} 과 D_{84} 에 대한 RMS 오차가 거의 같게 나타났다. Limerinos 식의 경우 큰 차이는 없지만, D_{84} 의 오차가 다소 작게 나타났다. 기존 연구에서는 자갈하천의 흐름 저항이 하상을 구성하는 큰 입자에 의해 주로 영향을 받으므로 D_{84} 가 대표입경으로 보다 적절하다는 연구(Leopold와 Wolman, 1957; Limerinos, 1970)가 있는 반면, 다른 연구(Bray, 1987)에서는 D_{50} 을 이용한 식이 실측 자료와의 오차가 작다고 보고하고 있다. 본 연구에서는 두 가지 대표입경 사이에 차이가 거의 없으므로 두 가지 대표입경을 모두 사용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

표 3에서 최소자승법에 의한 적합식의 경우 본 연구의 상수 b 값은 D_{50} 기준으로는 2.24, D_{84} 기준으로는 2.31로 나타났다. D_{50} 을 기준으로 볼 때, 외국의 사례인 Limerinos(1970), Bray(1979), Griffiths(1981) 및 Leopold와 Wolman(1957) 등에서 제안한 경험식의 범위인 1.98~2.36와 유사한 것으로 나타났다. 또한, 상수 b 를 이론적으로 유도된 값인 2.03으로 고정하여 구한 Limerinos형 식의 경우 상수 a 가 D_{50} 기준으로는 0.53, D_{84} 기준으로는 1.23으로 Limerinos 식의 상수 a 값(0.35, 1.16)과 근사하며 약간 조도계수를 작게 산정하는 식이 된다. 특히, D_{84} 식의 경우 그림 5에서 알 수 있는 것처럼 Limerinos 식과 거의 일치한다. 이는 역으로, 외국에서 개발되어 비교적 널리 쓰이는 식인 Limerinos 식이 국내 하천에도 잘 적용될 수 있음을 의미한다.

4.3 수심에 따른 변화가 없는 조건에서 조도계수의 특성

실측한 각 하천별로 특정한 유량 및 그 이상의 조건이 되면, 유량에 따른 조도계수가 대체로 일정해지는 것으로 나타났다(그림 3), 이는 달리 말하면, 수심에 따른 조도계수의 변화가 미미해지는 조건이 발생한다는 것을 의미한다. 본 연구의 대상하천들은 측정된 수위 범위에서 단단면 하도의 특성이 크게 지배하므로 강터 월류나 식생에 의한 조도계수의 변화는 상대적으로 미약하게 반영되었을 것으로 판단된다. 그러므로 일정하게 수렴한 조도계수값은 주로 하상재료에 의

표 4. 실측 조도계수와 여러 식들에 의해 계산된 조도계수

지점	실측치	D_{50}			D_{90}	
		Strickler (1923)	Bray (1979)	Keulegan (1938)	Bray (1979)	Meyer-Peter & Muller (1948)
곡성	0.038	0.037	0.046	0.031	0.048	0.037
괴산	0.045	0.034	0.042	0.028	0.041	0.031
화춘	0.026	0.031	0.038	0.026	0.039	0.029
방림	0.034	0.032	0.039	0.027	0.040	0.030
이원	0.027	0.027	0.032	0.022	0.037	0.028
서면	0.026	0.030	0.036	0.025	0.037	0.028
동춘	0.031	0.030	0.036	0.025	0.039	0.030
월곡	0.034	0.032	0.039	0.026	0.042	0.032
적성	0.024	0.017	0.020	0.014	0.036	0.027

표 5. 하상재료에 의한 조도계수 산정식

구분	대표입경	식	RMSE	
Strickler(1923)	D_{50}	$n = 0.047D_{50}^{1/6}$ (13)	0.0050	
Bray(1979)	D_{50}	$n = 0.0593D_{50}^{0.179}$ (14)	0.0072	
	D_{90}	$n = 0.0495D_{90}^{0.16}$ (15)	0.0094	
Keulegan(1938)	D_{50}	$n = 0.039D_{50}^{1/6}$ (16)	0.0081	
Meyer-Peter와 Muller(1948)	D_{90}	$n = 0.038D_{90}^{1/6}$ (17)	0.0050	
본 연구	1/6 승 적용식	D_{50}	$n = 0.049D_{50}^{1/6}$ (18)	0.0047
		D_{84}	$n = 0.042D_{84}^{1/6}$ (19)	0.0047
		D_{90}	$n = 0.040D_{90}^{1/6}$ (20)	0.0048
	최소자승법 적합식 (LSF)	D_{50}	$n = 0.041D_{50}^{0.102}$ (21)	0.0047
		D_{84}	$n = 0.48D_{84}^{0.256}$ (22)	0.0046
		D_{90}	$n = 0.045D_{90}^{0.268}$ (23)	0.0047

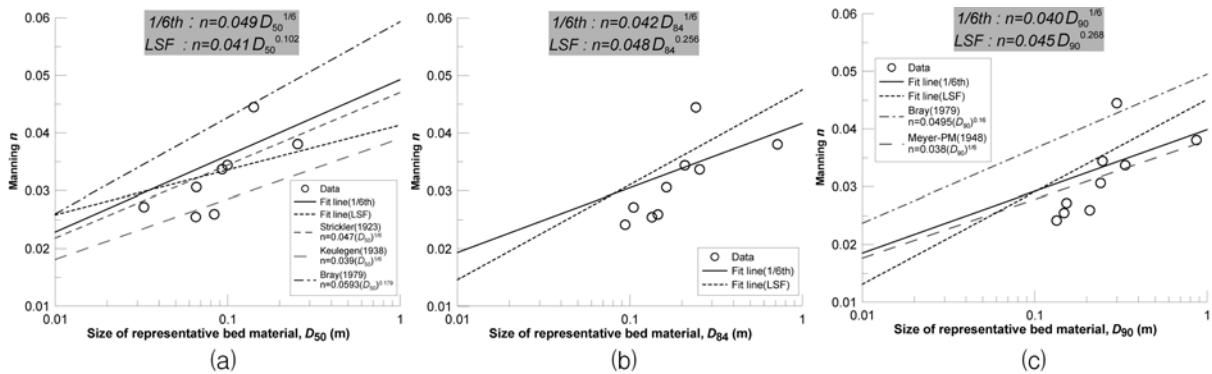


그림 6. 하상재료 입경에 따른 Strickler형 조도계수 산정식

한 마찰을 나타내고 있다고 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 그림 3에서 조도계수가 대체로 수렴하는 조건에 해당하는 자료를 이용하여 지점별로 기하평균을 구한 후 입경 특성과 연관시켜 보았다.

각 지점별로 구한 조도계수는 0.024~0.045 범위에 있었으며, 이는 하상재료 입경을 이용하는 몇 가지 경험식으로 산정된 조도계수와 비교하여 제시하였다(표 4). 또한 각 지점별로 구한 조도계수값을 이용하여 하상재료의 입경만을 변

수로 고려한 적합식도 제시하였다(표 5, 그림 6). 다만, 본 연구의 실측 자료의 수가 적어 다른 하천에 적용할 정도로 일반적인 특성이라고 하기에는 미흡하므로, 보다 널리 활용되기 위해서는 많은 수의 지점 자료가 보충될 필요가 있다. 대표입경에 기초한 조도계수식은 두 가지로 구분하여 작성하였는데, 하나는 Strickler(1923) 등의 식과 동일하게 대표입경과 조도계수와의 관계에서 지수값을 1/6승으로 고정하고 계수값만을 적합한 식이고, 다른 하나는 최소자승법으로 지

수값과 계수를 모두 적합시킨 식(Least squared fit, LSF)이다. 지수값을 1/6승으로 고정하여 적용할 경우 계수는 D_{50} 에서 0.049로 나타났는데, 이 수치만 보면 D_{50} 을 채택한 3가지 식 중에 Strickler 식과 가장 근접한 결과이다. D_{84} 를 이용한 식의 경우 비교할 식이 없으므로 본 연구의 식만을 제시하였다. D_{90} 을 대표입경으로 취할 경우 계수값은 0.040으로 이는 Meyer-Peter와 Muller(1948)식의 계수와 가장 유사하다. 한편, 지수값과 계수를 모두 실측 자료에 적합시킨 식의 경우 지수값은 기존의 연구와는 상당히 다른 범위를 나타내고 있는데, 이는 자료의 수가 적은 조건에서 다른 지점의 자료들과 다소 경향성이 다른 한 지점의 자료(D_{50} 의 경우는 적성, D_{84} 의 경우는 괴산)만으로도 경험식의 기울기가 큰 영향을 받기 때문으로 보인다.

기존 연구에서 제시한 식과 본 연구에서 제시한 식을 실측 자료와 비교하여 RMS 오차를 계산하여 본 결과, 기존 식 중에서는 Strickler 식과 Meyer-Peter와 Muller(1948)식의 RMSE가 0.005로 가장 낮게 나타났고, 본 연구에서 유도한 적합식은 1/6승을 적용한 식과 최소자승법 적합식 모두 0.0047 정도로 비슷하게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내의 9개 자갈하천에서 실측한 자료를 이용하여 Manning 조도계수를 산정하고 그 특성을 분석하고자 하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1. 조도계수는 대체로 유량이 증가하면서 감소하는 특성을 나타내며, 일정한 유량에 이르면 대체로 수렴하는 경향을 나타냈다. 유량에 따른 조도계수의 감소 정도는 하천에 따라 다르게 나타나 하천의 특성을 반영하는 것으로 판단된다.
2. 조도계수에 미치는 수심의 영향을 고려하기 위해 상대수심과 조도인자의 관계를 분석하였다. 조도인자는 상대수심 증가에 따라 감소하는 특성을 나타내고 있고, 지점에 따라 그 범위와 감소의 기울기가 다소 다르게 나타났다. 적성 지점을 제외한 8개 지점을 함께 고려하여 경향성을 파악하고자 최소자승법 적합식과 Limerinos 형의 적합식을 구하여 실측 자료와 비교하였으며, 그 결과 본 연구의 자료 및 이를 이용하여 구한 적합식이 기존의 대표적인 식인 Limerinos(1970)의 식과 상당히 비슷함을 알 수 있었다. 이는 역으로 외국에서 비교적 널리 활용되고 있는 Limerinos 식이 국내 하천에도 잘 적용될 수 있음을 의미한다.
3. 9개 지점의 하천에 대해 수심에 따른 변화가 거의 없어 지고 수렴하는 조건을 기준으로 단일한 값을 산정한 결과 조도계수는 대체로 0.024~0.045 범위에 있는 것으로 나타났다. 이들 자료를 이용하여 하상재료의 입경만을 고려한 식을 도출할 경우 1/6승을 갖는 식 중에 D_{50} 기준으로는 Strickler(1923)의 식과 근사하고, D_{90} 기준으로는 Meyer-Peter와 Muller(1948)과 가장 유사한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 외국에서 개발된 조도계수 산정식을 국내 하천의 실측 자료를 이용하여 폭넓게 비교, 검증한 한 사례이다. 향후 보다 많은 하천의 실측 결과가 추가된다면 조도계수의 산정 실무에 활용성이 기대된다.

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김지성, 이찬주, 김 원(2007) 실측 수위에 의한 자갈하천의 조도 계수 산정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 755-768.
- 김지성, 김용진, 이찬주, 김 원(2009) 등가조도를 이용한 자갈하천의 하상저항 산정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제8호, pp. 619-629.
- 유권규, 김형섭, 김활곤, 우효섭(1993) 총적하천의 하상마찰 변화에 대한 조사·분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제4호, pp. 111-121.
- 이찬주, 김 원, 김지성(2007) 국내하천의 조도계수 산정 방법 조사, 2007년 **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 966-970.
- 이찬주, 김지성, 김치영, 김동구(2008) 자갈하천에서 연속적인 수위 자료를 이용한 경사면적법 유량 산정-달천 사례연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 503-515.
- Bray, D.I. (1979) Estimating average velocity in gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1122.
- Chow, V.T. (1959) *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, p. 680.
- Colebrook, C.F. and White, C.M. (1937) Experiments with fluid friction in roughened pipes, *Proceedings of Royal Society*, Vol. 161, p. 367.
- Coon, W.F. (1995) *Estimates of roughness coefficients for selected natural stream channels with vegetated banks in New York*, USGS Open-file report 93-161.
- Dalrymple, T. and Benson, M.A. (1968) Measurement of peak discharge by the slope-area method, *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigation*, book 3, Chapter A-2, p. 12.
- Garde, R.J. and Raju, R.K.G. (1978) *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*, Wiley Eastern, New Delhi.
- Griffiths, G.A. (1981) Flow resistance in coarse gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 7, pp. 899-918.
- Hey, R.D. (1979) Flow resistance in gravel-bed rivers, *Journal of hydraulics division, Proceedings of American Society of Civil Engineers*, Vol. 105, No. HY4, pp. 365-379.
- Hicks, D.M. and Mason, P.D. (1991) *Roughness characteristics of New Zealand Rivers*, DSIR Marine and freshwater, Wellington.
- International Organization for Standardization, (1992) *Liquid flow measurement in open channels-Sampling and analysis of gravel-bed material*, International Organization for Standardization, p. 10.
- 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. *Journal of Research National Bureau of Standards*, 21(Research Paper 1151), pp. 707-741, Washington, D.C.
- Leopold, L.B. and Wolman, M.G. (1957) *River channel patterns: braided, meandering, and straight*, U.S. Geological Sur-

- vey Professional Paper 282-B, 85p.
- 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. *Proceedings of 3rd Meeting of IAHR*, Stockholm, Sweden, pp. 39-64.
- Neill, C.R. and Hey, R.D. (1982) Gravel-bed rivers: engineering problems, *Gravel-bed rivers*, Ed. by Hey, R.D., Bathurst, J.C., Thorne, C.R., John Wiley & Sons, pp. 15-25.
- Strickler, A. (1923) Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhgigkeitszahlen 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).
- Vennard, J.K. (1961) *Elementary fluid mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 297-298.
- (접수일: 2009.3.30/심사일: 2009.4.27/심사완료일: 2010.2.19)