

## 부자 측정 시 식생을 고려한 유량산정에 관한 연구

이태희\* · 정성원\*\*

Lee, Tae Hee\*, Jung, Sung Won\*\*

### Discharge Computation from Float Measurement in Vegetated Stream

#### ABSTRACT

Development of vegetation in stream channel increases resistance to flow, resulting in increase in river stage upon flood and affecting change in stage-discharge relationship. Vegetation revealed in stream by water level reaching a peak and then declined upon flood is mostly found as prone. Taking an account of flow distribution with the number of vegetation, prone vegetation layer might be at height where discharge rate is zero (0) (Stephan and Guthnecht, 2002). However, there is a tendency that flow rate is overestimated when applying the height of river bed to flow area with no consideration of the height of vegetation layer in flow rate by float measurement. In this study, reliable flow measurement in stream with vegetation was calculated by measuring the height of vegetation layer after flood and excluding the vegetation layer-projected area from the flow area. The result showed the minimum 4.34 % to maximum 10.82 % of flow deviation depending on the scale of discharge. Accordingly, reliable velocity-area methods would be determined if vegetation layer-projected area in stream is considered in flow rate estimation using the flow area during the flood.

**Key words :** Vegetated stream, Float measurement, Stage-discharge relationship, Velocity-area method, Prone, Vegetation layer, Flow area

#### 초 록

하도 내 식생발달은 흐름저항을 크게하여 홍수 시 하천 수위를 상승시키고 수위-유량관계의 변화에도 영향을 미치고 있다. 홍수 시 수위가 첨두에 도달하고 하강하여 하도 내 드러난 식생은 대부분 도복(倒伏, prone) 상태에 있다. 이렇게 식생이 도복상태로 되어있는 식생층 구간은 식생된 개수로 흐름의 유속분포를 고려하였을 때 유속이 0인 지점의 높이로 고려된다(Stephan and Guthnecht, 2002). 그러나 부자 측정에 의한 유량산정에 있어서 식생층 구간의 높이를 고려하지 않고 하상높이를 유하면적으로 적용하면 유량이 과대 산정되는 경향이 발생한다. 본 연구에서는 식생된 하천에서 정도 높은 유량을 산정하기 위해 영강의 점촌, 내성천의 향석 지점에서 홍수 후 식생층 높이를 측량하고 통수단면적에서 식생층 투영면적을 제외하여 유량을 산정하였다. 그 결과, 유량의 규모에 따라 차이는 있지만 최소 4.34 %에서 최대 10.82 %의 유량편차를 보였다. 따라서 홍수 시 통수단면적을 적용하여 유량을 산정하는 유속-단면적 방법에 있어서 식생하천에서 식생층 높이의 투영면적을 고려하여 유량을 산정한다면 좀더 적합한 유량산정이 이루어질 것으로 판단된다.

**검색어 :** 식생하천, 부자, 수위-유량관계, 유속-면적법, 도복상태, 식생층, 통수단면적

\* 정희원 · 한국수자원조사기술원 선임연구원, 공학박사 (Korea Institute of Hydrological Survey · thlee@kihs.re.kr)

\*\* 교신저자 · 한국수자원조사기술원 원장, 공학박사 (Corresponding Author · Korea Institute of Hydrological Survey · swjung@kihs.re.kr)

Received November 23, 2018/ revised December 12, 2018/ accepted January 14, 2019

## 1. 서론

우리나라는 일반적으로 여름철 집중호우에 의한 홍수가 발생하여 정확한 홍수량 측정은 홍수에정보 및 치수대책 등 하천관리에 있어서 매우 중요한 요소이다. 최근 홍수량 측정을 위해 전자파유속계, 영상유속계, 레이더유속계, ADCP 등 측정장비의 첨단화가 이루어지고 있지만 측정 시 악천후가 동반된 기상상황이나, 수위와 유량이 급변하여 신속한 측정이 필요한 상황에 적용하는데 어려움 있다. 이러한 점 등으로 비교적 신속하고 편리한 부자 측정을 실시하고 있지만 측정 여건 등의 한계로 정확도가 낮아 유량산정에 있어서 큰 오차가 발생한다. 부자 측정에 의한 유량자료의 정확도 향상을 위해서는 현장 여건을 최대한 반영한 유량산정 과정이 필요하다. 하지만, 홍수 시 식생하천에서 수위가 상승하강함에 따라 식생 조건을 반영한 정확한 유량산정이 필요하지만 현장 여건상 어려움이 있다.

하천 내 식생은 하천의 흐름저항을 크게 하여 홍수 시 수위를 증가시켜 홍수관리 측면에서 악영향을 미치기도 한다. 이러한 식생 조건의 수리특성을 고려하여 측정기반의 정확한 유량산정은 현실상 많은 어려움이 있다. 하천 내 식생에 의한 흐름특성 연구는 여러측면에서 많은 연구자들로부터 수행되어 왔다. 식생에 따른 수리특성의 규명(Ree, 1949)을 시작으로 조도, 통수능 및 흐름변화와 최근 생태에 관한 연구가 주종을 이루고 있다.

국외의 경우, 조도에 관한 연구로는 연성 식생조건에 관한 연구(Kouwen and Unny, 1973), 수면에 돌출되는 강성 식생에 관한 연구(Petryk and Bosmajian, 1975), 식생의 연성과 강성 및 간격을 고려한 연구(Kouwen and Li, 1980) 등이 수행되었다. 한편, 식생으로 인한 통수능 변화에 관한 연구로는 홍수터 식생의 영향(Darby and Thorne, 1996), 하안 식생의 영향(Masterman and Thorne, 1992), 식생면적에 따른 유량변화(Darby, 1999)에 관한 연구들이 수행되었다. 마지막으로, 식생 위의 유속분포에 대한 연구로는 유연한 플라스틱 모형 식생을 수로에 고정시킨 수리모형 실험에 관한 연구(Kouwen et al., 1969), 사다리꼴 개수로에서 자연식생을 모형화한 플라스틱 모형으로 식생 위의 유속분포를 나타낼 수 있는 대수형 관계식에 관한 연구(El-Hakim and Salama, 1992), 유연한 세 가지 다른 수생식물에 관한 수리모형실험을 수행하여 식생 위의 유속 분포식에 관한 연구(Stephan and Guthnecht, 2002) 등이 있다.

한편, 국내의 경우, 유사 퇴적에 관하여 수리실험을 통하여 식생 밀도 및 식생배치 형태에 따른 연구(Lee, 2002), 흐름특성 및 유속분포에 관하여 인공수조를 만들어 실험실 수로에 식재하여 침수조건에서 수초로 인한 개수로의 흐름변화 및 유속분포에 관한 연구(Yoon et al., 2002), 식생수로와 비식생수로에서의 조도특성과 유속분포에 관한 연구(Song and Park, 2004) 등이 있다. 또한,

식생된 수로의 흐름특성을  $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 난류구조를 수치 모의(Kwon and Choi, 2000), 강성과 연성 식생에 의해 개수로 내에 식재된 식생의 유연성이 흐름에 미치는 영향과 흐름저항 특성(Yeo et al., 2004), 선별된 식생에 대한 식생조도계수를 산정하는 연구(Rhee et al., 2006) 등이 수행되었다.

본 연구에서는 앞선 선행연구의 식생조건에서 개수로 흐름을 토대로 부자 측정시 하도 내 식생조건에 의한 흐름변화로 실제 유량과 측정을 통해 산정되는 유량과의 차이를 줄이기 위해 노력하였다. 호우사상에서 식생조건은 흐름조건에 따라 달리하지만 상승부, 하강부 두 조건으로 가정하였을 경우 실제 하천에서 상승부 식생조건은 현실상 관측하기에 어려움이 있고, 침두수위 이후 하강부에 하도 내 드러난 식생은 대부분 도복(倒伏, prone) 상태에 있다. 따라서 도복상태의 식생층 높이는 식생된 개수로 흐름의 유속분포를 고려하였을 때 유속이 0인 지점의 높이로 고려된다(Stephan and Guthnecht, 2002). 그러나 부자 측정에 의한 유량산정에 있어서 식생층 구간의 높이를 고려하지 않고 하상고를 통수단면적으로 적용하면 유량이 과대 산정되는 경향이 발생한다. 따라서 홍수 시 침두수위 이후 하강부 식생조건을 도복상태로 가정하고 침두수위 이후 부자 측정성공에 대하여 홍수 후 식생층 높이를 측정하여 통수단면적에서 식생층 투영면적을 제외하여 유효단면적을 산정하였다. 식생층 높이의 측량은 도복상태의 식생 위에 평평한 아크릴판을 놓고 RTK-GPS를 이용하여 측정하였고, 유량산정에 있어서 부자 보정계수는 일반적인 보정계수를 동일하게 적용하였다.

## 2. 자연하천에서의 흐름특성

### 2.1 비식생하천에서의 흐름

#### 2.1.1 조도높이

불규칙한 조도요소의 유효높이는 조도높이  $k$ 라고 하며, 동수반경에 대한 조도높이의 비,  $k/R$ 은 상대조도라 한다. Nikuradse의 모래 조도  $k_s$ 는 모래입자의 평균직경이며, 주어진 표면에 대한 평균조도높이는 실험을 통해 결정할 수 있다(Chow, 1959).

#### 2.1.2 유속분포

개수로 흐름에서 유속분포는 수로의 형상과 조도에 영향을 받는다. 유속은 균등하게 분포되지 않으며, 흐름의 종류에 따라 달라진다. 일반적으로 자갈하상과 난류 흐름의 경우 연직유속분포는 대수 분포로 가정하며(Chow, 1959; French, 1986; Graf, 1998; Ferro, 1999), Eq. (1)은 모든 대수유속분포 이론의 바탕이 된다.

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

여기서,  $u(z)$ 는 수심이  $z$ 인 지점의 유속,  $u_*$ 는 마찰속도,  $z_0$ 는 유속이 0 ( $u_{z=z_0} = 0$ )인 지점의 높이,  $z$ 는 유속측정 수심,  $k$ 는 von karman 상수 0.4이다.

경계면이 거칠 때, 유속이 0인 지점까지의 높이  $z_0$ 는 단지 조도 높이에만 의존하며 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다(Chow, 1959).

$$z_0 = mk \tag{2}$$

여기서,  $m$ 은 계수이며, 모래입자 조도에 대해 대략 1/30이다. 거친 흐름에 대한 유속분포는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{k_w} \right) + C \tag{3}$$

여기서,  $k_w$ 는 조도높이이며,  $C$ 는 적분상수(=8.5)이다(Graf, 1998).

## 2.2 식생하천에서의 흐름

### 2.2.1 조도높이

식생 조도높이  $k_p$ 는 비식생수로의 조도높이  $k_w$ 에 해당되며, 식생 조도높이와 Fig. 1에 나타낸 기울어진 식생의 높이  $y_p$ 사이의 관계는 실험을 통해 연구되고 있다. Fig. 1에서  $u_{yp}$ 는 기울어진 식생 높이에서의 유속,  $y'$ 은 기울어진 식생 높이에서의 대수유속분포의 유속이 0인 지점까지의 높이,  $y''$ 는 하상에서 유속이 0인 지점의 높이(zero-plane displacement)이다.

Kouwen et al.(1969)은 개수로에서 물에 잠긴 유연한 식생 조도높이를 계산하는데 사용할 수 있는 Eq. (4)를 제시하였다.

$$k_p = y_p \exp \left( (1 - kC) \left( 1 - \frac{y_p}{H} \right) \right) \tag{4}$$

여기서,  $y_p$ 는 기울어진 식생의 높이(m),  $C$ 는 경험계수이며 1.52 <  $C$  < 2.69, Eq. (5)와 같이 계산할 수 있다.

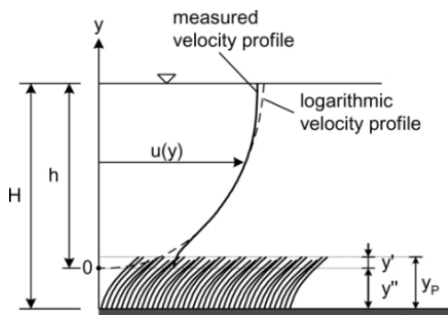


Fig. 1. Vertical Velocity Profile Above Aquatic Vegetation (Stephan and Guthnecht, 2002)

$$C = \frac{u_{yp}}{u_*} \tag{5}$$

여기서,  $u_{yp}$ 는 기울어진 식생 높이에서의 유속(m/s)이다.

식생 수로에서의 조도높이에 대한 다른 결과들도 있으며, Haber (1982), Stephan and Guthnecht(2002), El-Hakim and Salama (1992)은 식생 조도높이는  $y_p$ 와 같다고 하였다.

Stephan and Guthnecht(2002)은 모래 조도와 마찬가지로 유속이 0인 지점까지의 높이는 식생의 진동폭(oscillation amplitude) 범위 가운데 Fig. 2와 같이 기울어진 식생의 평균 높이  $y_{p,m}$ 을 식생의 조도높이로 정의하고 Eq. (6)을 제시하였다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y - y_{P,m}}{y_{P,m}} + 8.5 \tag{6}$$

여기서,  $y_{p,m}$ 는 기울어진 식생의 평균높이(m),  $u_*$ 는 마찰속도,  $y$ 는 유속측정 수심,  $k$ 는 von karman 상수 0.4이다.

### 2.2.2 유속분포

식생된 하상에서 식생위의 유속분포는 흔히 대수분포로 가정하며, 식생위의 유속분포는 식생 조도높이와 마찰속도 등의 영향을 받는다. Table 1에 정리한 바와 같이 물에 잠긴 유연한 식생위의 유속분포에 관한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 대부분 자연 또는 인공식생을 이용하여 수행되었다. 식생위의 유속분포와는 달리 식생 내 유속은 일반적으로 균일하다고 가정된다(Kouwen et al., 1969; Christensen, 1985).

## 3. 부자 측정을 통한 유량산정

부자를 이용한 유량측정은 악천후가 동반된 기상상황, 수위와 유량이 급변하여 신속한 측정이 필요한 경우, 과도한 유속과 수심이 발생한 경우, 부유물질로 인하여 유속계를 사용할 수 없는 경우에 대하여 부자 측정을 실시하게 된다.

부자 측정을 통한 유량산정은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 산정될

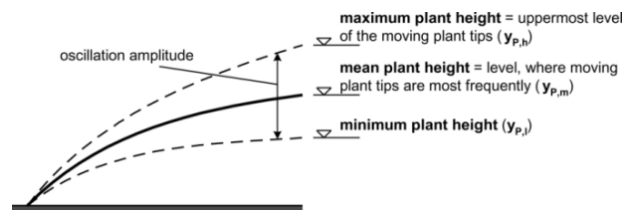


Fig. 2. Characteristic Plant Heights (Stephan and Guthnecht, 2002)

Table 1. Five Different Methods to Modify Prandtl's Log Law

Author	Velocity distribution	Roughness parameter $k_p$	Integration constant $C$
Kouwen et al.(1969)	$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{k_p} + C$	$k_p = y_p \exp\left((1 - kC)\left(1 - \frac{y_p}{H}\right)\right)$	$c = 8.5$
Haber(1982)	$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y_p} + C$	$k_p = y_p$	$c = u_{yp}/u_*$
Christensen(1985)	$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{k_s} + C$	$k_p = k_s$	$c = 8.5$
El-Hakim and Salama(1992)	$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{B} \ln \frac{y}{y_p} + C$	$k_p = y_p$	$c = A$
Stephan and Guthnecht(2002)	$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y - y_{F,m}}{y_{F,m}} + C$	$k_p = y_{p,m}$	$c = 8.5$

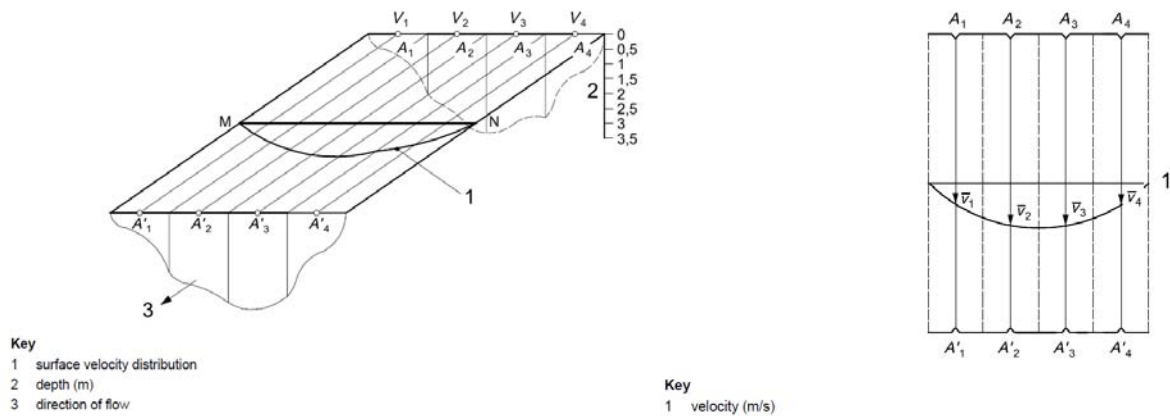


Fig. 3. Computation of Discharge from Float Measurements (ISO 748, 2007)

수 있다. 상하류 두 개의 횡단면선 사이의 중간지점에 횡단면선과 평행하게 또 다른 선 MN을 그릴 수 있다. 두 개의 횡단면의 여러 측선을 분리하는 수면-점들이 점선으로 연결되면서 각 부자의 시작 점과 끝점들이 도시되고 고정선으로 연결된다. 고정선이 MN 선을 가로지르는 부분에서 해당되는 평균유속(부자유속×보정계수)은 MN에 연직으로 도시되며 이러한 유속벡터의 끝점들은 유속-분포 곡선을 형성하기 위해 연결된다. 상류단과 하류단 횡단면에 해당되는 각 측선별 평균단면적에 유속-분포곡선에서 보여지는 각 측선의 평균유속을 곱할 경우 각 측선별 흐르는 유량이 산정되고 모든 측선에 대한 유량의 합은 전체 유량으로 Eq. (7)과 같이 산정된다. 한 측선에서의 평균유속은 해당 측선에 대한 유속-분포곡선 아래의 면적을 구적기를 통해 측정하여 결정하거나, 또는 구획을 지나 중간까지의 유속측정값과 동일한 근사값이 채택된다(ISO 748, 2007(E)).

$$Q = \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{2} (A_i + A'_i) \quad (7)$$

여기서,  $\bar{v}_i$ 는 각 측선별 표면유속,  $A_i$ 는 상류단 측선별 윗단면적,  $A'_i$ 는 하류단 측선별 윗단면적이다.

## 4. 분석

### 4.1 대상 지점 선정

본 연구의 대상 지점 선정은 하도 내 식생이 크게 발달되어 있고 큰 호우사상이 발생하여 부자에 의한 유량측정이 실시된 점촌, 향석 두 개의 관측소를 선정하였다. 첫 번째, 낙동강 제1지류인 영강에 위치한 점촌 관측소는 경북 문경시 영순면 김용리 262-4 (경도 128-13-00, 위도 36-35-22)에 제방 부착식으로 설치되어 있다. 하상재료는 주로 호박돌과 자갈로 이루어져 있으며 단면형상은 좌안은 단단면, 우안은 복단면 형상이다. Fig. 4에 도시한 바와 같이 복단면인 우안에는 2013년 ‘영강생태하천조성공사’ 이후 식생 및 잡목의 활착정도가 심해져 전체 하폭 약 180 m 구간 중 약 130 m 구간인 약 72 % 정도 식생영역이 분포하고 있다. 이러한 식생영역에 의한 하도통제 영향으로 홍수량 흐름에 있어서 수위를



(a) Measurement Section View

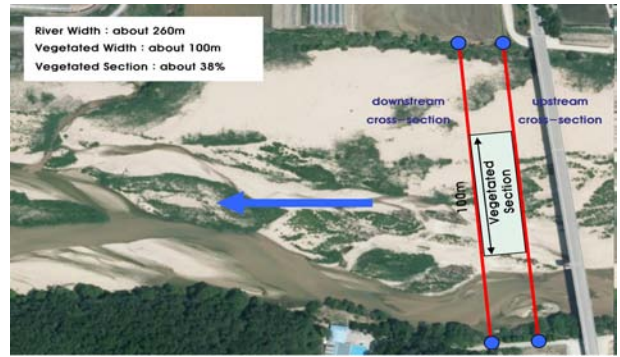


(b) Float Measurement Section

Fig. 4. Float Measurement Section (Jeomchon Station)



(a) Measurement Section View



(b) Float Measurement Section

Fig. 5. Float Measurement Section (Hyangseok Station)

증가시키는 등 흐름특성에 영향을 미치고 있다.

두 번째, 낙동강 제1지류인 내성천에 위치한 향석 관측소는 경북 예천군 용궁면 대은리 950 회룡교(경도 128-19-10, 위도 36-35-10)에 위치하고 있다. 하상재료는 주로 모래로 이루어져 있으며 단면형상은 단단면 형상이나 하도 내 형성된 교호사주로 인하여 사행흐름이 발생하고, 교호사주의 식생활착은 이러한 사행 흐름을 더욱더 고착화시켜 복단면 형상으로 변화하고 있다. Fig. 5에 도시한 바와 같이 전체 하폭 약 260 m 구간 중 하도 중간 교호사주에 의해 발달한 식생영역은 약 100 m 구간인 약 38 % 정도 식생영역이 분포하고 있다. 이러한 식생영역에 의한 하도통제 영향은 홍수량 흐름에 있어서 수위를 증가시키는 등 흐름특성에 영향을 미치고 있다.

#### 4.2 상하류단 횡단면 분석

유량 산정을 위한 통수단면적 산정에 있어서 부차 유하시간의 기준이 되는 상하류단 횡단면을 측량하여 산정하였다. 통수단면적 측량에 있어서 홍수 전 측량의 경우 홍수기 시작 이전인 5월 하순경 하상고 측량을 실시하였고, 식생층 투영면적 고려를 위한 측량은

도복상태의 식생조건을 최대한 반영하기 위해 호우사상에 의한 침두수위 하강 후 식생이 재 기립하기 전 식생층위에 채증을 실어 평평한 아크릴판을 놓고 높이를 측량하였다. 식생층의 높이는 Eq. (6)에서 정의한 유속이 0인 지점까지의 식생의 기울어진 평균 높이  $y_{p,m}$ 를 측량하기 위해 최대한 노력하였다. 측량 위치는 홍수 전후 동일 위치에서 측량을 실시하였으나 홍수 전후 전체 구간의 하상을 비교하다보니 하상 세굴 및 퇴적에 의해 식생층을 고려한 높이가 식생이 분포하지 않은 구간의 홍수 전 하상고보다 낮은 것처럼 나타났다. Fig. 6(a)는 홍수 후 하도 내 드러난 도복상태의 식생 전경이며, Fig. 6(b)는 GNSS (Global Navigation Satellite System) 측량기법인 RTK-GPS를 이용하여 식생 고려 전후 상하류단 동일 위치에서 측량을 실시하고 있는 전경이다.

점촌 지점의 상하류단 횡단면은 Fig. 7에 도시하였다. Figs. 7(a) and 7(b)에는 상하류단의 식생층 높이를 고려하지 않은 (non-vegetated) 하상높이의 횡단면과 홍수 후 식생조건이 도복상태의 식생층 높이를 고려한(vegetated) 식생층 높이의 횡단면을 나타내었다. Figs. 7(c) and 7(d)는 상하류단의 식생층 높이를 고려하지 않은 하상높이, 도복상태의 식생층 높이를 고려한 식생층



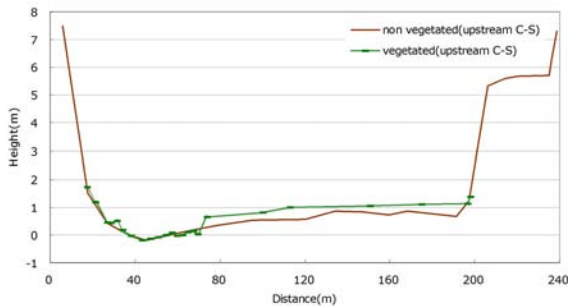


(a) Prone Vegetation

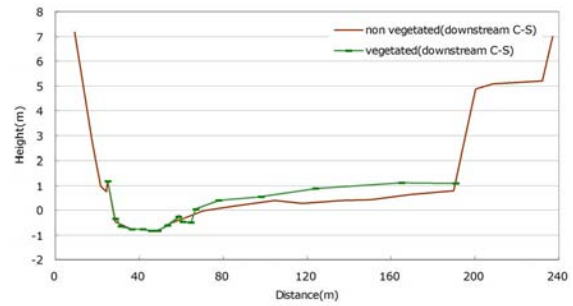


(b) RTK-GPS Survey

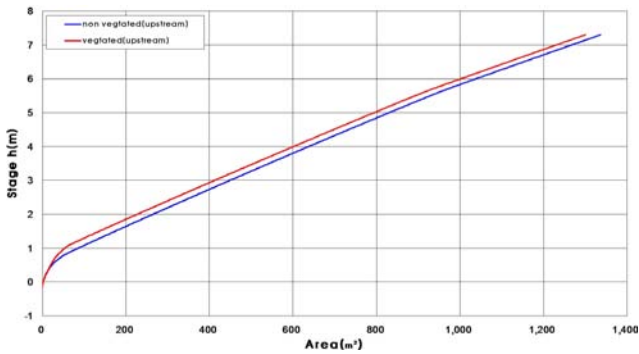
Fig. 6. Vegetation Layer Survey



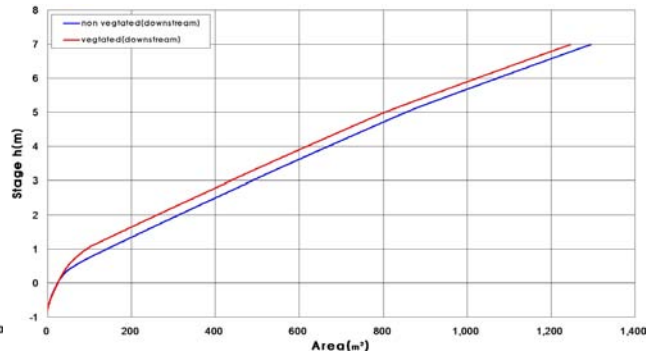
(a) Upstream Cross-Section



(b) Downstream Cross-Section



(c) Upstream Stage-Area



(d) Downstream Stage-Area

Fig. 7. Non Vegetated vs. Vegetated Cross-Section (Jeomchon Station)

높이의 횡단면 수위-단면적 변화 그래프를 나타내었다. 식생층을 고려한 수위-단면적이 고려하지 않은 단면적에 비해 과소하게 산정되는 것으로 나타났다.

향석 지점의 상하류단 횡단면은 Fig. 8에 도시하였다. Figs. 8(a) and 8(b)에는 상하류단의 식생층 높이를 고려하지 않은(non-vegetated) 하상높이의 횡단면과 홍수 후 식생조건이 도복상태의 식생층 높이를 고려한(vegetated) 식생층 높이의 횡단면을 나타내었다. Figs.

8(c) and 8(d)는 상하류단의 식생층 높이를 고려하지 않은 하상높이, 도복상태의 식생층 높이를 고려한 식생층 높이의 횡단면 수위-단면적 변화 그래프를 나타내었다. 식생층을 고려한 수위-단면적이 고려하지 않은 단면적에 비해 과소하게 산정되는 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 식생을 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우의 수위-통수단면적 편차율을 도시하였다. Fig. 9(a)는 점촌 지점에서 상류단의 경우 수위 약 0.39 m에서 동일한 통수단면적을 나타냈고,

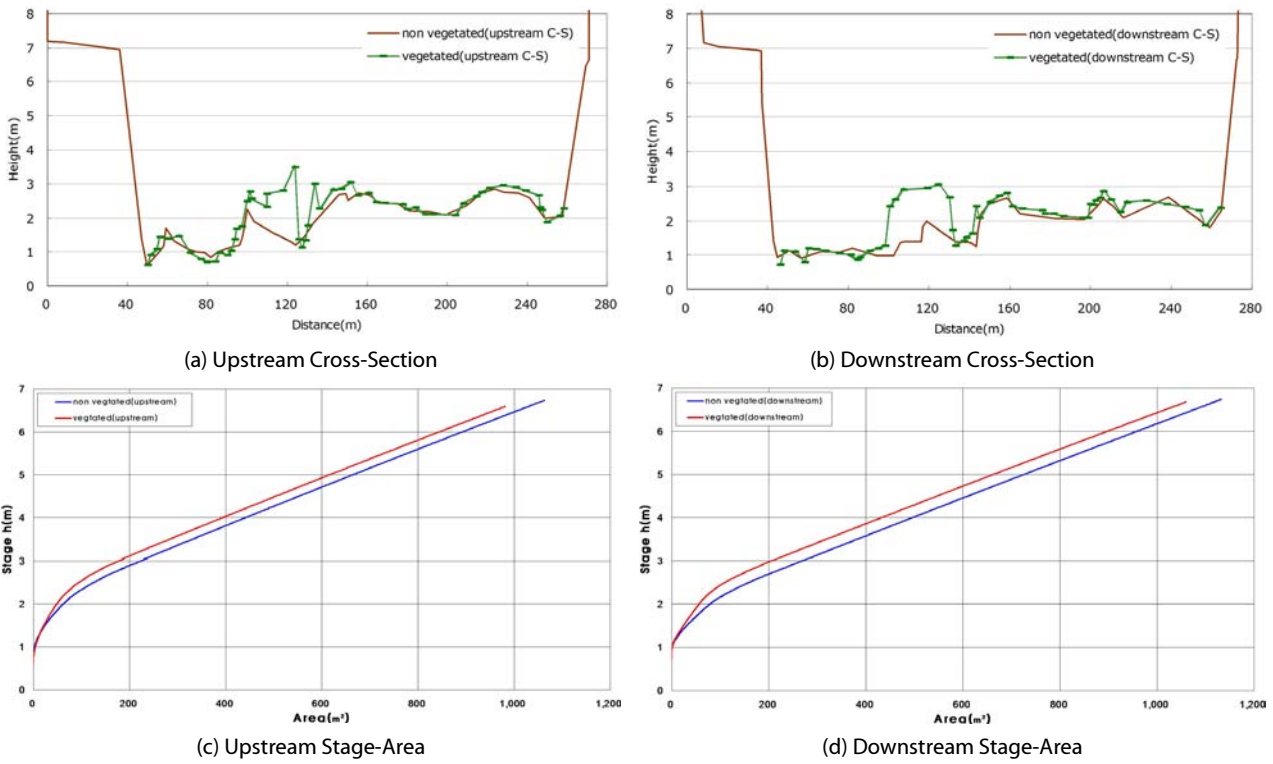


Fig. 8. Non Vegetated vs. Vegetated Cross-Section (Hyangseok Station)

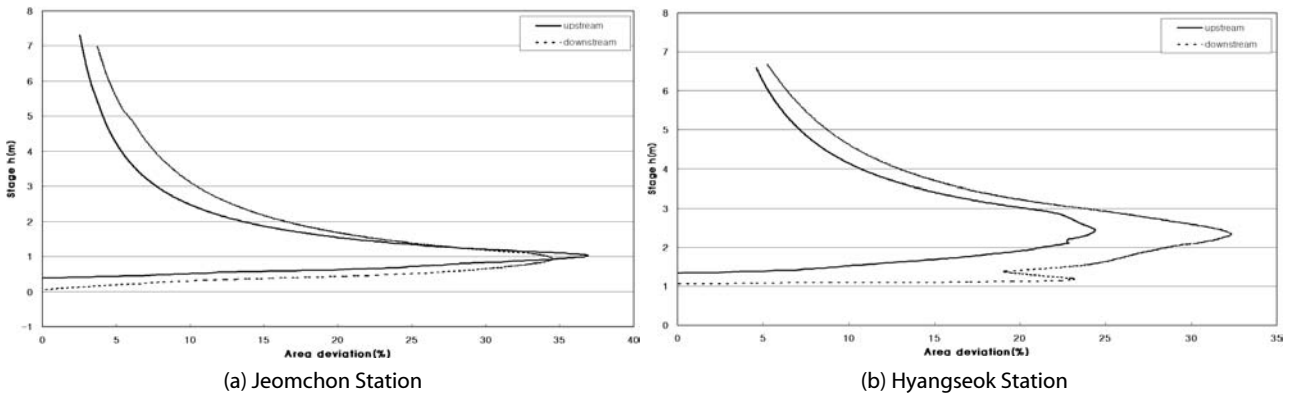


Fig. 9. Non Vegetated vs. Vegetated Stage-Area Deviation Relationship

수위가 증가함에 있어 단면적 편차율도 증가하는 경향이 나타나다 수위 약 1.02 m에서 식생층을 고려하였을 경우 단면적 편차율이 37.0 %로 통수단면적 영향이 가장크게 나타났고 최고수위까지 증가하면서 식생층에 의한 영향이 점차 감소하여 약 2.5 %의 편차율이 발생하였다. 하류단의 경우 수위 약 0.05 m에서 동일한 통수단면적을 나타냈고, 수위 약 0.94 m에서 식생층을 고려하였을 경우 단면적 편차율이 약 34.5 %로 통수단면적 영향이 가장크게 나타났고 최고수위 약 7.0 m까지 증가하면서 식생층에 의한 영향이 점차 감소하여 약 3.7 %의 편차율이 발생하였다.

Fig. 9(b)는 향석 지점에서 상류단의 경우 수위 약 1.33 m에서 동일한 통수단면적을 나타냈고, 수위가 증가함에 있어 단면적 편차율도 증가하는 경향이 나타나다 수위 약 2.44 m에서 식생층을 고려하였을 경우 단면적 편차율이 약 24.4 %로 통수단면적 영향이 가장 크게 나타났고 최고수위 약 6.60 m까지 증가하면서 식생층에 의한 영향이 점차 감소하여 약 4.6 %의 편차율이 발생하였다. 하류단의 경우 수위 약 1.06 m에서 동일한 통수단면적을 나타냈고, 수위 약 2.34 m에서 식생층을 고려하였을 경우 단면적 편차율이 약 32.3 %로 통수단면적 영향이 가장크게 나타났고 최고수위

약 6.68 m까지 증가하면서 식생층에 의한 영향이 점차 감소하여 약 5.3 %의 편차율이 발생하였다.

### 4.3 유량측정 성과 분석

부자를 이용한 유량측정은 하도 내 어느 일정수심 이상 수심이 확보되어 부자가 상하류단을 안정적으로 유하기능한 경우에 측정을 고려하게 된다. 최근 몇 년간 영강 및 내성천 유역의 경우 지속적인 가뭄으로 부자 측정이 가능한 수심이 확보될 정도의 큰 호우사상이 많지 않았다. Fig. 10에는 영강의 점촌 지점과 내성천의 향석 지점의 측정성과 분포도를 도시하였다. 영강의 경우는 2016년 7월 4~5일 갑작스런 집중호우로 수위가 크게 증가하여

수위 3.43~5.00 m 구간에서 부자를 이용한 유량측정이 실시되었다. 내성천의 경우는 2018년 7월 3일과 9월 4일 발생한 두 개의 호우사상에서 수위 3.86~5.03 m 구간에서 약 6년여만에 부자 측정을 실시하였다.

Table 2에는 각 지점별 측정된 부자 측정성과에 대하여 정리하였다. 점촌 지점의 2016년 7월 4일 발생한 호우사상의 측정성과는 침두수위 약 5.00 m에서 하강부 측정을 실시하여 약 3.43 m의 범위에서 측정을 실시하였다. 식생을 고려하지 않은 경우에는 통수 단면적이 619.68 m<sup>2</sup>에서 328.70 m<sup>2</sup>로 나타났고 식생층을 고려하였을 경우에는 576.36 m<sup>2</sup>에서 286.33 m<sup>2</sup>로 수위-통수단면적 편차율의 경우 약 -12.89~-6.99 %로 통수단면적이 감소하는 것

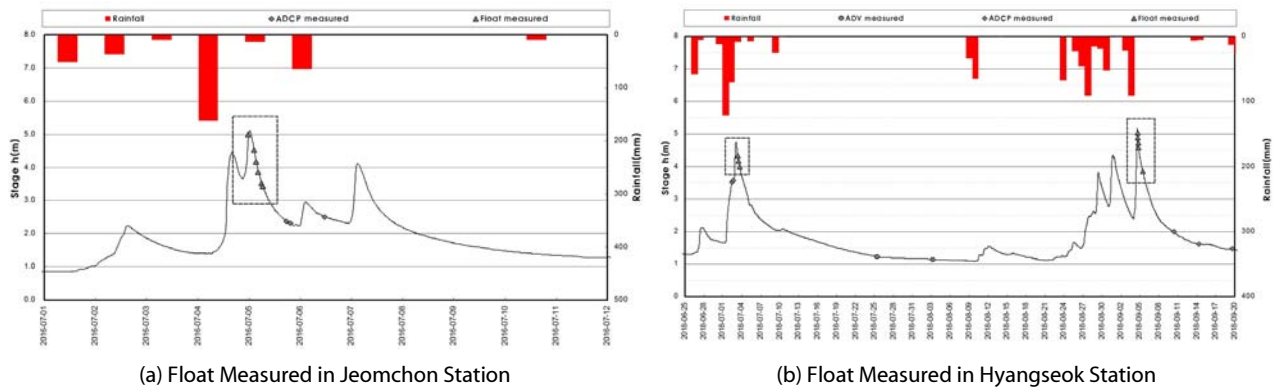


Fig. 10. Discharge Measurement Distribution

Table 2. Float Measurement Results

Stations	Date (yyyy-mm-dd hh:mm)	Stage (m)	Width (m <sup>2</sup> )	Non-vegetated			Vegetated			Vegetated area rate (%)	Vegetated discharge rate (%)
				Area (m <sup>2</sup> )	Mean velocity (m/s)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Area (m <sup>2</sup> )	Mean velocity (m/s)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)		
Jeom chon	2016-07-04 23:35	5.00	185.84	619.68	2.68	1,659.33	576.36	2.69	1,553.06	-6.99	-6.84
	2016-07-05 02:12	4.52	183.86	541.42	2.23	1,208.87	498.26	2.26	1,124.81	-7.97	-7.47
	2016-07-05 03:15	4.19	182.12	468.73	1.92	899.22	425.96	1.95	829.71	-9.12	-8.38
	2016-07-05 04:20	3.86	181.29	412.27	1.87	769.60	369.58	1.91	705.30	-10.36	-9.12
	2016-07-05 05:45	3.53	179.73	349.83	1.70	596.45	307.37	1.76	540.71	-12.14	-10.31
	2016-07-05 06:20	3.43	179.22	328.70	1.72	566.60	286.33	1.79	511.30	-12.89	-10.82
Hyang seok	2018-07-03 08:13	4.34	226.01	467.73	1.15	540.18	440.58	1.15	508.36	-5.80	-6.26
	2018-07-03 11:57	4.18	225.26	433.01	1.01	439.16	405.77	1.02	414.00	-6.29	-6.08
	2018-07-03 15:46	4.00	223.27	396.86	1.05	415.85	371.68	1.05	392.09	-6.34	-6.06
	2018-09-04 15:20	5.03	229.30	612.17	1.33	816.32	584.93	1.33	780.42	-4.45	-4.60
	2018-09-04 16:20	4.90	228.67	583.38	1.33	773.02	556.14	1.33	737.50	-4.67	-4.82
	2018-09-04 17:32	4.73	227.86	547.63	1.27	696.62	521.35	1.28	667.63	-4.80	-4.34
	2018-09-04 18:50	4.58	225.61	518.49	1.22	630.38	491.25	1.22	600.55	-5.25	-4.97
2018-09-05 10:08	3.86	223.75	367.03	0.99	364.55	341.57	1.01	344.30	-6.94	-5.88	



로 나타났다. 따라서 유량산정에 있어서 수위 5.00 m는 1,659.33 m<sup>3</sup>/s에서 1,553.06 m<sup>3</sup>/s, 수위 3.43 m는 566.60 m<sup>3</sup>/s에서 511.30 m<sup>3</sup>/s로 유량 편차율이 -10.82 ~ -6.84 %로 감소하는 경향이 나타났다. 향석 지점의 2018년 7월 3일 발생한 호우사상의 측정성과는 약 4.34 m에서 하강부 측정을 실시하여 약 4.00 m의 범위에서 측정을 실시하였고, 2018년 9월 4일 발생한 호우사상의 측정성과는 침두수위 약 5.03 m에서 하강부 측정을 실시하여 약 3.86 m의 범위에서 측정을 실시하였다. 식생을 고려하지 않은 경우에는 통수 단면적이 612.17 m<sup>2</sup>에서 367.03 m<sup>2</sup>으로 나타났고 식생층을 고려하였을 경우에는 584.93 m<sup>2</sup>에서 341.57m<sup>2</sup>으로 수위-통수단면적 편차율의 경우 약 -6.94 ~ -4.45 %로 통수단면적이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 유량산정에 있어서는 수위 4.73 m는 696.62 m<sup>3</sup>/s에서 667.63 m<sup>3</sup>/s, 수위 4.34 m에서 540.18 m<sup>3</sup>/s에서 508.36 m<sup>3</sup>/s로 유량 편차율이 -6.26 ~ -4.34 %로 감소하는 경향이 나타났다.

위 측정성과를 바탕으로 각 당해연도의 수위-유량관계곡선에 추가하여 Fig. 11과 같이 비교검토했었다. 식생층을 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우 Fig. 11(a)의 점촌 지점은 평균 약 -8.8 %의 편차가 발생하였지만 부자 측정성과 이하 수위에서 측정된 당해 ADCP 측정성과와 동일한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11(b)의 향석 지점은 평균 약 -5.4 %의 편차가 발생하였지만 부자 측정성과 이하 수위에서 측정된 과거 ADCP 측정성과와 동일한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 식생층을 고려하여 산정된 유량의 정확도 검증을 위한 참값이 존재하는 경우 정량적인 정확도 검토가 가능하지만, 검토 가능한 비교치가 없는 경우 부자 측정성과 이하 수위에서 보다 정확하게 측정된 ADCP 또는 유속계 성과들과의 연속성 비교를 통해 식생층을 고려한 유량 산정값의 정성적인 검토를 수행할 수 밖에 없는 한계를 가지고 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 식생하천에서 부자 측정에 의한 유량산정 오차를 줄이기 위해 식생된 개수로 흐름의 유속분포를 검토하여 영강의 점촌, 내성천의 향석 두 개의 지점에서 식생층 높이를 고려하기 위해 홍수 후 하도 내 도복상태의 식생높이를 검토하였다. 이를 토대로 통수단면적 적용에 있어서 유속이 0이 되는 식생층 높이의 투영면적을 제외한 유효단면적을 적용하여 유량을 산정하였고, 식생층을 고려하지 않고 산정된 유량과 비교하였다.

도복상태의 식생층 투영면적 검토를 위해 식생층 유무에 따른 수위-통수단면적 편차율을 검토한 결과 점촌 지점은 수위 약 1.00 m에서 35.7 %로 식생층 영향이 통수에 가장 큰 영향이 발생하는 것으로 확인되었고, 수위가 증가하면서 최고수위에서 약 3.0 %에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 향석 지점은 수위 약 2.40 m에서 28.4 %로 식생층 영향이 통수에 가장 큰 영향이 발생하는 것으로 나타났고, 수위가 증가하면서 최고수위에서 약 5.0 %에 영향이 미치는 것으로 나타났다.

측정성과 분석에 있어서는 점촌 지점은 2016년 7월 4-5일 발생한 집중호우에서 측정된 6개의 성과를 분석하였고, 향석 지점은 2018년 7월 3일과 9월 4일 발생한 두 개의 호우사상에서 측정된 8개의 성과를 분석하였다. 식생층을 고려하였을 경우 점촌 지점은 통수단면적이 약 -12.89 ~ -6.99 % 차이가 발행하여 유량에 있어서도 -10.82 ~ -6.84 % 감소하는 경향이 나타났다. 향석 지점에서도 마찬가지로 통수단면적이 약 -6.94 ~ -4.45 % 차이가 발행하여 유량에 있어서도 -6.26 ~ -4.34 % 감소하는 경향이 나타났다. 이와 같이 식생층을 고려하여 산정된 유량은 부자 측정성과 이하 수위에서 측정된 성과들간에도 동일한 경향의 연속성이 나타나 보다 적합도 높은 실제 하천유량을 산정한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안된 유속분포가 0인 식생층 높이를 부자 측정방

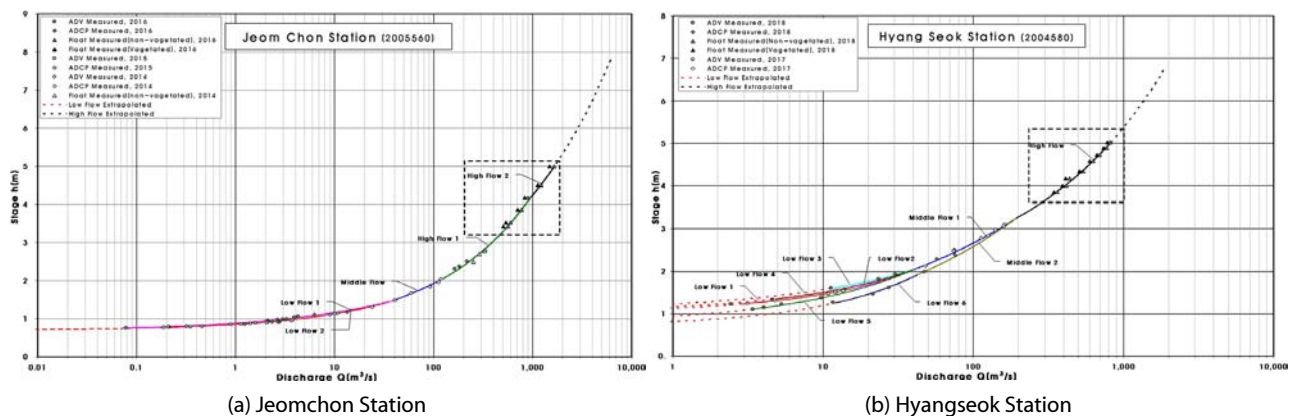


Fig. 11. Stage-Discharge Curve

법 외에 전자파, 레이더, 영상 유속계 등 유속-면적법을 이용한 유량산정 방법에 고려 할 경우 보다 정확한 유량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 도복상태의 식생층 높이를 고려하는 기준에 있어서 측정자의 주관적인 판단 기준에 의해 유량 차이가 변화하는 한계를 가지고 있다. 따라서 식생 종류, 밀도, 도복상태 등 식생층 조건, 식생층 측량시점 및 측량기준 정립을 위해 표준적인 절차에 관한 후속 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

## References

- Chistensen, B. A. (1985). "Open channel and sheet flow over flexible roughness." *Proceedings of the 21st IAHR Congress*, Melbourne, Australia, pp. 462-467.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*, McGraw Hill, N.Y.
- Darby, S. E. (1999). "Effect of riparian vegetation of flow resistance and flood potential." *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 10, pp. 583-586.
- Darby, S. E. and Thorne, C. R. (1996). "Predicting stage-discharge curves in channels with bank vegetation." *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 10, pp. 583-586.
- El-Hakim, O. and Salama, M. M. (1992). "Velocity distribution inside and above branched flexible roughness." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp. 914-927.
- Ferro, V. (1999). "Friction factor for gravel-bed channel with high boulder concentration." *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 7, pp. 771-778.
- French, R. H. (1986). *Open-channel hydraulics*, McGraw Hill, Singapore.
- Graf, W. H. (1998). *Fluvial hydraulics : Flow and transport processes in channels of simple geometry*, Wiley, England.
- Haber, B. (1982). *Über den Erosionsbeginn bei der Überstromung von flexiblen Rauheitselementen*, Mitteilungen des Leichtweiss Institutes für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 74.
- ISO 748 (2007(E)). *Hydrometry-Measurement of liquid flow in open hannels using currentmeters or floats*.
- Kouwen, N. and Li, R. M. (1980). "Biomechanics of vegetative channel linings." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 106, No. 6, pp. 1085-1103.
- Kouwen, N. and Unny, T. E. (1973). "Flexible roughness in open channels." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 106, No. 6, pp. 713-728.
- Kouwen, N., Unny, T. E. and Hill, H. M. (1969). "Flow retardance in vegetated channels." *Journal of Irrigation and Drainage Division*, Vol. 95, No. 2, pp. 329-340.
- Kwon, K. and Choi, S. U. (2000). "Analysis of vegetated open-channel flows using the k- $\epsilon$  turbulence model." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 20, No. 1-B, pp. 11-21 (in Korean).
- Lee, S. (2002). "A study of the relationship between in-stream vegetation and sediment transport by a hydraulic model experiment." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 753-762 (in Korean).
- Masterman, R. and Thorne, C. R. (1992). "Predicting influence of bank vegetation on channel capacity." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 7, pp. 1052-1058.
- Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975). "Analysis of flow through vegetation." *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol. 101, No. 7, pp. 871-884.
- Ree, W. O. (1949). "Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways." *Agricultural Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 184-187.
- Rhee, D. S., Woo, H., Kwon, B. A. and Ahn, H. K. (2006). "Test study on flow resistance for some selected vegetations." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1291-1294 (in Korean).
- Song, J. W. and Park, S. S. (2004). "Roughness characteristics and velocity profile in vegetated and nonvegetated channels." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 24, No. 6B, pp. 545-552 (in Korean).
- Stephan, U. and Guthnecht, D. (2002). "Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation." *Journal of Hydrology*, Vol. 269, pp. 27-43.
- Yeo, H. K., Park, M., Kang, J. G. and Kim, T. (2004). "Experimental study of flow resistance and flow characteristics over flexible vegetated open channel." *Journal Korean Env. Res. & Reveg. Tech.*, Vol. 7, No. 6, pp. 61-74 (in Korean).
- Yoon, T. H., Shin, Y. J. and Lee, J. S. (2002). "Flow variation in open channel due to presence of vegetation zone." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 22, No. 2B, pp. 143-149 (in Korean).