

수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구

A Study on Roughness Coefficient Estimations in Gravel Bed Stream without Water Level-Discharge Data

이 신 재* / 박 상 우**

Lee, Sin Jae / Park, Sang Woo

Abstract

This study developed a model that could calculate equivalent roughness using shear stress acting on distributed grains in gravel bed stream. The estimated equivalent roughness by the model developed was used for estimation of water level and roughness coefficient in the stream without water level-discharge data. The model was applied to the Gurey-Songjeong stage station section located in the Sunjin river mid-downstream. The equivalent roughness by the model developed in this study was estimated to be 0.194m at the Gurey stage station. Calculated water level which the estimated equivalent roughness was applied to the flow model was shown error of within 6% in comparison with observed water level. Also, roughness coefficient was estimated using observed and calculated water level about each discharge scale by unsteady flow analysis. As a result, error of roughness coefficient estimated by observed and calculated water level was shown error of 0~0.002 and could consider variability of roughness coefficient.

keywords : gravel bed stream, equivalent roughness, shear stress, roughness coefficient

요 지

본 연구는 자갈하천에서 하상에 분포하는 입자에 작용하는 전단력을 이용하여 등가조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 산정된 등가조도는 수위-유량자료가 부재한 하천에서 유량에 대한 수위를 산정하고 조도계수를 산정하는데 이용하였다. 대상하천은 섬진강의 중·하류부인 구례수위표와 송정수위표 구간으로 선정하였다. 등가조도는 개발된 모형에 의해 구례수위표지점에서 0.194m가 산정되었다. 산정된 등가조도를 흐름모형에 적용하여 계산된 수위-유량자료를 관측된 자료와 비교한 결과 6% 이내의 오차를 보였다. 조도계수는 대상구간에 대해 부정류 해석을 실시하여 유량규모별로 계산된 수위와 관측된 수위에 대해 산정하였다. 그 결과 관측된 수위와 계산된 수위에 의해 산정된 조도계수는 0~0.002의 오차를 보였고, 조도계수의 가변성도 고려할 수 있었다.

핵심용어 : 자갈하천, 등가조도, 전단력, 조도계수

1. 서 론

조도계수는 평균유속, 흐름저항, 하상입자의 이동, 하

상의 변화 등의 흐름특성을 규명하는데 중요한 물리적 요소이다. 그렇지만 조도계수는 어떤 특정한 요인에 의해 결정될 수 있는 것이 아니라 하상입자들의 특성, 식

* 서남대학교 토목공학과 박사수료

Doctorate Candidate, Dept. Civil Engrg., Seonam Univ., Namwon 590-711, Korea (e-mail: hydrosnu@seonam.ac.kr)

** 서남대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. Civil Engrg., Seonam Univ., Namwon 590-711, Korea (e-mail: psw0232@seonam.ac.kr)

생 상태, 수로단면의 변화 및 만곡 등에 의해 영향을 받고, 시간과 공간, 그리고 유량의 규모에 따라 변화하는 가변성을 갖고 있다. 이처럼 많은 요인들에 의해 조도계수는 영향을 받기 때문에 그 산정이 매우 어렵고, 아직까지도 절대적인 산정방법이 없는 실정이다(김 원 등, 1995).

지금까지의 조도계수 산정방법은 크게 세 가지로 구분될 수 있다. 첫 번째는 실측된 수위-유량자료를 이용하는 방법이고, 두 번째는 하도의 지형학적 특성이나 하상의 조도특성 등을 고려하여 경험적 또는 반 경험적으로 흐름저항 또는 조도계수를 산정하는 방법, 그리고 마지막으로 기존의 참고문헌의 표나 사진 등을 참고하는 방법이다. 이들 방법 중 가장 신뢰성이 있고 비교적 정확한 조도계수를 산정할 수 있는 방법은 첫 번째 방법으로 실측된 수위-유량자료를 이용하여 연속방정식이나 운동량방정식 등을 이용하여 해석적인 방법을 통해 주어진 유량에 대해 계산된 수위와 실측된 수위의 차가 최소가 되도록 최적의 조도계수를 산정하는 역산법이다. 국내에서는 한강하류부에 대해 부정류 해석을 통한 조도계수 산정에 대한 연구가 많이 이루어 졌으며(김원 등, 1995; 윤태훈 등, 2000; 이정규와 이창현, 2003; 김진수 등, 2005), 섬진강에 대해서는 김선민과 정관수(2005)가 연구를 하였다. 이들 연구들에서는 공통적으로 조도계수가 구간별 및 유량규모별로 가변성을 갖고, 또한 유량이 증가할수록 조도계수는 감소하다가 어느 한계유량이상이면 조도계수의 감소폭이 줄면서 점차 일정한 조도계수를 갖는 결과를 도출하였다. 그러나 이 방법은 수위-유량자료가 없는 하천에서는 적용할 수 없는 방법으로 조도계수의 산정을 위해서는 대상유량에 대한 수위의 산정이 필요하다.

대상유량에 대해 수위를 산정하기 위해서는 흐름에 대한 저항계산이 필수적이다. 이를 위해서는 하천에서 흐름저항을 야기하는 요소들의 특성치인 조도의 계산이 필요한데 일반적으로 조도는 등가조도(k_s) 또는 조도높이(z_0)로써 나타낼 수 있다. 특히 단면의 변화가 적고 직선하도를 가진 자갈하상에서는 흐름저항이 대부분 하상경계마찰에 의해 지배를 받게 된다(Thorne and Zevenbergen, 1985; Martin, 2003). 즉, 하상표면을 구성하고 있는 모래나 자갈 등의 모든 구성입자들에 의해 흐름저항을 받는다고 할 수 있다. 자갈하상을 갖는 하천에 대해 기존의 흐름저항연구는 Limerinose(1970)와 Hey(1979), Brownlie(1983) 등이 있는데, 이들은 하상에 대한 흐름저항을 특정입도에 의한 상대조도(relative roughness)를 이용하여 방정식으로 제시하였다. 이러한 연구들은 전체적인 하상에 분포하는 입자에 의해 작용

하는 흐름저항을 통계분석에 의해 특정입도에 의한 영향으로 간주하여 분석한 것으로 각기 다른 하상입도분포 및 특성을 가진 하천에 대해 일률적으로 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 수위-유량자료가 없고 자갈하상을 갖는 하천에 대해 각 유량에 대한 조도계수를 산정하기 위해 다음과 같은 연구를 하였다. 흐름저항은 하상의 표면마찰에 의해서만 영향을 받는다는 가정하에 등가조도(k_s)를 기존의 경험공식들과 달리 어떤 특정입도만으로 구하지 않고 하상에서 하상토를 채취하고 입도분석한 자료를 이용하여 하상의 각 입자에 작용하는 전단력을 통해 구하고자 한다. 그리고 대상유량에 대해 수위를 산정하기 위해 Wark et al.(1990)이 제시한 비균일 하도단면의 단위폭당 유량에 대한 흐름의 운동량방정식과 연속방정식을 결합한 모형에 본 연구에서 산정한 등가조도 k_s 를 적용하여 수위를 산정하고 관측된 수위와 비교·검토하였다. 끝으로 계산된 수위의 적정성이 확인되면 이를 이용하여 대상구간에 대해 부정류 해석을 실시하여 조도계수를 산정하고자 한다.

2. 계산모형

2.1 흐름모형

비균일한 하도단면을 갖는 하천의 흐름분석을 위해서는 흐름의 측방분포에 대한 해석이 필요하다. Wark et al.(1990)은 수위와 유량간의 관계곡선을 작성하기 위해 정상등류이면서 단면의 측방의 수면은 수평이라는 가정하에 홍수터 또는 복합단면을 갖는 하천에서의 단위폭당 유량 q (m^3/s)에 대해 흐름의 연속방정식과 운동량방정식을 결합한 간단한 흐름모형을 제시하였다.

정상등류흐름에서 경계면의 마찰과 평균유속과의 관계에 널리 이용되는 공식은 Darcy-Weisbach의 마찰저항식으로 Eq. (1)과 같다. Eq. (1)은 단위폭당 유량 q (m^3/s)와 전단력에 대한 횡방향 경사를 고려하고 횡방향(x)의 확산에 대한 운동량을 고려하면 Eq. (2)와 같은 흐름모형이 된다.

$$f = \frac{8gys}{v^2} \quad (R=y : \text{광폭수로}) \quad (1)$$

$$gys - \frac{B_s f q^2}{8y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial q}{\partial x} \right) = 0 \quad (2)$$

Gravity Bed shear Lateral shear

수인데 완전 거친 난류흐름에서는 8.5의 값이 사용된다. Eq. (6)에 von Karman 상수 0.4와 적분상수 8.5의 값을 대입하여 풀면 Eq. (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{u_{y'}}{u^*} &= 2.5 \ln\left(\frac{y'}{k_s}\right) + 8.5 = 2.5 \ln\left(\frac{30y'}{k_s}\right) \\ &= 5.75 \log\left(\frac{30y'}{k_s}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Eq. (7)은 이론적으로 하상으로부터 높이 y' 가 $k_s/30$ 이면 유속 $u_{y'}$ 는 0이 되므로 유속분포의 기준면은 하상으로부터 $k_s/30$ 인 지점이 된다. 그리고 Eq. (6) 또는 Eq. (7)과 같은 대수법칙은 전체수심 y 에 대해 하상으로부터 거리 $0.2y$ 이하의 내부영역에서만 적용할 수 있고, 그 이상의 영역에서는 실제의 유속분포와 많은 편차를 보인다고 알려져 있다(Pope, 2000). 즉, 하상바닥층의 입자에 의해 저항을 받는 영역에서 적용이 가능하다고 할 수 있다.

2.2.2 입자 전단력

하상표면에서 유체의 흐름에 의한 전단력 τ 는 하상표면에 돌출된 입자들에 의해 산정할 수 있는데, 이는 유체의 흐름에 의해 돌출된 입자들에 작용하는 힘인 항력(Drag Force ; F_D)과 같다고 할 수 있다(Petryk and Bosmajian, 1975). 항력은 Eq. (8)과 같이 항력계수 C_D 와 흐름에 직각으로 투영된 단면적 A , 그리고 물체에 부딪히는 평균유속 u_r 로 구할 수 있다.

$$\tau = F_D = C_D A \frac{\rho u_r^2}{2} \quad (8)$$

여기서 항력계수 C_D 는 입자의 형상마다 다른 값을 갖게 되는데, 완전 난류흐름에서는 구형의 경우 0.5의 값을 가지게 된다(Coleman, 1967). 실제 하상에 분포하는 입자는 입자 전체가 유수의 흐름에 노출되는 것이 아니라 입자끼리 서로 접촉되어 있으므로 실제 유수의 흐름

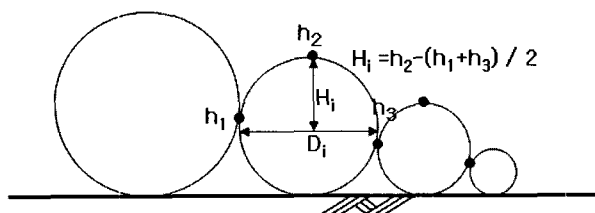


Fig. 2. Protrusion height of Regularly Arranged Heterogeneous Size Grains(Gomez, 1993)

에 돌출되는 높이는 입자직경 D 보다 작은 높이가 되고, 실제 하상은 입자의 접촉점들로 간주할 수 있다. 따라서 항력계수는 0.5의 값이 아닌 입자의 접촉점으로부터 돌출된 높이에 따라 다른 값을 가져야 한다. 이를 위해 Martin(2003)은 하상입자가 구형을 갖는다는 가정하에 입자의 상대내뿔 H/D (relative protrusion)에 대한 항력계수 C_D^* 를 Nikuradse(1933)와 Coleman(1967)의 자료를 이용하여 Eq. (9)와 같이 상대내뿔 H/D 의 함수인 C_D^* 를 지수식으로 제시하였다.

$$C_D^* = 0.54(1 - \exp(-2.6 \frac{H}{D})) \quad (9)$$

여기서 D 는 입자의 직경이고, H 는 직경 D 를 갖는 입자의 돌출 높이이다.

항력계수 C_D^* 를 산정하기 위해서는 하상의 각 입자에 대한 돌출높이를 측정하여 상대내뿔을 산정해야 한다. 이와 관련하여 Gomez(1993)는 입자크기가 다른 경우 각 입자의 돌출높이를 Fig. 2와 같이 제시하였으나 실제하상에서는 실험실에서와 달리 모든 입자의 돌출높이를 측정하기가 매우 어렵다. 그러나 만일 Fig. 3과 같이 하상에 동일한 크기의 입자가 분포되어지면 돌출높이 H_i 는 $0.5D_i$ 가 되며, 실제 하상의 경우 각기 다른 크기의 입자들이 전 하상에 고루 분포되었다면 각 입자의 돌출높이 H_i 는 평균적으로 $0.5D_i$ 로 생각할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 항력계수 C_D^* 를 산정하기 위하여 각 입자의 돌출높이를 $0.5D_i$ 에서 유속이 '0'이 되는 높이 $k_s/30$ 의 값을 빼고, 이를 각 입자의 직경 D_i 로 나누어 Eq. (10)과 같이 상대내뿔을 구하고자 하였다.

$$\frac{H_i}{D_i} = \frac{0.5D_i - \frac{k_s}{30}}{D_i} \quad (10)$$

Eq. (8)에 상대내뿔의 함수인 항력계수 C_D^* 를 대입하면 개개의 입자에 대한 단위면적당 항력 또는 전단력

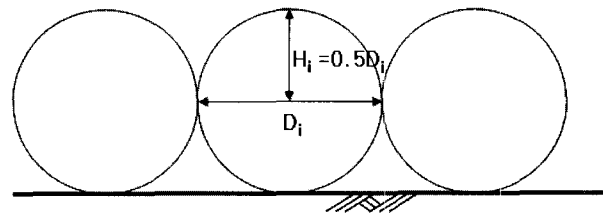


Fig. 3. Protrusion height of Homogeneous Size Grains

τ'_i 는 Eq. (11)과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\tau'_i = C_{D_i}^* \frac{\rho u_{r_i}^2}{2} \quad (11)$$

여기서 입자에 부딪히는 평균유속 u_r 를 산정하기 위해서는 입자의 내뿔에 대한 평균유속이 작용하는 높이 y'_r 를 알아야 한다. 경험적으로 입자의 직경 D 에 대하여 Einstein과 El-Sammi(1949)의 $y'_r = 0.35D$, Coleman(1969)의 $y'_r = 0.5D$ 를 제시하고 있어 이의 중간 정도의 값인 $y'_r = 0.4D$ 를 생각할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 입자의 직경 D 대신에 입자의 돌출높이 H_i 와 유속이 '0'이 되는 높이 $k_s/30$ 을 고려하여 $y'_r = 0.4H_i + k_s/30$ 로 하고 이를 Eq. (7)의 y' 에 대입하여 평균유속 u_r 에 대한 식은 Eq. (12)와 같이 나타냈으며, 이에 대한 입자에 작용하는 유속분포 및 평균유속의 위치를 도시하면 Fig. 4와 같다.

$$\frac{u_{r_i}}{u^*} = 5.75 \log \left(\frac{12H_i}{k_s} + 1 \right) \quad (12)$$

2.3. 모형의 구성

2.3.1 기본가정

일반적으로 자갈하상은 상류나 하류에서 인위적 또는 자연적으로 큰 지형변화가 없는 경우 하상변동이 크지 않고, 하상을 구성하는 입자들도 크게 변화하지 않는다(우효섭, 2001). 그리고 자갈하상의 흐름저항은 단면의 변화가 적고 사행이 심하지 않으면 대부분 하상표면마찰에 의해 발생한다(Thorne and Zevenbergen, 1985; Martin, 2003). 따라서 본 연구에서는 자갈하상에서 흐름저항에 대한 해석의 단순화를 위해 다음과 같은 기본가정을 하였다.

첫째, 하상의 단면변화가 크지 않고, 사행이 심하지

않으면 흐름의 저항은 하상표면의 마찰에 의해서만 발생한다. 둘째, 하상을 구성하는 입자의 형상은 구형이다. 셋째, 흐름중에는 단면의 변화가 없고, 하상표면 입자들의 구성 및 분포가 변하지 않는다. 넷째, 하상표면의 입자들에 의해 영향을 받는 내부영역의 연직유속분포는 대수분포를 따른다.

2.3.2 계산절차

본 연구에서는 자갈하상에서 하상에 분포하는 입자를 이용하여 등가조도 k_s 를 산정하고 이를 이용하여 대상유량에 대한 수위 h 를 산정하기 위해 Wark et al.(1990)이 제시한 Eq. (2)를 이용하였다. 그리고 대상유량에 대해 계산된 수위를 이용하여 조도계수를 산정하고자 한다. 계산 흐름도(Fig. 5) 및 세부적인 계산절차는 다음과 같다.

- ① 유량 Q , 마찰경사 S_f , 하상의 입도분포자료, 하천 단면자료가 초기 입력자료로 주어진다. 여기서 하상을 구성하고 있는 각 입도크기는 하상표면에 존재하는 하상도를 채취하여 체분석을 실시하고, Eq. (13)과 같이 체크기에 대한 기하평균 D_{gi} 의 값을 이용한다. 그리고 각 입도크기의 중량에 대한 구성비 F_i 를 구하며, 이때 단위하상의 모든 입도의 구성비의 합은 1이 된다($\sum F_i = 1$).

$$D_{gi} = \sqrt{D_i \times D_{i+1}} \quad (13)$$

- ② 등가조도 k_s 와 수위 h 및 조도계수 n 은 계산초기에 가정된다.
- ③ 각 입자에 작용하는 상대내뿔에 의한 항력계수 $C_{D_i}^*$ 와 평균유속 u_{r_i} 를 Eq. (9)와 Eq. (12)에 의해 계산한다.
- ④ 각 입자 i 에 작용하는 입자 전단력을 Eq. (11)를 이용하여 계산한다.

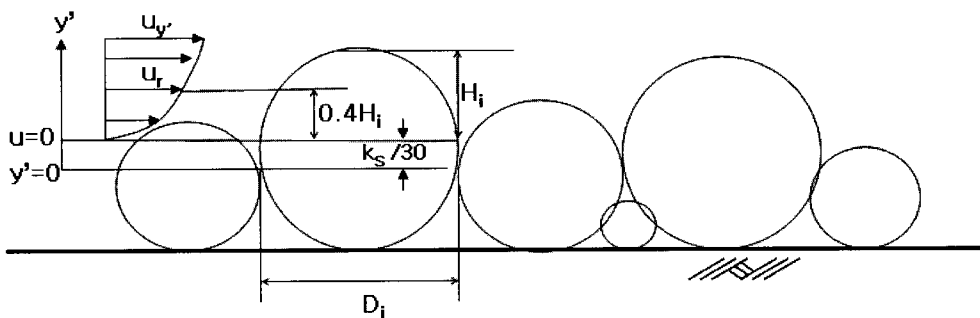


Fig. 4. Mean Velocity Position on a Protruding Grain

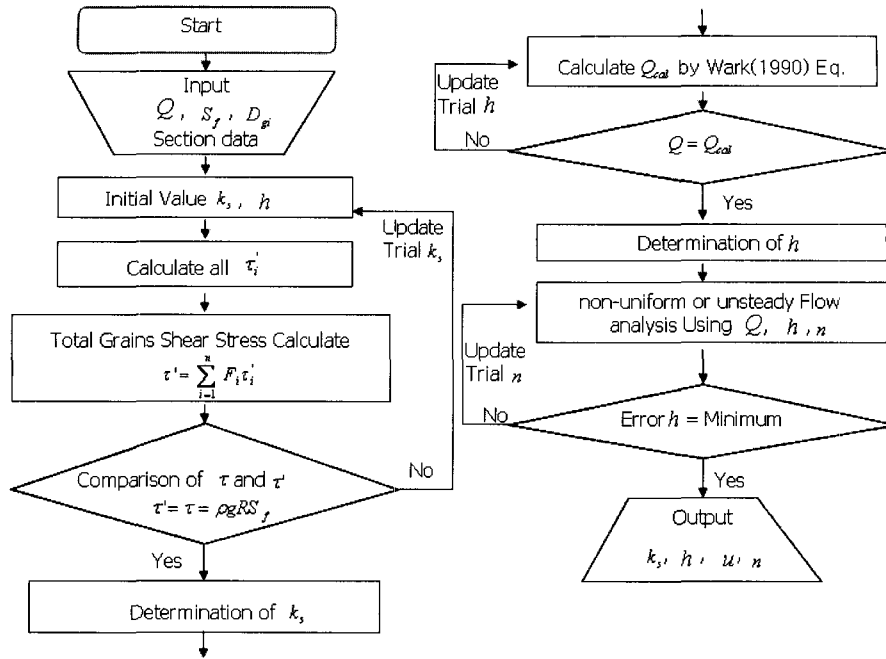


Fig. 5. Summary of Computational Procedure

- ⑤ 총 입자전단력 τ' 를 Eq. (14)와 같이 각 입자전단력 τ_i' 와 각 입자의 구성비 F_i 의 곱에 의한 합으로 계산한다.

$$\tau' = \sum_{i=1}^n F_i \tau_i' \quad (14)$$

- ⑥ 단위면적당 하상의 평균전단력은 $\tau = \rho g y S_f$ 로 계산되어지는데(Henderson, 1966), 이는 하상에 분포하는 입자의 단위면적에 작용하는 전단력과 같다고 할 수 있다. 따라서 초기에 가정된 등가조도 k_s 와 수위 h 에 의해 계산된 총 입자전단력 τ' 와 평균전단력 τ 를 비교하여 두 값이 동일하면 초기에 가정된 k_s 를 등가조도로 결정하고, 다르면 등가조도 k_s 를 다시 가정하여 두 값이 근사한 값을 가질 때까지 반복계산을 하여 최적치를 산정한다.
- ⑦ 대상유량에 대한 수위 h 는 Eq. (2)을 이용하는데, 이때 본 연구에서 산정된 등가조도 k_s 를 적용하여 초기에 가정된 수위 h 에 대해 횡단면의 소구간별 유량을 산정한다. 그리고 산정된 각 소구간별 유량을 합하여 초기에 주어진 유량과 계산된 유량이 같아지도록 반복법을 통해 수위 h 를 결정한다.
- ⑧ 지금까지의 계산절차에 의해 대상유량에 대해 상·하류 경계단의 수위가 결정되었으면 부등류 또는 부정류 해석을 통해 관측수위와 계산수위의

차가 최소가 되게 하는 최적의 조도계수를 산정한다.

3. 모형적용 및 비교 검토

3.1 대상하천

본 연구에서는 제안된 모형을 적용하고 그 적정성에 대해 검토하고자 섬진강을 대상하천으로 섬진강의 중하류부에 위치한 구례수위표지점과 송정수위표지점 구간을 선정하였다. 대상하천의 구간거리는 약 14km이고 평균하폭은 약 300m로 구간 내 하폭의 큰 변화는 없다. 섬진강은 급한 하상경사를 갖는 전형적인 산지하천으로서 하상경사가 비교적 급한 본 대상구간의 하상은 대부분 입도가 큰 자갈로 구성되어 있으며, 본 대상구간의 상류부(구례지점의 상류)는 계곡하천을 형성하여 암석과 호박돌 등으로, 그리고 하상경사가 완만한 하류부(송정지점의 약 2km하류부터)는 모래하상을 이루고 있다. 또한, 대상하천의 단면형상은 단단면으로 대상구간 내에서는 크게 변하지 않고, 구간내 하도의 사행성도 크기 않아 하도의 만곡에 의한 흐름저항은 크지 않을 것으로 판단되어, 본 연구에서 제시한 모형의 기본가정을 만족한다고 할 수 있다. Table 2는 두 수위표의 체원이고, 대상구간의 위치도 및 구례수위표지점의 하도 단면도는 Fig. 6의 (a) 및 (b)와 같다. 그리고 구례수위표지점의 단면에 대해 과거 유량측정을 위해 측량된 단면자료와 비교한 결과 Fig. 6(c)에서와 같이 단면의 큰 변화는 없었다.

Table 2. Water Level Gaging Stations of Up-Down Boundary in Object River Reach

Gaging Stations	Control	Type of Recording	River name	Longitude	Latitude	Tidal Influence	Zero of Gaging(m)
Gurey	MOCT	T/M	Sumjin	127-27-12	35-09-45	None	22.905
Songjeong	MOCT	T/M	Sumjin	127-33-28	35-11-20	None	8.203

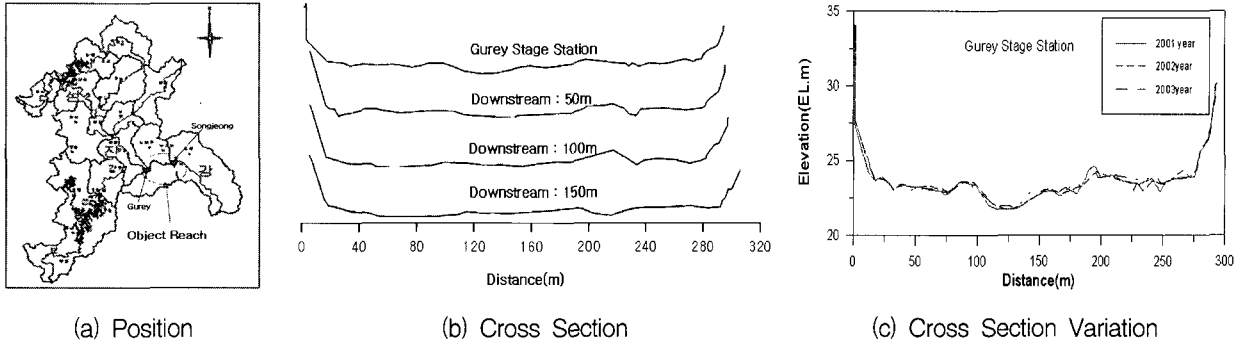


Fig. 6. Position Diagram and Cross Section of Object River Reach

3.2 모형의 적용 및 적용성 검토

본 연구에서는 등가조도 산정 모형을 구레수위표지점의 단면에 대해 적용하여 등가조도 k_s 를 산정하고, 산정된 등가조도를 Eq. (2)의 흐름모형에 적용하여 수위-유량관계도를 작성하였다. 작성된 수위-유량관계도는 실측된 수위-유량자료와 비교·검토하여 적정성이 확인되면, 유량수문곡선에 대한 수위수문곡선을 본 연구에서 제시한 방법으로 작성하여 부정류 해석을 통해 대상구간의 조도계수 n 을 산정하고 검토하고자 한다.

3.2.1 등가조도 k_s 산정

등가조도 k_s 를 산정하기 위해서는 대상하천의 입도 자료와 횡단면자료가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 구레수위표지점의 횡단면자료로 비교적 세밀하게 측량된 “섬진강수계 유량측정 조사용역 보고서(건교부, 2003)”의 단면자료를 이용하였다. 하상토의 입도자료는 2003년에 구레수위표지점에서 직접 하상토를 채취하고 체분석하여 얻은 자료를 사용하였으며, 이에 대한 하상토의 누가입경분포곡선은 Fig. 7과 같다. 한국공업 규격 KSF2302에 의하면 입자의 입경에 대해 0.075~2.0mm를 모래, 2.0~75mm를 자갈, 그 이상을 암편으로 구분

하고 있다(우효섭, 2001). 구레수위표지점의 하상토 입경분포 결과 Fig. 7에서 보는 것과 같이 2.0mm 이상의 하상토 구성비가 80%이상으로 전형적인 자갈하상임을 알 수 있다. Table 3은 하상토의 입경에 대한 특성값을 분석해 놓은 것으로 중앙입경(D_{50})은 38mm로 분석되었다.

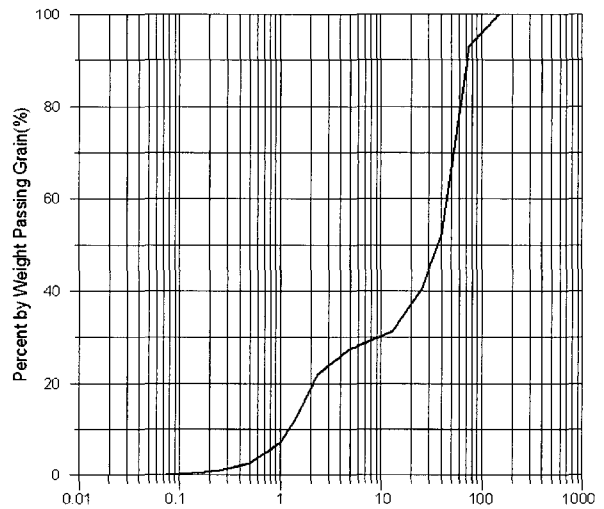


Fig. 7. Cumulative Diameter Curve of Bed Grain (Gurey)

Table 3. The Characteristic of Bed Grains

Station	Effect Diameter (D_{10})	D_{15}	Median Diameter (D_{50})	D_{60}	Uniformity Coefficient (D_{60}/D_{10})	D_{84}
Gurey	1.3mm	17mm	38mm	45mm	34.6	65mm

등가조도 k_s 는 각 입자의 전단력 및 총 입자전단력을 구하여 평균전단력 $\tau = \rho g R S_f$ 과 비교하고 그 차가 최소가 되도록 하는 등가조도 k_s 를 산정해야 한다. 평균전단력을 산정하기 위해서는 임의의 수위자료가 필요한데 본 연구에서는 Table 4와 같이 2003년 7월 10일에 구례수위표지점에서 측정된 수위-유량자료를 이용하여 평균전단력을 산정하였다. 그리고 마찰경사 S_f 는 하상경사 0.0007를 이용하였는데, 이는 Fig. 6의 구례수위표지점에 대한 150m 구간의 4개의 단면들에서 보는 것과 같이 단면 폭이나 하상 및 하도형태 등에 큰 변화 없이 일정한 단면의 형태를 보였고, 하상을 구성하는 입자나 제방의 식생상태 역시 큰 차이가 없어 하상경사를 마찰경사로 가정하여 사용해도 큰 무리가 없을 것으로 판단하였다.

Table 5는 등가조도 k_s 를 본 연구에서 제시한 방법으로 산정하는 계산과정 및 결과이다. Table 4의 조건하에서 평균전단력 τ 는 30.20 kg/m^2 로 산정되었는데, 이 값과 가장 근사한 총 입자전단응력 τ' 는 등가조도 k_s 가 0.194 m 일 때 30.19 kg/m^2 로 계산되어 0.194 m 를 등가조도 k_s 로 결정하였다. 이 값은 구례수위표지점의 최대입경보다 큰 값으로 $5.11D_{90}$ 또는 $2.99D_{84}$ 와 같다.

3.2.2 수위-유량관계도 작성

대상유량에 대한 수위는 Eq. (2)를 이용하여 구례수위표지점에 대해 산정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 횡단면을 1m 간격으로 차분하였다. 횡단면의 구간별 Darcy-Weisbach의 마찰계수 f 는 Eq. (5)에 의해 산정된 단면형상 수정계수 a 와 본 연구에서 산정된 0.194 m 의 등가조도 k_s 를 Eq. (4)에 적용하여 산정하였다. 그리고 횡방향 경사를 고려하여 전단력을 구하기 위한 계수 B_s 는 S_x 에 대해 종방향의 평균하상경사 0.0007를 일률적으로 적용하고, S_x 는 횡단면의 소구간별로 산정된 횡방향 하상경사를 Eq. (3)에 적용하여 산정하였다.

모형의 적용 및 적정성 검토를 위한 수문자료는 2003년 7월 9일~7월 12일 동안 발생한 홍수사상 때 유량측정을 통해 얻은 수위-유량자료를 이용하였다. Fig. 8은 본 연구에서 산정된 등가조도를 이용하여 Eq. (2)에 의해 수위-유량관계를 분석하고, 이를 2003년도 유량측정을 통해 실측된 수위-유량자료와 비교한 그림으로서, 실측값과 본 연구에 의해서 작성된 수위-유량관계곡선이 비교적 잘 일치하고 있다. Table 6 및 Fig. 9는 실측값과 모형에 의해 계산된 수위-유량관계의 오차를 수위와 유속에 대해 분석하고 이를 도시한 것이다. 각 유량

Table 4. Calculation Conditions for Equivalent Roughness Estimation

Discharge(Q)	Water Level(h)	Hydraulic Radius(R)	Bed Slope(S)	Bed Shear Stress(τ)
$3269.46 \text{ m}^3/\text{s}$	27.725 m	4.40 m	0.0007	30.20 kg/m^2

Table 5. Calculated Result of Equivalent Roughness

D_i (mm)	D_{gi} (m)	F_i	u_{ri} (m/s)	C_{Di}^*	τ'_i (kg/m^2)	$\tau'_i \times F_i$ (kg/m^2)	$\tau'_i \times F_i$ (%)
200	-	-	-	-	-	-	-
150	0.1732	0.070	0.774	0.315	92.326	6.454	21.372
75	0.1061	0.410	0.588	0.306	51.825	21.186	70.160
40	0.0548	0.120	0.360	0.283	17.951	2.156	7.139
25	0.0316	0.086	0.197	0.241	4.604	0.398	1.317
13	0.0180	0.013	0.063	0.138	0.269	0.003	0.011
10	0.0114	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.75	0.0069	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.36	0.0033	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.4	0.0018	0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.0	0.0012	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.0007	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.25	0.0004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.18	0.0002	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.0001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Result	Equivalent Roughness : $k_s = 0.194 \text{ m}$; Grain Shear Stress : $\tau' = 30.19 \text{ kg/m}^2$						

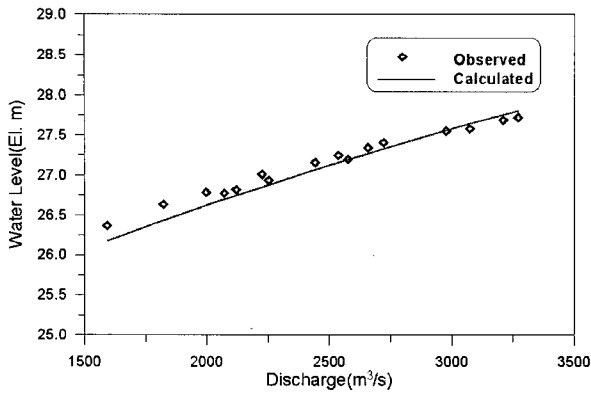
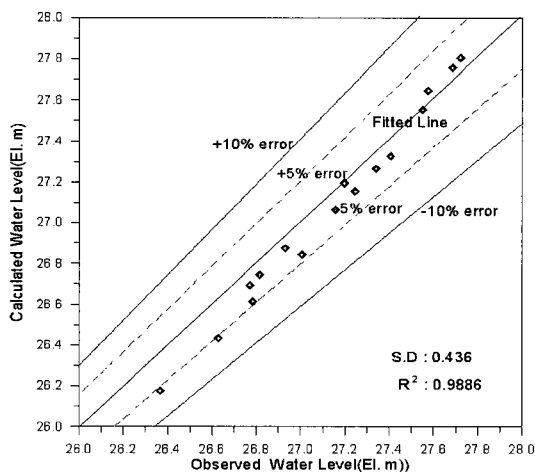


Fig. 8. Calculated Water Level-Discharge Curve

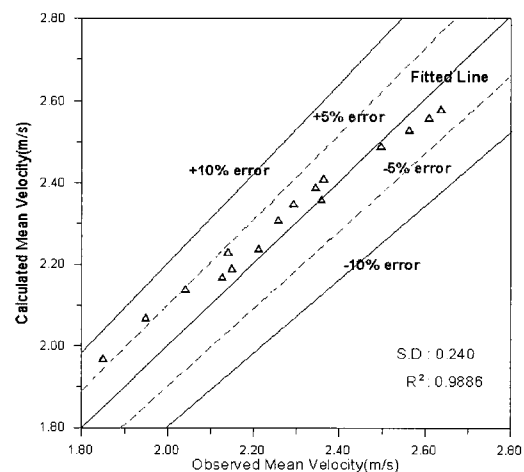
에 대해 계산된 수위와 관측된 수위와의 오차는 0.00m ~ 0.20m로 0.09m의 절대평균오차를 보였으며, 오차율은 평균 2.29%로 대부분 $\pm 5\%$ 이내의 오차율을 보여 비교적 정확한 결과를 보였다. 유속비교는 유량측정을 통해 측정된 단면평균유속과 관측유량에 대해 계산된 수위 h 에 대한 단면적으로 나누어 산정된 유속을 비교하였으며, 이때 단면적은 측량된 단면자료에 수위 h 를 적용하여 산정하였다. 그 결과 수위오차와 비슷한 평균 2.58%의 오차율을 보였고, 대부분 $\pm 5\%$ 이내의 오차율을 보여 본 연구에서 산정한 등가조도 k_s 및 적용된 모형의 적정성을 확인할 수 있었다.

Table 6. Comparison of Observed and Calculated Water Level and Velocity

Observed			Calculated		Error		Error(%)	
Q (m³/s)	h (EL. m)	v (m/s)	h (EL. m)	v (m/s)	Δh (m)	Δv (m/s)	Δh	Δv
1,591.88	26.37	1.85	26.18	1.97	-0.19	0.12	-5.49	6.53
1,821.54	26.63	1.95	26.44	2.07	-0.20	0.12	-5.23	6.20
2,070.93	26.77	2.13	26.70	2.17	-0.08	0.04	-1.94	2.02
1,996.50	26.79	2.04	26.62	2.14	-0.17	0.10	-4.38	4.81
2,119.50	26.82	2.15	26.75	2.19	-0.07	0.04	-1.79	1.90
2,252.17	26.93	2.21	26.88	2.24	-0.06	0.03	-1.37	1.28
2,224.32	27.01	2.14	26.85	2.23	-0.16	0.09	-3.90	4.19
2,441.49	27.16	2.26	27.07	2.31	-0.09	0.05	-2.12	2.30
2,576.11	27.20	2.36	27.20	2.36	0.00	0.00	-0.00	0.08
2,536.86	27.25	2.29	27.16	2.35	-0.09	0.06	-2.07	2.49
2,657.09	27.34	2.34	27.27	2.39	-0.07	0.05	-1.69	1.92
2,720.53	27.41	2.36	27.33	2.41	-0.08	0.05	-1.78	1.99
2,976.28	27.55	2.50	27.56	2.49	0.00	0.01	0.11	0.27
3,073.26	27.58	2.56	27.65	2.53	0.07	-0.03	1.50	-1.28
3,209.11	27.69	2.61	27.76	2.56	0.07	-0.05	1.46	-1.88
3,269.46	27.72	2.64	27.81	2.58	0.08	-0.06	1.77	-2.16
Absolute Mean Error					0.09	0.06	2.29	2.58



(a) Water Level



(b) Mean Velocity

Fig. 9. Error of Calculated Water Level(a) and Mean Velocity(b)

Table 7. Rating Curve Equation at Gurey Station

Station	Rating Curve Equation	Development Year
Gurey	$Q = 151.9611(H - 0.2562)^{2.0154}$ ($0.490 \leq H \leq 6.930$)	2003

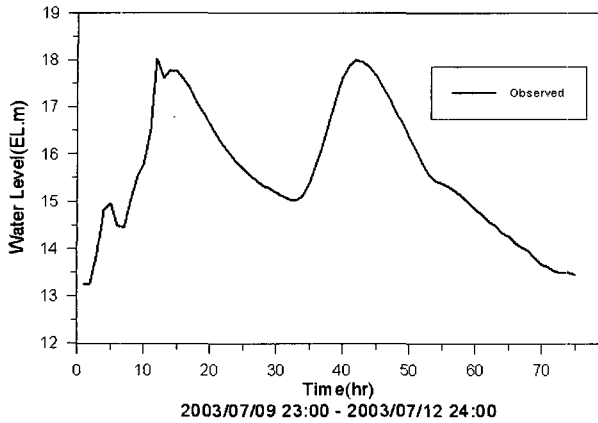


Fig. 10. Water Level Hydrograph at Songjeong

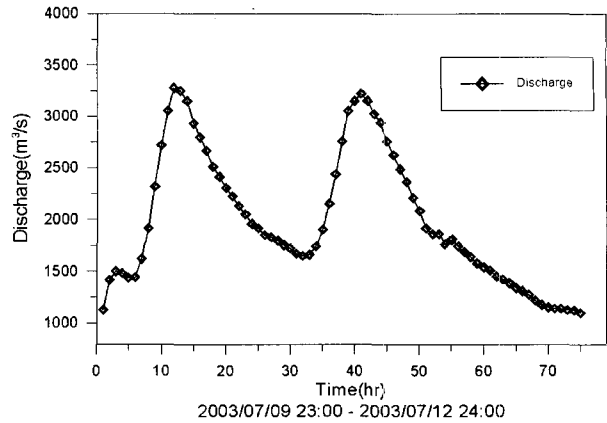


Fig. 11. Discharge Hydrograph at Gurey

3.2.3 조도계수 산정 및 비교

조도계수는 대상유량에 대해 상·하류 경계단의 수위를 알고 있으면 부등류 또는 부정류 해석을 통해 관측된 수위와 계산된 수위의 차가 최소가 되는 최적의 값을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 HEC-RAS를 이용하여 구레~송정구간에 대해 부정류 해석을 실시하였다. 단면자료는 섬진강수계 하천정비기본계획 보고서(건교부, 2003)의 자료를 이용하였고, 수문자료는 2003년 7월 9일~7월 12일의 홍수사상을 이용하였다. 그리고 하류 경계조건은 송정수위표지점의 관측된 수위수문곡선(Fig. 10)을 사용하였고, 상류 경계조건은 구레수위표 지점의 수위자료에 수위-유량관계식(Table 7)을 적용한 유량수문곡선(Fig. 11)을 이용하였다.

부정류 해석을 통해 조도계수를 산정하기 위해서는 상류 경계단인 구레수위표 지점의 수위자료가 필요하다. 이를 위해 수위-유량관계도 작성을 통해 적정성이 확인된 흐름모형(Eq. (2))에 본 연구에서 산정한 구레수위표지점의 등가조도를 적용한 후 유량수문곡선에 대한 수위수문곡선을 작성하여 상류 경계단 수위자료로 사용하였다. Fig. 12는 구레지점의 관측된 수위수문곡선과 본 연구 모형에 의한 수위수문곡선을 비교하여 도시한 것으로 두 수위자료의 평균제곱근오차는 0.113m로 분석되었다.

HEC-RAS에는 최적의 조도계수를 추정할 수 있는 최적화 방법이 포함되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 HEC-RAS에 의해 계산된 수위와 상류 경계단 수

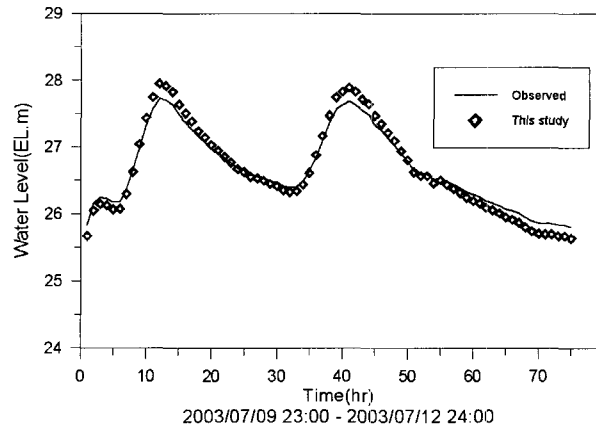


Fig. 12. Comparison of observed and Water Level Hydrograph by this Model at Gurey

위자료로 사용된 관측 수위자료 및 본 연구의 모형에 의한 수위자료와의 평균제곱근오차가 최소가 되도록 시행 착오법을 통해 조도계수를 산정하였다. 그리고 조도계수는 유량에 따라 가변성을 갖기 때문에 본 연구에서는 유량규모를 5개로 구분하여 적용하였으며, 본 연구 모형에 의한 수위자료로 산정된 조도계수의 적정성을 검토하기 위해 관측된 수위자료를 상류 경계단의 수위자료로 사용하여 산정된 조도계수와 비교 검토하였다.

그 결과 조도계수는 Table 8과 같이 산정되었다. 각 유량규모에 대하여 상류 경계단의 수위자료로 구레지점의 관측된 수위자료를 이용한 경우 0.043~0.033, 본 연구 모형에 의해 계산된 수위자료를 이용한 경우 0.045~0.032의 조도계수가 산정되어 두 경우에 대한 조도

계수의 차가 크지 않았다. Fig. 13은 조도계수를 관측된 수위자료와 본 모형에 의한 수위자료를 상류 경계단 수위자료로 이용하여 부정류 해석을 통해 각각 산정된 조도계수와 김선민 및 정관수(2005)의 연구결과, Manning 공식을 이용하여 산정된 조도계수를 비교한 것이다. Manning 공식의 적용은 구례수위표지점에 대해 2003년에 직접 유량측정한 자료를 이용하였으며, 이때 마찰경사는 구례수위표지점과 송정수위표지점의 수면경사를 이용하여 산정하였다. 본 연구에 의한 조도계수와 관측된 수위자료 및 김선민과 정관수(2005)에 의한 조도계수는 유량규모별로 큰 차이를 보이지 않았고, 또한 그 경향도 비슷하였다. Manning 공식에 의한 조도계수는 유량이 증가하면서 조도계수가 감소하는 경향은 비슷하나 조도계수의 값은 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 구례~송정구간에 대한 부정류 해석을 통해 유량규모별 구간조도계수를 산정한 값이고, Manning 공식에 의한 조도계수는 구례수위표지점의 한 단면에 대해서 각각의 유량에 대해 산정한 것으로 해석방법 및 산정방법이 상이하여 발생하는 오차로 판단된다.

Table 8. Comparison of Roughness Coefficient

Q (m ³ /s)	Roughness Coefficient(n)	
	Observed Water Level	This study (Calculated Water Level)
1000	0.043	0.045
1500	0.040	0.041
2000	0.037	0.038
2500	0.035	0.035
3000	0.034	0.033
3500	0.033	0.032

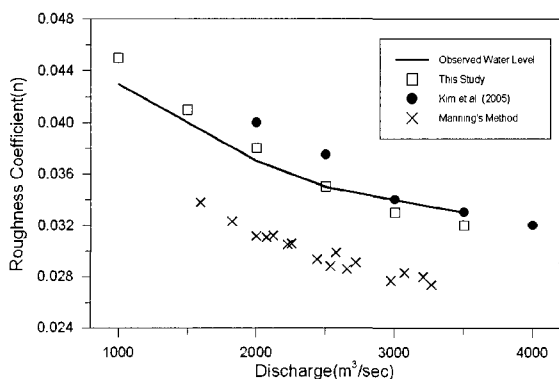


Fig. 13. Comparison of Roughness Coefficient

4. 결론

본 연구는 수위-유량자료가 없는 자갈하상하천에 대

해 조도계수를 산정하기 위해 하상의 입자에 작용하는 전단력을 통해 등가조도를 산정하고, Wark et al.(1990)이 제안한 비균일 하도단면의 단위폭당 유량에 대한 흐름모형에 본 연구에서 산정된 등가조도를 적용하여 대상유량에 대한 수위를 산정하였다. 그리고 산정된 수위는 부정류 해석을 통해 조도계수를 산정하는데 이용하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 섬진강의 중·하류부에 위치한 구례수위표~송정수위표 구간에 적용하였으며, 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 하상의 특정입도에 의해 등가조도를 구하는 기존의 연구와 달리 하상에 분포하는 각 입자들에 작용하는 전단력을 산정하여 등가조도를 산정하는 방법을 제시하였고, 섬진강의 구례수위표지점에 적용한 결과 0.194m의 등가조도가 산정되었다.

(2) 산정된 등가조도는 Wark et al.(1990)이 제시한 흐름모형에 적용하였고, 이를 통해 구례수위표지점에 대한 수위-유량관계도를 작성하여 실측된 유량측정자료와 비교하였다. 그 결과 관측된 수위-유량자료와 모형에 의해 작성된 수위-유량관계도와 비교적 잘 일치하였고, 그 오차는 대부분 5% 이내의 오차율을 보여 비교적 정확한 수위를 예측한 것으로 평가되어 본 연구에서 산정된 등가조도의 적정성도 확인할 수 있었다.

(3) 조도계수는 2003년의 홍수사상에 대해 관측된 수위수문곡선과 본 연구에서 적용된 모형에 의해 계산된 수위수문곡선을 이용하여 조도계수를 산정하고 비교하였다. 그 결과 조도계수는 관측수위를 이용한 경우와 유사하여 본 연구의 계산수위를 이용한 조도계수 산정방법의 적용 가능성이 높음을 알 수 있었고, 유량의 증가에 따라 조도계수가 감소하는 조도계수의 가변성도 고려할 수 있었다.

(4) 지금까지 국내에서는 수위-유량자료가 없는 하천의 경우 대부분 하천설계기준에 제시된 표로써 하천 및 수로의 상황에 따라 주어진 조도계수를 설계자가 유량의 규모에 상관없이 주관적으로 결정하여 사용하고 있는데, 이는 흐름해석을 하는데 있어 객관성 및 신뢰성을 저하시키는 중요한 요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서와 같이 하천에서 등가조도를 이용한 흐름저항을 산정하고, 이를 통해 대상유량에 대해 수위를 산정한 후 대상구간에 대한 조도계수를 산정하는 방법의 이용은 하천실무에서 보다 타당한 분석을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 건교부 (2003). 섬진강수계 유량측정 조사용역 보고서.
- 건교부 (2003). 섬진강수계 하천정비기본계획 보고서.
- 김선민, 정관수 (2005). “부정류 모형을 이용한 하천 조도계수 산정 및 산정오차의 수면곡선에 대한 민감도 분석.” **2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.
- 김 원, 김양수, 우효섭 (1995). “부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 김진수, 전경수, 이길성 (2005). “FLDWAVE 모형의 가변 조도계수 자동추정에 관한 연구.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.
- 우효섭 (2001). 하천수리학. 동명사, pp. 361-368.
- 윤태훈, 이종욱, 제갈선동 (2000). “동수역학모형의 매개변수 산정.” **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제1호, pp. 39-50.
- 이정규, 이창현 (2003). “수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.
- Brownlie, W.R. (1983). “Flow Depth in Sand-Bed Channels.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 7. pp. 959-990.
- Coleman, N.L. (1967). “A Theoretical and Experimental Study of Drag and Lift Forces Acting on a Sphere Resting on a Hypothetical Stream Bed.” *Proc., 12th Congress*, IAHR, Vol. 3, Sept.
- Einstein, H.A. and El-Sayed A. El-Samni. (1949). “Hydrodynamic Forces on a rough Wall.” *Rev. Mod. Phys.*, 21, pp. 520-524.
- Gomez B. (1993). “Roughness of stable, Armored Gravel Beds.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 11, pp. 3631-3642.
- Hey, R.D. (1979). “Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 105, No. 4, pp. 365-379.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan Publishing Co., Inc., New York.
- Keulegan, G.H. (1938). “Laws of Turbulent Flow in Open Channels.” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 21, Reserch Paper 1151, pp. 707-741.
- Limerinos, J.T. (1970). “Determination of the manning Coefficient for Measured Bed Roughness in Natural Channels.” *Water Supply paper 1898-B*, United States Geological Survey, Washington D.C.
- Martin, V. (2003). *Hydraulic Roughness of Armoured Gravel Beds : the Role of Grain Protrusion*. Ph.D. dissertation, University of British, Columbia.
- Nikuradse, J. (1933). “Stromungsgesetze in rauhen Rohren”, *Forsch. Arb. Ing. Wes.*, 361, 22.(English translation, Laws of flow in rough pipes, Tech. Memo. 1292, Natl. Advis. Comm. For Aeron., Washington, D.C., 1950.)
- Normand Emile, B. (1994). *An Analysis of Flow Velocity Profiles, Stream bed Roughness, and Resistance to flow in natural Gravel Bed Streams*. Ph.D. dissertation, State University of New York, Buffalo.
- Pope, S.B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge University Press.
- Petryk, S., Bosmajian, G. (1975). “Analysis of Flow Through Vegetation.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 101, No. 7, pp. 871-884.
- Thorne, C.R., Zevenbergen, L.W. (1985). “Estimating Mean Velocity in mountain Rivers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 612-624.
- Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.V. (1990). *A Practical Method of Estimating Velocity and Discharge in a Compound Channel*, Flood Hydr., W. R. while, ed., John Wiley and Sons, Inc., Chichester England, pp. 163-172.
- Zegzhda, A.P. (1938). *Theoriia Podobiiai Metodika Rascheta Gldrotekhnicheskikh Modelei*(Theory of Similality and Methods of Desgin of Models for Hydraulic Engineering), Gosstroizdat, Leningrad, U.S.S.R.

(논문번호:06-54/접수:2006.05.12/심사완료:2006.10.30)