

# 정수식생이 존재하는 자연하도에서 1차원 수치모형

## 1D Numerical Model for Rivers Flows with Emergent Vegetations on Floodplains and Banks

송 주 일\* / 김 종 우\*\* / 임 창 수\*\*\* / 윤 세 의\*\*\*\*

Song, Ju Il / Kim, Jong Woo / Rim, Chang Soo / Yoon, Sei Eui

### Abstract

A 1D numerical model for steady flow, based on the energy equation, was developed for natural rivers with emergent vegetations on floodplains and banks. The friction slope was determined by the friction law of Darcy-Weisbach. The composite friction factor of the each cross section was calculated by considering bottom roughness of the main channel and the floodplains, the flow resistance of vegetations, the apparent shear stress and the flow resistance caused by the momentum transfer between vegetated areas and non-vegetated areas. The interface friction factor caused by flow interaction was calculated by empirical formulas of Mertens and Nuding. In order to verify the accuracy of the suggested model, water surface elevations were calculated by using imaginary compound channels and the results of calculations were compared with that of the HEC-RAS. The sensitivity analysis was performed to confirm changed friction factors by vegetations density etc. The suggested model was applied to the reach of the Enz River in Germany, and estimated water surface elevations of the Enz River were compared with measured water surface elevations. This model could acceptably compute not only water surface elevations with low discharge but also that with high discharge. So, the suggested model in this study verified the applicability in natural rivers with emergent vegetations.

**Keywords** : vegetated channel, flow resistance, friction factor, momentum transfer, Mertens, Nuding

### 요 지

본 연구에서는 에너지 방정식에 기초하여 정수 식생이 존재하는 자연하도에 적용 가능한 1차원 수치모형을 제시하였다. 수위계산을 위한 마찰경사는 Darcy-Weisbach의 마찰식에 의해 계산되었다. 각 단면의 전체 Darcy-Weisbach 마찰계수는 하상조도높이, 식생, 식생구역과 비식생구역 사이의 전단저항, 그리고 홍수터와 주수로의 경계면 전단저항을 고려하여 산정하였다. 경계면 마찰계수는 Mertens방법과 Nuding방법에 의해 계산되었다. 제시된 모형을 가상하도에 적용하고 HEC-RAS모형 모의결과와 비교, 검증하였고, 식생밀도 등에 대하여 마찰계수의 민감도 분석을 실시하였다. 모형의 적용성 검토를 위하여 독일 Enz강 일부구간을 대상으로 수치모의를 실시하고 실측수위와 비교하였다. 식생이 존재하는 Enz강의 실측수위와 계산수위를 비교한 결과 식생의 영향을 거의 받지 않고 주수로에 흐름이 형성되는 저유량의 경우와 식생의

\* 교신저자, 경기대학교 토목공학과 박사과정 (e-mail: toyou012@hanmail.net)

Corresponding Author, Ph.D candidate, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi-do 442-760, Korea

\*\* 경기대학교 토목공학과 강사 (e-mail: kimjw0426@nate.com)

Instructor, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi-do 442-760, Korea

\*\*\* 경기대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: csrim@kyonggi.ac.kr)

Associate Pfor., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi-do 442-760, Korea

\*\*\*\* 경기대학교 토목공학과 교수 (e-mail: syyoon@kyonggi.ac.kr)

Pfor., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi-do 442-760, Korea

영향을 지배적으로 받는 고유량 흐름 모두에서 합리적인 수위를 예측하여 제시된 모형의 적용 가능성을 확인하였다.

**핵심용어** : 식생하도, 흐름저항, 마찰계수, 운동량 교환, Mertens, Nuding

## 1. 서론

하천의 환경과 경관적 측면의 가치는 근래의 하천관리에서 그 중요성이 강조되고 있다. 2007년 개정된 하천법에서는 친환경적 하천 사업 및 관리가 한층 강화되었으며 현재 대부분의 하천관련 사업은 친환경 요소를 고려하는 것이 필수적이다(국토해양부, 환경부, 2008). 하천의 호안이나 홍수터에 존재하는 식생은 친환경적 요소로써 하천 이용증진, 하천경관 향상 및 수질개선, 물 서식처형성 등 주요한 역할을 하고 있다. 일반적으로 식생하도의 흐름은 복잡한 양상을 갖는 특징이 있다. 하도 내에 존재하는 식생은 비식생구역의 유속을 증가시키는 한편, 흐름저항의 차이로 경계면에서는 유속차가 발생하게 된다. 이러한 유속 차이는 식생 경계면에 전단층을 형성하고 질량 및 운동량 교환(interaction)을 발생시킨다. 이는 결국 흐름저항으로 작용하여 통수능을 감소시키고 홍수위를 증가시킬 수 있다. 그러므로 식생이 존재하는 하도의 유속 및 수위는 정확히 계산되어야 하고, 이를 위해서는 복합적으로 발생하는 흐름저항이 합리적으로 산정되어야 한다. 이러한 이유로 식생하도의 흐름저항 산정을 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다.

Li and Shen (1973)은 원형 모형식생 의해 발생하는 후류(wake)를 측정함으로써 완전히 침수되지 않은 식생에 의한 흐름저항을 연구하고, 실험결과를 통해 식생의 배치형태가 유량비에 상당한 영향을 주는 것을 밝혔다. Petryk and Bosmajian (1975)은 동수반경과 식생밀도의 함수로써 Manning 조도계수를 산정하는 방법을 제시하였다. Lindner (1982)는 Li and Shen (1973)의 연구결과로부터 식생의 항력계수와 마찰계수를 산정하는 방법을 제시하였다. Pasche (1984), Pasche and Rouvé (1985)는 강성 원형식생 실험을 실시하고 반복계산을 통해 경험적으로 항력계수를 산정하는 방법을 제시하였다. Mertens (1989)와 Nuding (1991)은 항력계수가 실제 대부분의 경우에서 1.5임을 고려하여 Lindner (1982)의 방법을 간략화하였다. 그러나 Nuding (1991)은 식생을 좀 더 실제와 가깝게 모사하기 위해 줄기와 가지의 영향을 모두 고려할 수 있는 방법을 제시하였고 이후에 Nuding (1998)은 복단면에서도 적용이 가능하도록 연구를 확장하였다. Fukuoka et al. (1992)은 하도내에 여러 가지 배열로 존재하는 밀집한 수목군으로 인한 저항증가, 수목군에 의해 형성되는

복단면 형상으로 인한 저항을 고려하여 운동량방정식을 제안하였으며 이로부터 홍수류의 유속분포와 수위 종단형을 예측할 수 있음을 발표하였다. Darby (1999)는 1990년대 이후 하천식생에 의한 흐름저항 모형 연구를 종합하여, 식생 하천에서 횡방향 전단을 고려한 운동량 방정식에 기초하고, Masterman and Throne (1992)의 식생저항 모형에 Darby and Thorne (1996)의 자갈하천 모형을 결합하여, 모래나 자갈하천에서 다양한 식생 형태에 따른 흐름저항을 추정하였다. Järvelä (2002)은 잔디와 버드나무 가지 등 실제 식생을 이용하여 흐름저항 특성을 실험적으로 연구하였다. Stone and Shen (2002)은 침수와 정수조건에서 원형 강성식재 시 저항특성을 실험하였고, James et al. (2004)은 침수조건에서 식생의 밀도변화에 따른 흐름저항특성을 실험에 의해 분석하였다. Carollo et al. (2005)은 실제 잔디를 이용하여 침수조건에서 식생밀도에 따라 흐름저항과 유속의 함수관계를 제시하였다. Helmiö (2004)는 Nuding (1991)이 제안한 흐름저항을 이용하여 운동량방정식을 이용한 1차원 부정류 모형을 제시하고 이를 Rhine강에 적용한바 있다. Świątek et al. (2006)은 Pasche (1984)의 흐름저항과 에너지 방정식을 연계하여 1차원 정류모형을 제시하고 Lower Riebrza강에 대해서 검토하였다.

국내에서는 윤세의 등 (1997)이 식생구역과 비식생구역 사이의 전단력을 고려한 준 2차원 모형을 이용하여 수목이 있는 가상하도의 수위를 예측하였다. 조홍제 등 (2002)은 실제 하천을 대상으로 수리모형을 제작하고 식재 시 수리 특성변화를 검토하였고, 윤태훈 등 (2002), 송재우와 박성식 (2004)은 침수조건에서 개수로의 흐름변화 및 유속분포 특성을 분석하였다. 여흥구 등 (2004)은 강성과 연성 식생에 의한 흐름저항 및 흐름특성을 실험적으로 연구하였으며, 이동섭 등 (2006)은 선별된 식생에 대한 식생조도계수를 산정하였다. 권기원과 최성욱 (2000)은 k- $\epsilon$  난류모형을 이용하여 식생된 개수로의 흐름구조를 수치모의 하였고, 강형식과 최성욱 (2007)은 레이놀즈 응력모형을 이용하여 주흐름방향渦 구조를 수치모의 하였다. 최성욱 (2005, 2008)은 Yen (1984)이 제안한 배수방정식을 이용하여 복단면 1차원 수치모형을 개발하고 이를 HEC-RAS 결과와 비교하였고, 운동량 방정식에 식생항력 항을 추가하여 2차원 수치모형 FFC4모형을 개발하였다. 이준호 (2006)는 직사각형 단단면 수로와 홍수터를 가지는 복단

면 수로에서 유량, 수심비, 식재밀도, 식재위치 등을 변화시키며 실험을 실시하고 수리특성변화를 분석하였다. 김원(2009)은 식생항력을 추가한 Saint-Venant식을 이용하여 1차원 부정류 모형을 개발하고 실험결과와 비교한 바 있다.

전통적으로 일반하도의 유속 및 수위 계산은 주로 에너지 방정식에 기초한 1차원 수치모형들에 의해 이루어져왔다. 그러나 컴퓨터의 발달로 향상된 계산능력은 2, 3차원 모형들의 사용을 가능하게 함으로써 하천의 흐름을 좀 더 자세히 파악할 수 있게 하였다. 특히, 이러한 다차원 모형들은 만곡수로의 편수위 계산, 교각 주변부의 세굴 검토, 하상변동, 오염물 확산 등 많은 경우에서 필요로 하고 있다. 그러나 유로가 긴 구간의 하천에 대해 수치모의를 하게 되는 경우에는 하천 내에 존재하는 구조물, 식생 등을 모형으로 구축하는 과정과 입력자료 등의 한계 때문에 실무에서 사용하기에는 아직까지도 큰 제약이 있는 실정이다. 유로가 길어 1차원의 특성이 지배적인 하천의 수면곡선, 홍수터와 주수로의 평균유속 등을 수치적으로 해석함에 있어서는 1차원 모형이 지금도 효율적이다.

따라서 본 연구에서는 에너지 방정식에 기초하고, 전체 단면을 몇 개의 분할단면으로 나눈 후 정수식생의 직접적 영향, 식생구역과 비식생구역 간, 주수로와 홍수터 간 운동량 교환에 의한 흐름저항을 고려할 수 있는 1차원 수치모형을 제시하였다. 운동량 교환에 의한 흐름저항의 산정은 단면의 형태와 식생이 존재하는 위치 등을 고려할 수 있도록 하였으며, Mertens의 경험식과 Nuding의 경험식을 이용하여 산정하였다. Mertens식과 Nuding식을 각각 이용하여 1차원 수치모형을 제시한 연구논문은 있지만 식생이 홍수터 또는 호안 등 그 위치에 따라 두 방법을 혼용하여 수치모형을 구축한 것이 본 논문의 특징이다. 제시된 모형을 독일 포르츠하임(Pforzheim) 시의 Enz강에 적용하고, 실측수위와 비교를 통해 적용성을 검토하였다. 본 논문에서 제시한 모형은 식생이 완전히 침수되지 않은 정수상태의 식생만을 고려할 수 있고, 현재 사류상태는 적용할 수 없다.

## 2. 기본이론

### 2.1 부등류 계산

부등류 흐름에서의 수위변화는 Eqs. (1) and (2)와 같이 표준축차법에 의해 계산된다.

$$\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + H_2 = \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + H_1 + h_e \quad (1)$$

여기서,  $H_1$ ,  $H_2$ 는 구간 양단의 수위[m],  $V_1$ ,  $V_2$ 는 구간

양단의 평균유속[m/s],  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 는 구간 양단의 유속 및 에너지 보정계수[-],  $g$ 는 중력가속도[m/s<sup>2</sup>],  $h_e$ 는 에너지 손실수두[m]이다.

$$h_e = \frac{1}{2}(S_{f1} + S_{f2})L + C \left| \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

여기서,  $S_{f1}$ ,  $S_{f2}$ 는 구간 양단의 마찰경사[-],  $L$ 는 구간 거리[m],  $C$ 는 단면 확대 및 축소 손실계수[-]이다. 각 단면에서의 유속은 Darcy-Weisbach 공식에 의해 Eq. (3)과 같이 계산되고, 마찰경사  $S_f$ 는 Eq. (4)와 같다.

$$V = \sqrt{\frac{8gR_{tot}I}{f_{tot}}} \quad (3)$$

$$S_f = f_{tot} \frac{vQ}{8gA^2R_{tot}} \quad (4)$$

여기서,  $f_{tot}$ 는 단면 합성 마찰계수[-],  $g$ 는 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>],  $R_{tot}$ 는 단면 합성 동수반경[m],  $I$ 는 에너지 경사 [-]이고, 각 분할단면의 동수반경은 Eq. (5)와 같다.

$$R_i = \frac{f_i v_i^2 L_i}{8gH_{f,i}} \quad (5)$$

여기서,  $f$ 는 Darcy-Weisbach 마찰계수[-],  $v$ 는 평균유속 [m/s],  $H_f$ 는 손실수두[m], 아래첨자  $i$ 는 분할단면을 의미한다. Helmiö (2005)는 각 분할단면의 수위와 수면경사가 주수로(아래첨자  $mc$ )의 수위 및 수면경사와 같다고 Eq. (6)과 같이 가정하고, Eqs. (7) and (8)과 같이  $R_{tot}$ 와  $f_{tot}$  산정식을 제시하였다.

$$\frac{8gH_{f,i}}{L_i} = \frac{8gH_{f,mc}}{L_{mc}} = \frac{f_{mc} v_{mc}^2}{R_{mc}} \quad (6)$$

$$R_{tot} = \frac{\sum R_i Q_i^2}{\sum Q_i^2} \quad (7)$$

$$f_{tot} = \frac{8gH_f R_{tot} (\sum A_i)^2}{L_{tot} (\sum Q_i)^2} \quad (8)$$

따라서 Eqs. (1)~(8)의 과정에 의해 부등류의 수위를 계산하는 경우 각 분할단면들의 마찰계수 및 유속 계산이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 단면의 형태, 식생조건 등을 고려하여 단면을 최대 7개의 분할단면으로 나누고 각 분할단면별로 하상 조도높이, 식생, 경계면의 운동량 교환 등에 의한 Darcy-Weisbach 마찰계수를 산정하였다. Darcy-Weisbach 마찰계수 사용의 장점은 Manning의  $n$ 이나 Chezy의  $C$ 와 같은 마찰계수와 다르게 무차원이라는 점이다. Fig. 1은 계산순서를 보여주고 있다.

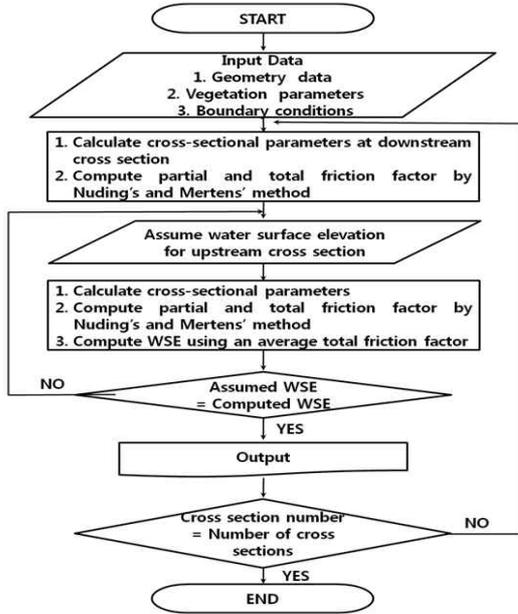


Fig. 1. A Flow Chart of the Computational Procedure

## 2.2 하상 마찰계수와 식생 항력계수

각 분할단면이 갖는 흐름저항은 하상조도높이와 식생으로부터 결정된다. 여러 연구자들의 연구결과에 따르면 식생구역의 전체 마찰계수는 하상 조도높이에 의한 마찰계수  $f_s$ 와 식생에 의한 항력계수  $f_v$ 의 합이며, 식생의 밀도가 큰 경우  $f_s$ 는  $f_v$ 에 비하여 상대적으로 미소하므로 무시할 수 있다. 마찰계수  $f_s$ 는 Rickert(1988)가 제안한 Eq. (9)에 의해 계산된다.

$$\frac{1}{\sqrt{f_s}} = -2.03 \log \left( \frac{K_s}{14.84R} \right) \quad (9)$$

여기서  $f_s$ 는 하상조도높이에 의한 마찰계수[-],  $K_s$ 는 하상조도높이[m],  $R$ 는 동수반경[m]이다. 식생에 의한 항력계수  $f_v$ 는 Lindner(1982), Kaiser (1984), Pasche (1984)에 의해 조사되었다. 식생이 존재하는 구역에서는  $f_v$ 는 식생의 침수된 부분을 고려하여 Eq. (10)과 같이 계산하게 된다.

$$f_v = \frac{4h_p d_p}{a_x a_y} C_{wR} \cos \alpha \quad (10)$$

여기서  $h_p$ 는 식생의 침수 높이[m],  $d_p$ 는 식생 직경[m],  $a_x$ 는 흐름방향의 식생 간격[m],  $a_y$ 는 흐름 직각방향의 식생 간격[m],  $C_{wR}$ 은 무차원 식생 항력계수[-],  $\alpha$ 는 하상 횡방향 경사 각[-]이다. 무차원 항력계수  $C_{wR}$ 은 흐름유속  $v_i$ 와 평균유속  $v_v$ 의 비( $v_i/v_v$ ) 그리고 식생주변에서 수면에 형성되는 파고의 높이와 관계된다.

$$C_{wR} = \left( 1.1 + 2.3 \frac{d_p}{a_y} \right) \left( \frac{v_i}{v_v} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{1 - d_p/a_y} - 1 \right) \quad (11)$$

Pasche(1984)는 식생을 지나는 흐름의 상대유속 비 ( $v_i/v_v$ ) 산정을 위한 경험식으로 제안하였고, Rickert (1988)는 이를 Eq. (12)와 같이 간략화하여 제시하였다.

$$\left( \frac{v_i}{v_v} \right)^2 = 0.6 + 0.5 \log \left( \frac{a_x}{a_y} \right) \quad (12)$$

## 2.3 경계면 마찰계수

1980년대 초반 독일에서는 식생 영향뿐만 아니라 주수로와 홍수터, 식생구역과 비식생구역 사이에서 발생하는 운동량 교환에 의한 흐름저항을 Fig. 2와 같은 단면들을 대상으로 검토하였다. 수리실험결과를 바탕으로 Pasche (1984), Mertens (1989), Nuding (1991)은 운동량 교환에 의해 발생하는 추가적인 에너지 손실을 계산하기 위해 경계면 마찰계수 ( $f_T$ ) 산정방법을 각기 제시하였다. Pasche (1984)는 거친 홍수터를 갖는 복단면의  $f_T$ 를 식생직경과 식생간격의 비, 식생간격과 후류(wake) 길이 및 폭 비, 운동량 교환 폭 등의 함수로 표현하였다. Mertens (1989)는 호안에 식생이 존재하는 사다리꼴단면의  $f_T$ 를 경계면의 가상의 조도높이( $K_T$ )와 운동량 교환 폭의 함수로 제안하였다. Nuding (1991)은 부분적으로 식재된 직사각형 단면의  $f_T$ 를 식생구역과 비식생구역의 유속비, 경계면 높이와 동수반경 비, 운동량 교환 폭 비의 함수로 제시하고, 이후에 복단면에서 적용할 수 있도록 하였다(Helmiö, 2004).

본 연구에서는 Table 1에서 확인할 수 있듯이 Nuding 방법이 단단면과 복단면 모두에 적용할 수 있다는 것과



Fig. 2. The Laboratory Studies on Partly Vegetated Channels Carried Out in German Univ.

Table 1. Differences Between the Method of Pasche(1984), Mertens(1989), and Nuding(1991)

Property	Pasche	Mertens	Nuding
Applicable to simple concave channels with bank vegetation	X	O	O
Applicable to compound channels with floodplain vegetation	O	X	O
Wake width and length affect the friction factor of the floodplain and the interface	O	X	X
Plant diameter affects the interface friction factor	X	O	O
Iteration of the contributing main channel width	O	O	X
Computation of submerged vegetation	X	X	O
Contributing floodplain width related to the vegetation distances	O	X	O

식생에 의한 후류(wake)의 폭, 길이 등과 같은 복잡한 흐름변수를 사용하지 않아 Pasche방법과 비교하여 마찰계수 산정방법이 상대적으로 간단하다는 장점을 고려하여, 기본적으로 식생구역과 비식생구역사이의 경계면, 또는 홍수터와 주수로사이 경계면의 마찰계수는 Nuding 방법으로 산정하였다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 식생이 호안이나 제방 등에 존재하는 경우 경계면의 마찰계수는 Mertens방법을 이용하여 산정하였다. Nuding의 경계면 마찰계수 산정식은 Eq. (13)과 같다.

$$f_T = 4 \left[ \log \left( \frac{v_{mc}}{v_{fp}} \right) \right]^2 \frac{R_{fp}}{h_T} \frac{B_{II}}{B_{mc}} \quad (13)$$

여기서,  $V_{mc}$ 는 주수로 유속[m/s],  $V_{fp}$ 는 홍수터 유속 [m/s],  $R_{fp}(=A_{fp}/W_{fp})$ 는 홍수터 동수반경[m],  $h_T$ 는 식생 침수높이[m],  $B_{mc}(=A_{mc}/h_T)$ 는 주수로 폭[m],  $A_{mc}$ 는 주수로 면적[m<sup>2</sup>],  $B_{II}$ 는 홍수터의 운동량 교환 폭[m]이다.  $h_T/R_{fp}$  비는 질량교환 공간으로써 홍수터 형태를 결정한다. 홍수터가 넓은 경우  $R_{fp}$ 가  $h_T$ 와 비슷해지기 때문에

$h_T/R_{fp}$  비는 1.0에 가까워진다.  $B_{mc}/B_{II}$ 는 주수로 면적에서 난류 와가 발생하는 거리를 의미한다. 하천을 따라 식생이 존재하는 경우  $B_{II}$ 는 Eq. (14)에 의해 계산된다.

$$B_{II} = 3.2 \sqrt{a_x d_p} \quad (\text{tree}) \quad (14a)$$

$$B_{II} = 0.15 h_T \quad (\text{grass}) \quad (14b)$$

Mertens 방법에 의한 마찰계수  $f_T$  산정식은 Eqs. (15)~(22)와 같다.

$$\sqrt{\frac{8}{f_T}} = 2.5 \ln \left( \frac{B_{III}}{K_T} \right) + 6.27 \quad (15)$$

여기서,

$$K_T = C \times B_{II} + K_{TO} \quad (16)$$

$$C = 1.0 - 0.25 \times 10^{-3} B_* + 0.05 (10^{-3} \times B_*)^{1.5} \quad (17)$$

$$B_{II\max} = B_{III} \quad 16 \leq B_* \leq 6,000 \quad (18)$$

$$B_{II\max} = 0.25 \times B_*^{0.5} \times B_{III} \quad B_* < 16 \quad (19)$$

$$B_* = \left( \frac{a_x}{a_y} - 1 \right)^2 \times \left( \frac{a_y}{d_p} \right) \quad (20)$$

$$B_{II} = B_{II\max} / 2 \quad (21)$$

$$K_{TO} = 1.3 d_p \quad (22)$$

Schnauder (2004)는 실험적으로 결정된 조도높이값들을 사용하여 Pasche (1984), Mertens (1989), Nuding (1991) 방법을 검토하였다. 검토결과 수심이 커지는 경우 이들의 방법이 경계면의 조도높이를 상당히 과대 산정하고 있음을 확인하였다. 또한 민감도 분석을 통하여 이러한 과대산정이 잘못 산정된  $B_{II}$ 값에 기인한 것임을 밝혔다. Schnauder (2004)는  $B_{II} < 2h_T$ 인 경우  $B_{II}$ 를 Eq. (23)과

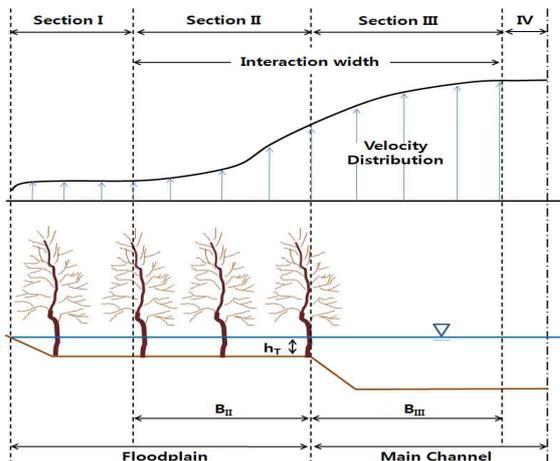


Fig. 3. Subdivision of Cross-Section with Fictive Interface (Schumacher, 1995)

같이 제시하였다. 그러나 Schnauder (2004)는 이 같은 이  
유의 물리적인 정당성은 찾지 못했다. 이 방법의 정확성은  
계산에 포함되는 여타의 경험적 계수들의 정확도에 의존하  
고 있으며, 이 방법이 일반적으로 사용될 수는 없다(Dijk,  
2006).

$$B_{II} = 0.022h_T + 0.03 \quad (23)$$

## 2.4 분할단면별 마찰계수 산정

각 분할단면의 마찰계수는 분할단면의 위치, 흐름조건  
등에 따라  $f_s$ ,  $f_v$ ,  $f_T$ 의 조합으로 결정된다. 분할단면에  
식생이 존재하지 않고 하상조도높이에 의한 흐름저항만  
발생하는 경우 마찰계수는  $f_s$ 만을 고려하게 된다. 그러나  
분할단면 내에 식생이 존재하고 흐름에 영향을 주는 경우,  
이러한 분할단면의 마찰계수는  $f_s$ 와 식생에 의한 항력계  
수  $f_v$ 의 합이다. 식생의 밀도가 큰 경우  $f_s$ 는  $f_v$ 에 비하여  
상대적으로 미소하므로 무시할 수 있고, 본 연구에서는  
식생구역의 밀도가 1.0 이상이 되는 경우에  $f_s$ 를 무시하  
였다. 식생밀도  $w_v$  [ $m^{-1}$ ]는 Eq. (24)와 같이 산정되었다.

$$w_v = \frac{d_p}{a_x a_y} \quad (24)$$

분할단면이 주수로인 경우 운동량 교환에 의한 흐름저  
항을 함께 고려해 주어야 한다. 경계면을 주수로의 운변  
에 포함하게 되므로 주수로의 동수반경은 Eq. (25)와 같  
이 보정된다. 또한 경계면을 함께 고려한 주수로의 마찰  
계수  $f_{mc}$ 는 Eq. (26)에 의해 계산된다.

$$R_{mc} = \frac{f_{s,mc} A_{mc}}{f_{s,mc} W_{mc} + \sum f_T h_T} \quad (25)$$

여기서,  $R_{mc}$ 는 주수로 동수반경[m],  $f_{s,mc}$ 는 하상조도높  
이에 의한 주수로 마찰계수[-],  $A_{mc}$ 는 주수로 통수단면적  
[ $m^2$ ],  $W_{mc}$ 는 주수로 운변[m],  $h_T$ 는 경계면 수심[m]이다.

$$f_{mc} = \frac{f_{s,mc} W_{mc} + \sum f_T h_T}{W_{mc} + \sum h_T} \quad (26)$$

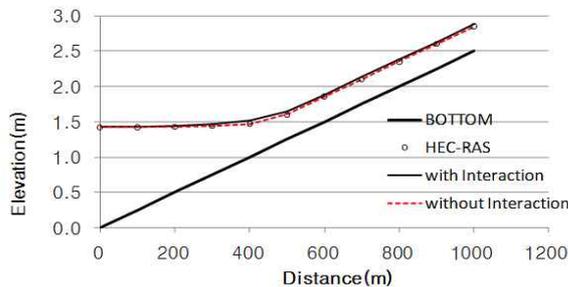


Fig. 4. Comparison of Computed Backwater Profiles

## 3. 모형의 검증 및 민감도 분석

### 3.1 식생이 없는 하도

본 연구에서 제시된 모형의 검증을 위하여 박문형  
(2010)이 사용한 복단면 개수로 흐름을 수치모의하였다.  
수치모의에 적용한 복단면 개수로의 제원은 주수로 폭  
0.28 m, 홍수터 폭 0.32 m, 주수로와 홍수터의 표고차  
0.18 m, 그리고 바닥경사는 0.0025이다. 주수로와 홍수터  
의 조도계수는 각각 0.014와 0.027이며, 이때 상류단의  
유입유량과 하류단 수심은 각각  $0.15 m^3/s$ 와 1.422 m이  
다. Fig. 4는 본 연구에서 제시한 모형과 HEC-RAS의  
모의 결과 수위를 비교한 것이다. 제시된 모형을 이용한  
수치모의 시 운동량 교환을 고려하지 않은 경우와  
HEC-RAS모의 결과 수위는 거의 일치하고 있다. 그러  
나 운동량 교환을 고려하게 되는 경우 수위가 소폭 상승  
함을 알 수 있다. Fig. 5는 제시된 모형의 결과 수심에 대  
한 HEC-RAS결과의 상대수심(%)으로 HEC-RAS 모의  
결과 수심이 최대 15% 정도 작게 산정된 것을 확인할 수  
있다. 이러한 원인으로 박문형 (2010)은 HEC-RAS가 분  
할수로법에 근거하여 경계면 전단층의 영향을 무시하기  
때문으로 유속을 크게 산정하고 결과적으로 수심을 작게  
산정한 것으로 판단하였는데, 본 연구의 모형은 경계면  
의 운동량 교환을 고려함으로써 인하여 같은 결과를 보임  
을 확인하였다.

Fig. 6은 단면별 경계면 마찰계수 ( $f_T$ )의 변화를 보여주  
고 있다. 모든 단면의 형태가 동일함을 고려할 때 경계면  
마찰계수는 수심변화에 민감하게 영향을 받고 있음을 알  
수 있다. 수심이 증가하게 되는 경우 운동량 교환이 일어  
난 경계면의 면적과 운동량 교환 폭이 증가하게 된다. 따  
라서 경계면 마찰계수 또한 증가하게 되는데 Fig. 7과 같  
이 홍수터 폭에 대한 홍수터수심으로 정의되는 홍수터 형  
상비(이준호, 2006) 변화와 선형적으로 증가하는 것으로  
나타났다.

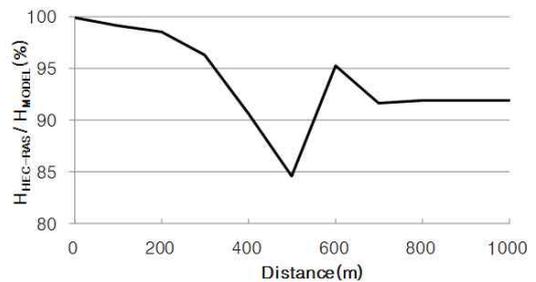


Fig. 5. Relative Water Depth  
( $H_{HEC-RAS} / H_{MODEL}$ )

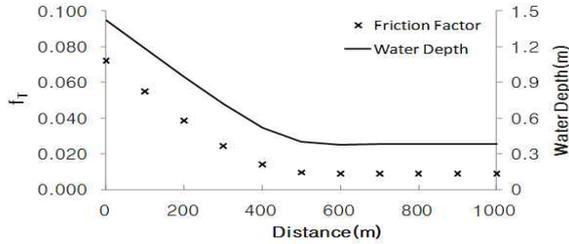


Fig. 6.  $f_T$  of the each Cross-Section

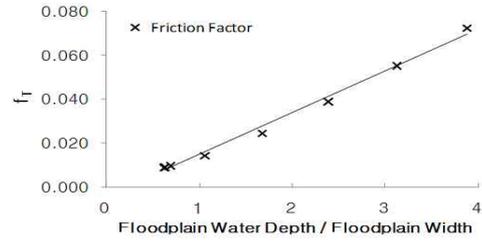


Fig. 7.  $f_T$  according to  $H_f / B_f$

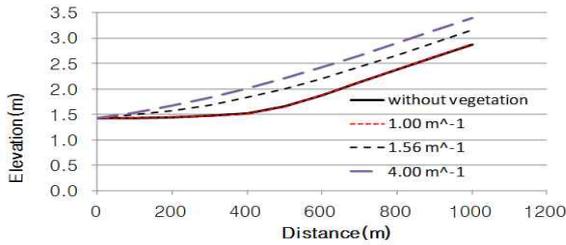


Fig. 8. Water Surface Profiles by Vegetation Density

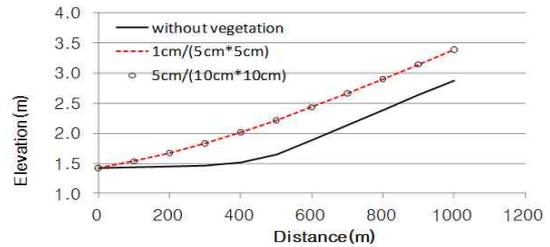


Fig. 9. Water Surface Profiles by Vegetation Arrangement

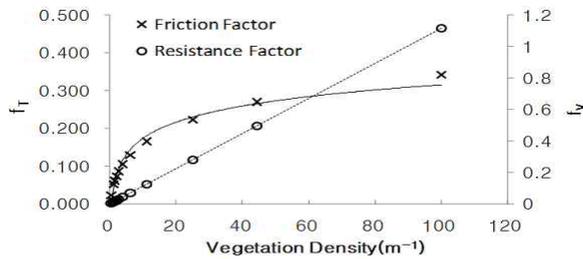


Fig. 10. Friction and Resistance Factor by  $w_v$

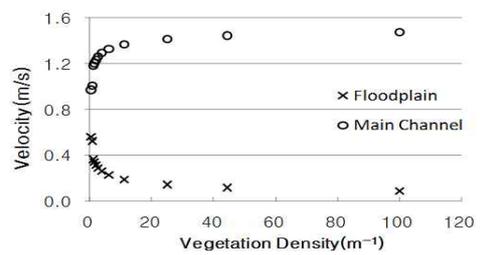


Fig. 11. Mean Velocity

### 3.2 식생 하도

3.1절의 하도 홍수터에 직경 ( $d_p$ ) 1.0cm의 식생을 식재하고 수치모의를 실시하였다. 식재간격  $a_x$ ,  $a_y$ 를 각각 10cm, 8cm, 5cm로 변화시키면서 식생밀도변화에 따른 수위변화를 검토하였다. Fig. 8과 같이 식생밀도가 10cm 간격 ( $w_v$ :1.0  $m^{-1}$ )일 경우에는 수위상승량이 미소하였으나 식생밀도가 증가하면서 수위는 증가하였다. 식생의 밀도변화를 식재간격과 식생의 직경변화로 구분하여 모의한 결과 동일 식생밀도에 대하여서는 수위가 동일하였다.

식생밀도 변화에 따른 경계면 마찰계수와 식생에 의한 항력계수 변화는 Fig. 10과 같다. 식생 항력계수는 식생밀도가 증가할 때 선형적으로 증가하였고, 경계면 마찰계수는 식생밀도에 대수적인 분포를 보였다. 식생밀도가 계속적으로 증가하게 되는 경우 항력계수와 마찰계수 또한 끝없이 증가하게 된다. 그러나 경계면 마찰계수는 식생밀도가 증가하면서 동시에 증가하지만 어떤 밀도에 달하게 되면 운동량 교환은 감소하게 된다 (Pasche, 1984). 식생 항력 계수의 영향을 크게 받는 홍수터 평균유속 또한 어

는 밀도이상부터는 크게 감소하지 않고 비슷하게 산정되고 있음을 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 그러나 계속적으로 증가하는 항력계수와 마찰계수는 수위를 과대산정할 수 있으므로 식생밀도변화에 따른 이들 계수의 상한값의 제시가 요구되고 수리모형실험 등을 통한 연구가 더 필요하다.

주수로 폭 ( $B_{mc}$ )에 대한 홍수터 운동량 교환 폭 ( $B_{ff}$ )비 변화에 따른 경계면 마찰계수 변화는 Fig. 12와 같다.  $B_{ff}/B_{mc}$  값이 증가할수록 경계면 마찰계수가 증가함을 알 수 있다. 그러나 그 변화폭은 크지 않았고 이러한 경향은 식생밀도가 커지더라도 유사하였다. 식생밀도사이의 경계면 마찰계수를 보면 밀도가 증가하면서 마찰계수가 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 경계면 마찰계수는  $B_{ff}/B_{mc}$ 의 변화보다는 식생밀도 변화에 더 큰 영향을 받고 있음을 확인하였다.

Fig. 13은 주수로 평균유속에 대한 홍수터 평균유속 비 변화에 따른 경계면 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 평균유속비가 작으면 작을수록 마찰계수는 값은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 평균유속비가 작다는 것은 홍수

터와 주수로사이의 유속차이가 크다는 것을 의미하고 유속차가 클수록 경계면에서 와 발생이 크게 되고 운동량교환이 매우 활발하게 일어나게 된다. 이는 경계면 전단층의 마찰을 증가시키게 된다.

#### 4. 모형의 적용

본 연구에서 제시된 모형의 적용대상하천은 Enz강이다. Enz강은 독일 포르츠하임시를 흐르는 하천으로 하상은 주로 자갈로 이뤄져 있고, 식재된 홍수터가 존재한다.

적용구간은 NO.56+935~NO.57+970으로 이 구간 대표단면 특성값은 Karlsruhe공대의 Theodor Rehbock Lab.에 의해 조사되었고, 단면의 형태는 Fig. 14, 특성은 Table 2와 같다. 4개 단면의 특징을 살펴보면 A, C, D는 복단면, B는 반복단면형태이다. 식생이 존재하는 위치는 A단면의 경우 양안 홍수터, B와 C단면은 한측은 홍수터 반대측은 호안, D단면의 경우는 양안 모두 호안에서부터 식생이 존재하고 있음을 확인할 수 있다. Table 3은 유량에 따른 각 단면의 실측수위이다. A, D단면 좌안은 수위가 증가함에 따라 식생이 침수되는 구간으로써 수치모형 적용 시 식생

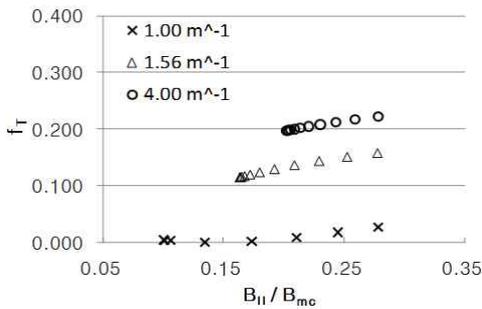


Fig. 12. Friction Factor by  $B_{II} / B_{mc}$

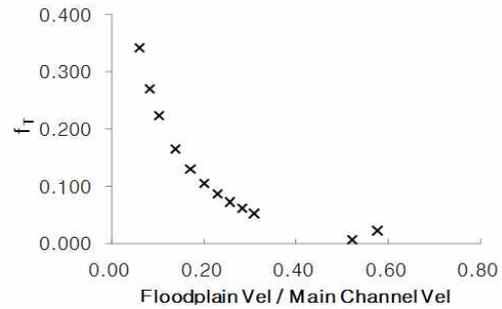


Fig. 13. Friction Factor by Ratio of the Mean Velocity

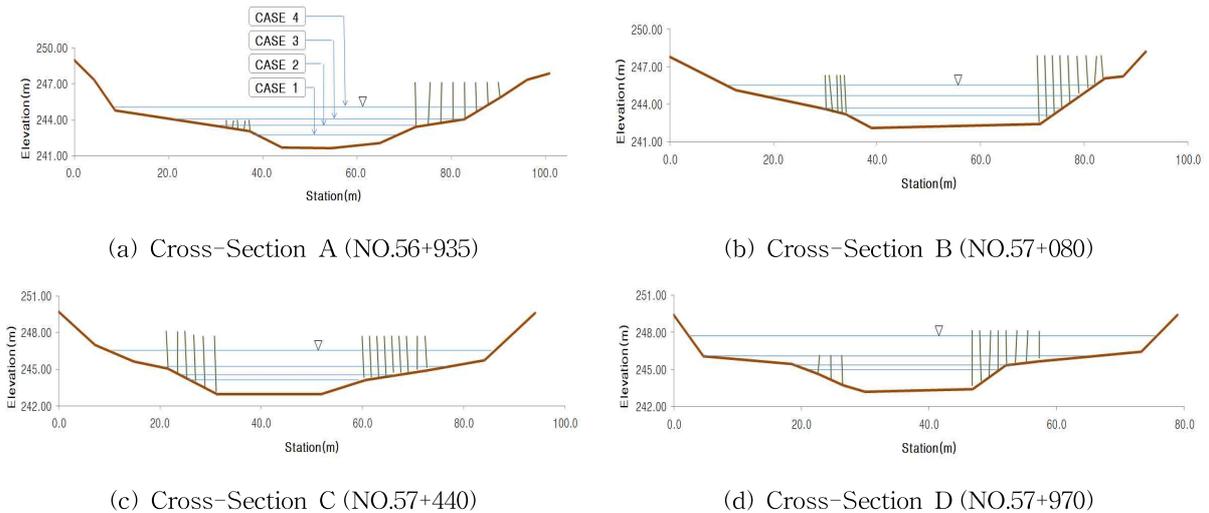


Fig. 14. Cross-Section Shapes of Enz River

Table 2. Cross-Section Parameters of the Enz River

Cross-Sections	Vegetation (Left Bank or Floodplain)				Vegetation (Right Bank or Floodplain)				Mean Bottom Slope	Bed Roughness		
	$a_x$ (m)	$a_y$ (m)	$d_p$ (m)	$h_p$ (m)	$a_x$ (m)	$a_y$ (m)	$d_p$ (m)	$h_p$ (m)		Left	Main	Right
A (56.935 km)	0.20	0.10	0.03	1.0	1.00	0.90	0.08	6.0	0.0020	0.1	0.25	0.1
B (57.080 km)	0.25	0.25	0.06	4.0	1.50	1.00	0.08	6.0	0.0019	0.1	0.18	0.1
C (57.440 km)	2.50	1.00	0.10	6.0	0.50	1.00	0.08	6.0	0.0028	0.1	0.18	0.1
D (57.970 km)	2.00	3.00	0.10	2.0	2.00	1.00	0.10	4.0	0.0022	0.1	0.15	0.1

**Table 3. Measured Stage-Discharges at each Cross-Section of Enz River**

Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Water Surface Elevation at each Cross-Section (m)			
	A(56.935 km)	B(57.080 km)	C(57.440 km)	D(57.970 km)
35.00 (CASE 1)	243.11	243.21	243.81	245.00
76.00 (CASE 2)	243.60	243.66	244.30	245.45
181.0 (CASE 3)	244.25	244.52	245.20	246.05
336.0 (CASE 4)	244.81	245.22	245.98	246.90

의 높이를 수정하여 식생이 침수되지 않는 조건으로 가정하였다.

**4.1 수위-유량 검토**

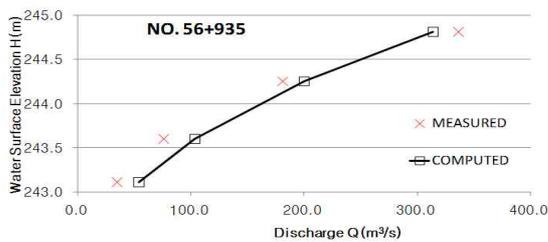
Enz강 A, B, C, D 4개 단면에 대하여 수위변화에 따라 각 분할단면의 마찰계수와 유속, 유량을 산정하고 단면별로 계산된 분할단면유량의 총합과 Table 3의 실측 수위-유량과 비교하였다(Fig. 15). 비교결과 저수위-저유량에서는 실측유량과의 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 특히 Fig. 15(d)에서 확인할 수 있듯이 D 단면에서 상대적으로 큰 오차가 발생하였는데 D단면의 경우 양안의 호안에 식생이 존재하고 있고, 저수위 흐름에서도 식생이 흐름에 영향을 주고 있다. 그러나 D단면의 식재간격은 흐름방향으로 2.0m, 흐름과 직각방향으로 2.0~3.0m, 식생직경은 0.1m로 식생밀도가 0.025~0.05 m<sup>-1</sup>로 낮아 경계면 마찰계수는 작은데 반하여 상대적으로 커지는 윤편의 영향으로 마찰계수가 작게 산정하게 된 결과로 판단된다. CASE 3, 4와 같이 고수위-고유량의 경우에는 수위에 따른 실측 유량과 계산유량이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

이는 식생의 영향을 지배적으로 받는 흐름의 경계면에서 Mertens방법과 Nuding방법에 의해 마찰계수가 합리적으로 산정되었고, 산정된 마찰계수를 이용하여 계산된 유속이 실제 유속과 잘 일치한 결과로 받아들일 수 있다.

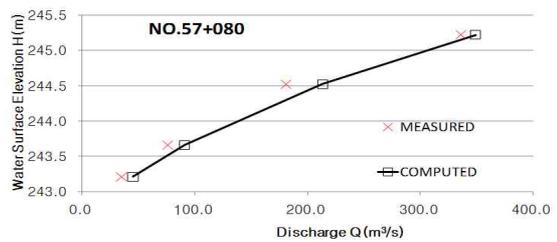
**4.2 수위 계산 결과**

본 연구 모형을 적용하여 Enz강의 4개 실측유량에 대하여 계산된 수위는 Fig. 16과 같다. CASE 1, 2와 같이 식생의 영향이 거의 없는 저수위에서는 비교적 수위를 잘 예측하고 있음을 확인하였다. 그러나 식생의 영향이 커지는 CASE 3, 4의 경우 D (NO.57+970)단면의 수위가 약간 크게 산정되었다.

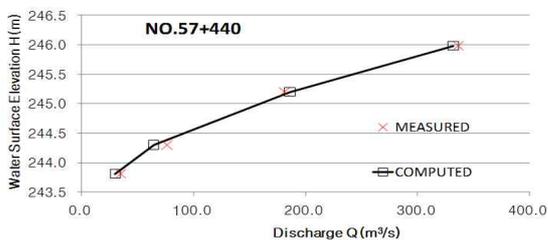
D (NO.57+970) 단면의 수위는 C (NO.57+440) 단면과 D 단면의 평균마찰경사를 이용하여 산정하게 된다. Fig. 17에서 확인할 수 있듯이 C 단면과 D 단면은 양안 모두에 식생이 존재하고 있다. 그러나 두 단면 사이 전 구간에서 식생이 존재하지는 않는다. 따라서 C 단면과 D 단면의 마찰경사를 평균하게 되는 경우 실제 이 구간의 마찰경사보다 과대산정 될 수 있다. 또한 상대적으로 긴 구간길이를 가



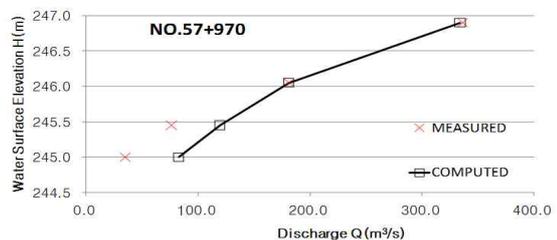
(a) Cross-Section A



(b) Cross-Section B



(c) Cross-Section C



(d) Cross-Section D

**Fig. 15. Stage-Discharge Curves of Comparison between Measured and Computed**

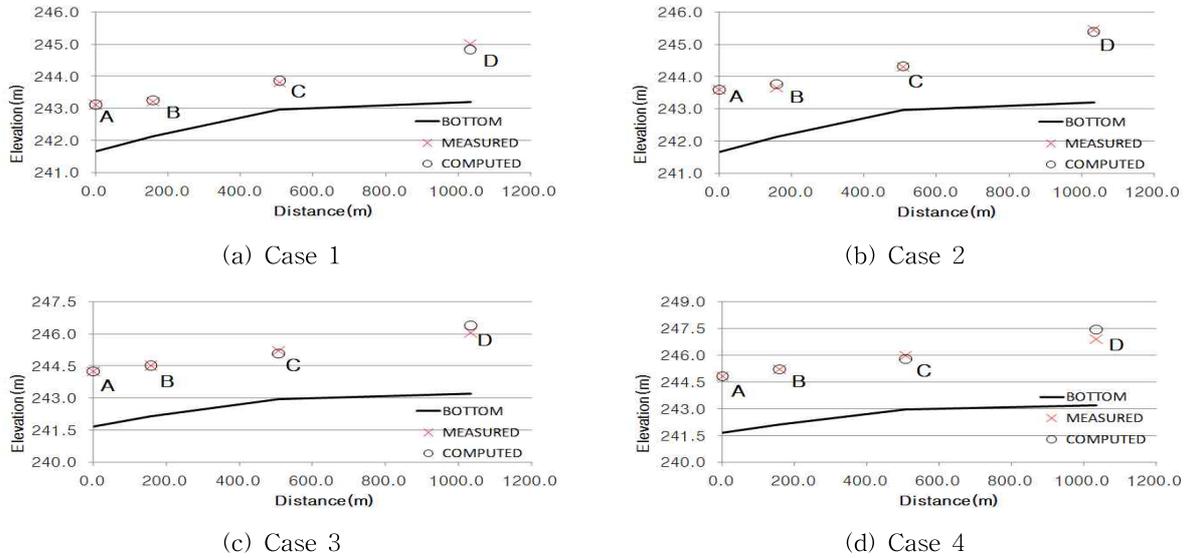


Fig. 16. Computed Water Surface Elevation Compared with Measured One of Enz River

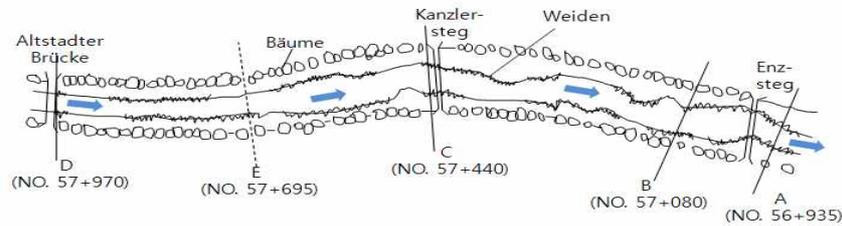


Fig. 17. Sketch of Computed Reach in Enz River

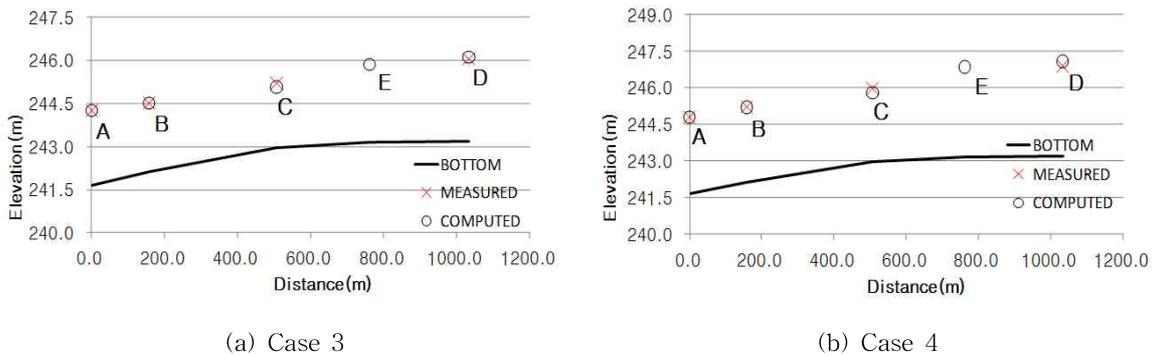


Fig. 18. Computed Water Surface Elevation with E(NO.57+695)

지고 있고, 이러한 영향으로 D 단면의 수위가 실측수위와 비교하여 크게 계산된 것으로 판단된다. 따라서 보간단면 E를 추가하여 CASE 3, 4를 모의하고 D 단면의 수위를 확인하였다. 모의 결과 Fig. 18과 같이 단면을 추가하기 전과 비교하여 더 일치하는 결과를 보였다. 식생이 존재하는 하천의 수위계산 시에는 계산단면의 구성이 계산결과에 다소 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 계산구간의 식생 분포 상황 등을 고려하여 적절한 구간거리와 구간

을 대표할 수 있는 계산단면을 결정하는 것이 계산결과의 정확도를 높이는 데 중요하다. Enz강 실측수위와 본 연구 모형의 계산수위의 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)는 0.13 m이었다. Helmiö (2005)는 Nuding 식을 이용하여 1차원 부정류 수위계산 모형을 제시하고, 제시된 모형과 홍수터를 저류지로 간주하고 식생저항을 고려하지 않은 기존 모형을 식생이 존재하는 라인강에 적용한 후 그 결과를 비교하였다. 비교 결과 저유량일 때 기

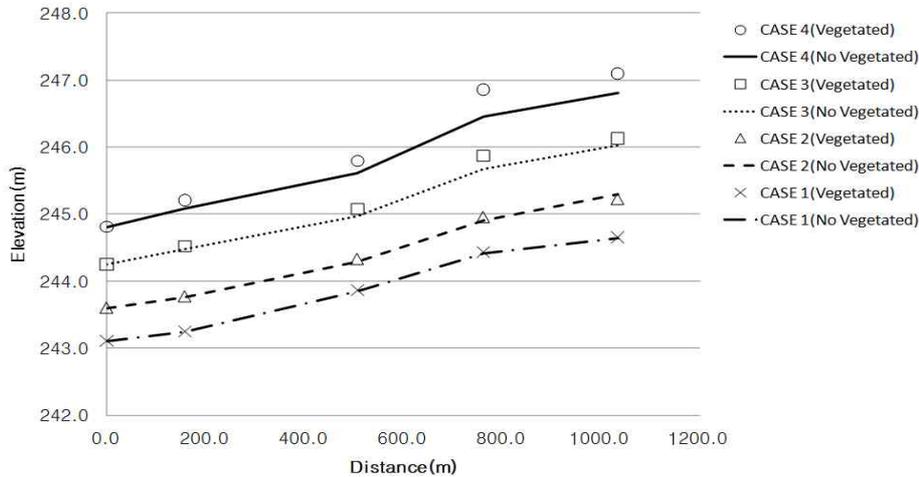


Fig. 19. Effects of Vegetation on the Water Surface Elevation

존 모형의 RMSE는 0.16 m로 정확했지만 고유량에서는 1.23~1.96 m로 부정확하였던 반면, Helmiö (2005)의 모형은 0.37~0.46 m로 계산 결과가 합리적임을 기술하였다. 이와 비교하여 적용대상하천은 다르지만 본 연구 모형의 Enz강 실측 수위 대비 RMSE는 0.13 m로 그 결과가 Helmiö (2005)의 결과와 비교하여 정확하며, 따라서 식생 하도에 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

#### 4.3 식생유무에 따른 수위변화

Fig. 19는 Enz강의 본 연구 적용구간에 식생이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 모의하고 수위변화를 비교하여 나타낸 것이다. 저수위인 CASE 1, 2 경우 침수된 식생구역이 거의 존재하지 않기 때문에 식생을 고려하기 전·후의 수위차가 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 수위가 증가하면서 침수되는 식생구역이 넓어지고 흐름이 식생에 영향을 크게 받으면서 식생을 고려하기 전·후의 수위차가 점점 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구 모형 적용구간의 경우 식생을 고려하기 전·후의 최대 수위차이는 CASE 4의 E 단면에서 0.4 m 정도 발생하였다.

#### 4.4 경계면 마찰계수

본 연구의 모형은 수위-유량 검토결과를 바탕으로 복단면 호안에 식생이 존재하는 경우에는 Mertens방법을 이용하고, 홍수터에 식생이 존재하는 경우에는 Nuding방법을 이용하여 경계면 마찰계수를 계산하게 된다. Fig. 20은 이렇게 산정된 Enz강 각 단면의 경계면 마찰계수를 보여주고 있다. Mertens방법에 의해 산정된 경계면 마찰계수가 Nuding방법에 의해 산정된 마찰계수보다 크음을 알 수 있다. B단면의 경우에 좌안의 식생밀도는  $0.96 \text{ m}^{-1}$ 이고, 우안의 식생밀도는  $0.053 \text{ m}^{-1}$ 임에도 불구하고 Mertens방법에 의해 산정된 경계면 마찰계수가 크다. 따라서 주수로

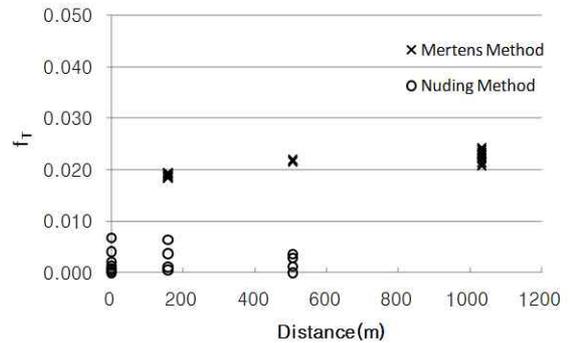


Fig. 20. Friction Factor of Enz River by Interaction

의 호안에 식재된 식생이 홍수터의 식생보다 주수로에 더 큰 흐름저항을 야기시킴을 알 수 있었다. 경계면의 마찰저항은 식생밀도, 주수로와 홍수터의 평균유속 비, 운동량 교환 폭, 홍수터 형상비 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 그러나 경계면 마찰저항에 영향을 주는 인자들의 조건이 바뀌더라도 Mertens방법에 의해 산정된 경계면 마찰계수의 변화폭은 미소하였다. 반면 Nuding방법에 의한 경계면 마찰계수는 하도의 조건변화에 좀 더 민감하게 반응하고 있음을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 Mertens의 마찰계수, Nuding의 마찰계수 산정방법과 에너지 방정식을 연계하여 하상조도높이와 식생에 의한 직접저항, 식생구역과 비식생구역 사이, 홍수터와 주수로 사이 경계면의 운동량 교환에 따른 흐름저항을 고려할 수 있는 1차원 수치모형을 제시하였다. 모형의 검증을 위하여 가상하도를 대상으로 수치모의를 실시하고 HEC-RAS모의결과와 비교하고, 식생조건변화에

따른 민감도 분석을 실시하였다. 또한 식생이 존재하는 하도에서의 적용성을 확인하기 위해 독일 포르츠하임 시의 Enz강을 대상하천으로 4개 단면 수위-유량을 비교하였고, 4가지 실측 유량에 대하여 수위를 계산하고 실측수위와 비교하였다. 적용구간의 식생 전·후 수위를 계산하고 식생에 의한 최대 수위상승량을 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구 모형을 가상하도에 적용하고 HEC-RAS의 수위와 비교한 결과 유사한 배수곡선을 산정하였으나 복단면 홍수터와 주수로 사이의 전단층에서 발생하는 마찰저항을 고려한 본 연구 모형의 수심이 더 크게 산정되었다.
- 2) 식생이 없는 하도의 경계면 마찰계수는 수심변화의 영향이 지배적이었고, 홍수터 형상비가 증가함에 따라 경계면 마찰계수는 선형적으로 증가하였다.
- 3) 식생이 존재하는 하도에서 식생밀도가 증가할수록 수위는 증가하였다. 그러나 식생밀도의 증가가 식생 간격이 작아졌기 때문인지 혹은 동일한 식재간격에서 식생직경이 커졌기 때문인지와는 관계없이 식생 밀도가 같으면 수위 상승량은 동일하였다.
- 4) 식생 항력계수는 식생밀도와 선형적으로 비례하였고, 경계면 마찰계수는 식생밀도와 대수적으로 비례하였다. 어느 식생밀도이상부터는 경계면의 운동량 교환이 감소하는 점을 고려할 때 항력계수와 경계면 마찰계수의 상한값 제시를 위한 연구가 더 필요하다고 판단된다.
- 5) 경계면 마찰계수는 주수로 폭에 대한 홍수터 운동량 교환 폭 비가 증가할수록 증가하지만 증가량이 크지 않았다. 반면, 식생밀도 변화에 큰 영향을 받고 있음을 확인하였다. 또한 주수로 평균유속에 대한 홍수터 평균유속비가 증가할수록 경계면 마찰계수는 대수적으로 감소하였다.
- 6) 식생이 홍수터에 존재하는 경우 Nuding방법, 호안에 존재하는 경우에는 Mertens방법을 적용하여 마찰계수를 산정 후 계산된 유량과 Enz강의 실측 수위-유량과 비교한 결과 식생의 영향이 지배적인 흐름에서 실측된 유량과의 평균오차가 10% 미만인 결과를 보여 정수식생이 존재하는 자연하도에서 두 방법에 의해 산정된 마찰계수의 적용성을 확인하였다.
- 7) Enz강의 4가지 유량에 대하여 본 연구 모형에 의해 계산된 수위와 실측수위를 비교한 결과 식생의 영향을 거의 받지 않고 주수로에 흐름이 형성되는 저유량의 경우와 식생의 영향을 지배적으로 받는 고유량 흐름 모두에서 합리적인 수위를 예측하여 적용 가능성을 확인하였으나, 더 많은 하천에 대하여

적용을 통한 검증은 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 강형식, 최성욱 (2007). “전단면 식생된 개수로 흐름에서 주흐름방향渦 구조의 수치모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3-B호, pp. 289-299.
- 국토해양부, 환경부 (2008). **친환경 하천관리에 관한 통합지침**.
- 권기원, 최성욱 (2000). “식생된 개수로 흐름의 k-ε 난류 해석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제1-B호, pp. 11-21.
- 김 원 (2009). 「**이코리버21**」 2차년도 개발기술 요약서, ECORIVER21 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구단.
- 박문형 (2010). “복단면 개수로흐름에서 홍수터 식생의 흐름저항을 반영한 1차원 모형.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제6호, pp. 517-524
- 송재우, 박성식 (2004). “식생수로와 비식생수로에서의 조도특성 및 유속분포.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제6B호, pp. 545-552.
- 여홍구, 박문형, 강준구, 김태욱 (2004). “개수로 내 식생 구간의 흐름저항 및 흐름특성에 관한 실험적 고찰.” **한국환경복원녹화기술학회논문집**, 한국환경복원녹화기술학회, 제7권, 제6호, pp. 61-74.
- 윤세의, 정재욱, 김원화, 김환국 (1997). “수목이 있는 하도에서의 수위 예측.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 69-74.
- 윤태훈, 신용진, 이지송 (2002). “수초영역으로 인한 개수로 흐름변화.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제2B호, pp. 143-149.
- 이동섭, 우효섭, 권보애, 안홍규 (2006). “식생 조도계수 산정을 위한 선별된 식생에 관한 실험 연구.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1291-1294.
- 이준호 (2006). **하천식생에 의한 수리특성 변화 분석**. 박사학위 논문, 경기대학교, pp. 40-45.
- 조홍제, 최현근, 이태영 (2002). “도시하천의 둔치내 식생

- 의 평면적 분포에 따른 홍수위 변화의 실험적 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제2호, pp. 203-212.
- 최성욱 (2005). **하도식재설계 기술 I**, 도시홍수재해관리 연구단.
- 최성욱 (2008). **FFC4 도시하천 식생하도 2차원 산정모형**, 도시홍수재해관리연구단.
- Carollo, F.G., Ferro, V., and Termini, D. (2005). “Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, pp. 554-564.
- Darby, S.E. (1999). “Open channel and sheet flow over flexible roughness.” *21st Congress of IAHR*.
- Darby, S.E., and Throne, C.R. (1996). “Predictive stage-discharge curve in channels with bank vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 10, pp. 583-586.
- Dijk, E.V. (2006). Development of a GIS-based hydraulic-ecological model to describe the interaction between floodplain vegetation and riverine hydraulics. Master thesis, University of Twente.
- Fukuoka, S., Fujita, K., and Niida, H. (1992). “Prediction in flood water level of river course with vegetation.” *Proceeding of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 447, pp. 17-24.
- Helmiö, T. (2004). “Flow Resistance due to Lateral Momentum Transfer in Partially Vegetated Rivers.” *Water Resources Reserch*, Vol. 40, pp. 1-10.
- Helmiö, T. (2005). “Unsteady 1D flow model of a river with partly vegetated floodplains-application to the Rhine River,” *Environmental Modelling & Software*, Vol. 20, pp. 361-375.
- James, C.S., Birkhead, A.L, Jordanova, A.A., and Osullován, J.J. (2004). “Flow resistance of emergent vegetation resistance.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, pp. 390-398.
- Järvelä, J. (2002). “Flow resistance of flexible and stiff vegetation a flume study with natural plants.” *Journal of Hydrology*, Vol. 269, pp. 44-54.
- Kaiser, W. (1984). Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergenhölzonen. Doctor thesis, TH Darmstadt.
- Li, R.M., and Shen, H.W. (1973). “Effect of tall vegetation on flow and sediment.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 5, pp. 793-814.
- Lindner, K. (1982). “Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen.” *Mitteilungen Leichtweiss-Institut für Wasserbau*, No. 75, TU Braunschweig.
- Masterman, R., and Throne, C.R. (1992). “Predicting influence of bank vegetation on channel capacity.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1052-1058.
- Mertens, W. (1989). “Zur Frage hydraulischer Berechnungen naturnaher Fließgewässer.” *Wasserwirtschaft*, Vol. 79, No. 4, pp. 170-179.
- Nuding, A. (1991). “Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch. Entwicklung eines Fließgewässer mit und ohne Gehölzufer, unter besonderer Berücksichtigung von Ufergebüsch.” *Wasserbau-Mitteilungen*, No. 35, TH Darmstadt.
- Nuding, A. (1998). “Zur Durchflußermittlung bei gegliederten Gerinnen.” *Wasserwirtschaft* Vol. 88, No. 3, pp. 130-132
- Pasche, E. (1984). “*Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässer und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung.*” Mutteukybggen Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, No. 52, RWTH Aachen.
- Pasche, E., and Rouvé, G. (1985). “Overbank Flow with Vegetatively Roughened Floodplains.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1262-1278.
- Petryk, S., and Bosmajian, G.B. (1975). “Analysis of flow through vegetation.” *Journal of Hydraulics Division*, ASEC, Vol. 101, No. 7, pp. 871-884.
- Rickert, K. (1988). “Hydraulische Berechnung naturnaher Gewässer mit Bewuchs.” *DVWK-Fortbildung* Vol. 13, pp. 25-83.
- Schnauder, I. (2004). *Strömungsstruktur und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation*. Dissertation, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik Universität Karlsruhe (TH).
- Schumacher, F. (1995). Zur Durchflussberechnung gegliederter, naturnaher gestalteter Fließgewässer, *Mitteilung 127*, Tech. Univ. Berlin, Germany.
- Stone, B.M., and Shen, H.T. (2002). “Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, pp. 500-506.
- Świątek, D., Kubrak, J., and Chormański, J. (2006).

“Steady 1D water surface model of natural rivers with vegetated floodplain: An application to the Lower Biebrza.” *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow*, Vol. 1, pp. 545-553.

Yen, B.C. (1984). “Hydraulic of floodplains: Methodo-

logy for backwater computation.” *Institute of Hydraulic Engineering Reports No. 84/5*(HWV053), University of Stuttgart., Germany.

논문번호: 10-064	접수: 2010.07.19
수정일자: 2010.12.09/12.23	심사완료: 2010.12.23