

# 개수로에서 식생에 의한 수리특성 변화에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Variation of Hydraulic Characteristics due to Vegetation in Open Channel

이 준 호\* / 윤 세 의\*\*

Lee, Joon Ho / Yoon, Sei Eui

### Abstract

An understanding of the hydraulic characteristics in the compound channel with vegetation is important in designing stream restorations or managing the floodplain. A laboratory flume of 16 m long and 0.8 m wide was used for analysis of the hydraulic characteristics in the single section channel and the compound channel with artificial vegetation. Slope of experimental channel is 0.5 %. Discharges are ranged from 0.2 m<sup>3</sup>/s to 0.4 m<sup>3</sup>/s. The experiments were done by changing water depth ratio, vegetation density and vegetation location. When water depth ratio in the single section channel with vegetation increase up to 3.5, the results showed that the increment of water depth due to vegetation may be ignored in practice. The maximum increment of water depth was measured up to 6 % in the compound channel with vegetation and the range of velocities increment in the low flow channel was from 25 % to 85 % compared with section average velocities. As the vegetation densities increase and water depth ratios decrease, the velocity of the low flow channel increased. The range of roughness coefficients in the vegetated reaches were estimated from 0.055 to 0.14 in the single section channel and from 0.063 to 0.085 in the compound channel using HEC-RAS and RMA-2 model.

**keywords** : hydraulic experiment, open channel, vegetation, hydraulic characteristic

### 요 지

홍수터에 식생된 하도에서 수리학적 특성의 이해는 하천복원사업을 계획하거나 홍수터를 관리하는데 중요하다. 본 연구에서는 길이 16 m, 폭 0.8 m 의 실험수로에 인공식생을 이용하여 수리학적 특성변화를 분석하였다. 실험수로 단면은 단단면과 복단면으로 구분하였다. 하상경사는 0.5 %, 유량은 0.2 m<sup>3</sup>/s ~ 0.4 m<sup>3</sup>/s 범위이고, 수심비, 식생밀도, 식생 위치를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 단단면 수로 저면에 식생하였을 경우 수심비가 약 3.5 이상부터는 식생에 의한 수위 증가는 거의 없는 것으로 관측되었다. 복단면 홍수터에 관목을 식생 할 경우 수위 상승량은 최대 6 % 정도이며, 저수로 내 유속은 식생전의 단면평균유속에 비하여 약 25 % ~ 85 % 정도로 증가하였다. 홍수터 식생에 의한 저수로 유속 증가량은 식생밀도와 비례하고 수심비와는 반비례한다. HEC-RAS 및 RMA-2 모형을 이용하여 산정된 식생 구간의 조도계수 범위는 단단면의 경우 0.055 ~ 0.14 이며, 복단면에서는 0.063 ~ 0.085 정도로 산정되었다.

**핵심용어** : 수리실험, 개수로, 식생, 수리특성

\* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, 442-760, Korea  
(e-mail: sof814@paran.com)

\*\* 경기대학교 공과대학 토목공학전공 교수

Professor, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, 442-760, Korea  
(e-mail: syyoon@kyonggi.ac.kr)

## 1. 서 론

하천의 환경적 기능이 대두되면서 오염된 하천의 복원 및 친수공간 조성을 위해 다양한 하천환경정비공사가 시행되고 있다. 이러한 하천환경정비의 필수적 요소로써 식생은 하천이용 증진, 수질개선, 하천경관 향상 그리고 물 서식처 형성 등 많은 순기능을 가지고 있는 것으로 파악되었다. 이에 따라 홍수터에 식생을 하거나 수변에 습지대를 조성하는 일들이 최근에 관심사이다. 그러나 홍수관리 측면에서 하천 내 식생은 하천의 흐름저항을 크게 하여 홍수시 수위를 증가시키는 악영향을 미치기도 한다. 따라서 저수로와 홍수터에서 식생에 의한 흐름저항 등 수리학적 특성을 이해하는 것은 하천복원 설계에서 중요한 부분이다. 식생으로 인한 흐름저항을 결정하기 위해서는 식생의 조도를 평가하고 유속분포 등 흐름특성을 분석하여야 한다.

또한, 일반적으로 홍수터를 갖는 도시하천은 홍수터 바닥의 표고가 저수로의 바닥에 비하여 높은 복단면을 형성한다. 복단면 개수로 흐름은 홍수터와 저수로 사이에서 복잡한 흐름 양상을 갖는 특징이다. 저수로와 홍수터의 수심 및 조도 차이에 의하여 홍수터는 저수로에 비해 느린 유속을 갖는다. 이러한 유속 차에 의해 저수로와 홍수터의 접합부 부근에서 전단층이 형성된다. 이러한 복단면 개수로의 흐름 특성은 접합부에서 질량 및 운동량의 교환을 활발하게 만들고 흐름의 저항으로 작용하여 통수능을 감소시키는 것으로 알려져 있다 (Sellin, 1964). 복단면 개수로의 정확한 수위 예측을 위해서는 저수로와 홍수터 접합부에서 발생하는 흐름저항 효과를 합리적으로 계산하여야 한다.

식생 수로에서의 흐름특성은 크게 식생 위와 식생 내 두 영역으로 구분하며, 국내·외에서 연구자들이 자연식생 및 인공식생을 이용한 수리실험을 통하여 흐름 특성 및 흐름저항에 관한 연구 결과를 발표하였다.

국외에서는 유연한 플라스틱 모형식생을 수로에 고정시켜 식생위의 유속분포에 분석한 Kouwen (1969) 등의 연구를 시작으로 최근까지 많은 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 1990년 후반 하천환경의 중요성이 대두되면서 최근에 연구 결과들이 발표되고 있으나 전체적으로 부족한 실정이다.

하도내 식생에 의한 흐름특성에 관한 국외 연구로는 Fukuoka et al.(1992)은 하도내에 여러 가지 배열로 존재하는 밀집한 수목군으로 인한 저항증가, 수목군에 의해 형성되는 복단면 형상으로 인한 저항을 고려하여 운동량방정식을 제안하였다. 여기서 홍수류의 유속분포와 수위 종단형을 예측할 수 있음을 발표하였다. Darby

(1999)는 1990년대 이후 하천식생에 의한 흐름저항 모형 연구를 종합하여, 식생 하천에서 횡방향 전단을 고려한 Wark et al.(1990)의 운동량 방정식에 기초하고, Masterman and Throne(1992)의 식생 저항모형에 Darby and Thorne(1996)의 자갈하천 모형을 결합하였다. 이를 통해 모래나 자갈하천에서 다양한 식생 형태에 따른 흐름저항을 추정하였다. Fukuoka et al.(2001)는 반복단면 수로의 홍수터에 식생 밀도변화에 따라 저수로변에 미치는 수리특성을 분석하였다. Lopez and Garcia(2001)는 개수로에서 정수식생조건에서 난류구조와 평균흐름에 관한 실험연구를 하였다. Jarvela(2002)는 잔디와 버드나무 가지 등 실제 자연식생을 이용하여 식생에 흐름저항 특성을 실험에 의해 연구하였다. Stephan and Dieter(2002)는 침수식생조건에서 식생위의 유속분포를 제안하였다. Stone and Shen(2002)은 침수식생과 정수식생조건에서 원형의 강성식생시 저항특성을 실험하였다. Wilson et al.(2002)은 유연한 식생을 이용하여 염상구조가 흐름특성에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 분석하였다. Sturve et al.(2003)은 실제 식생을 이용하여 단단면 수로의 좌우안에 식생시 저수로내의 수리특성변화를 분석하였다. James et al.(2004)은 침수조건에서 식생의 밀도변화에 따른 흐름저항특성을 실험에 의해 분석하였다. Cokgor and Kucukali(2005)는 강성 식생조건에서 침수식생구역 주위의 난류강도 특성을 실험하였다. Carollo et al.(2005)은 실제 잔디를 이용하여 침수조건에서 식생밀도에 따라 흐름저항과 유속의 함수관계를 분석하였다. Yang(2005)은 반복단면수로에서 홍수터에 식생시 유속분포변화를 분석하였다.

국내에서는 2000년대 이후 이삼희 등(2000)이 수리실험을 통하여 식생밀도 및 식생배치 형태에 따른 유사퇴적을 분석하였으며, 조홍제 등(2002)은 실제 하천을 대상으로 수리모형을 제작하고 식생시 수리특성변화를 검토하였으며, 윤태훈 등(2002)과 송재우와 박성식(2004)은 침수조건에서 개수로의 흐름변화 및 유속분포 특성을 분석하였다. 최성욱 (2004, 2005)은 식생수로의 흐름특성을 실험을 통해 분석하고, k-ε모형을 이용하여 난류구조를 수치모의 한 바 있다. 여홍구 등(2004)은 강성과 연성 식생에 의한 흐름저항 및 흐름특성을 실험적으로 연구하였으며, 이동섭 등(2005)은 선별된 식생에 대한 식생조도계수를 산정하였다. 그러나 복단면 하도에서의 홍수터 식생 의한 수리특성 및 수위변동을 실험적으로 분석한 연구는 매우 미흡한 실정이다. Table 1에 2000년도부터 국내·외의 식생과 관련된 실험연구자 및 연구조건을 정리하였다.

Table 1. Vegetation Experiment Researches

Researcher	Year	Channel Shape	Channel Size (L(m)×W(m))	Vegetation Condition	Vegetation Density	Channel Bed Condition	Discharge(m <sup>3</sup> /s)
Fukuoka, S. et al.	2001	Semi Compound Channel	28 × 0.8	Rigid	-	Fixed	0.23
Lopez, F and Garcia, M.H.	2001	Single Channel	19.5 × 0.95	Rigid	1.09~2.46(m-1)	Fixed	0.098~0.181
Jarvela, J.	2002	Single Channel	50 × 1.1	Flexible	0.004~0.03	Fixed	0.04~0.29
Stephan, U. and Dieter, G.	2002	Single Channel	17.5 × 1.0	Flexible	-	Fixed	0.13~0.3
Stone, B.M. and Shen, H.T.	2002	Single Channel	12 × 0.45	Rigid	0.0055~0.061	Fixed	0.0566
Jordanova A.A. and James, C.S.	2003	Single Channel	15 × 0.38	Rigid	0.028	Movable	0.0065~0.0085(m <sup>2</sup> /s)
Wilson, C.A.M.E. et al.	2003	Single Channel	10 × 0.5	Flexible	1.67(m-1)	Fixed	0.0005~0.025
Struve, J. et al.	2003	Single Channel	9 × 1.2	Flexible	0.0005~0.0019	Fixed	0.016~0.108
James, C.S. et al.	2004	Single Channel	3.0 × 0.1 15 × 0.38 15 × 0.38	Rigid Rigid Rigid	0.0035~0.031 0.0082~0.024 0.0014	Movable Fixed Fixed	0.00012~0.0197
Cokgor, S. and Kucukali, S.	2005	Single Channel	18 × 0.5	Rigid	-	Fixed	0.11~0.039
Carollo, F.G. et al.	2005	Single Channel	14.5 × 0.6	Flexible	1.4~2.2(m-1).	Fixed	0.12~0.017
Yang, K.	2005	Semi Compound Channel	16 × 0.3	Rigid Flexible	-	Fixed	0.01095~0.02221
Lee, S.H. et al.	2000	Single Channel	20 × 0.6	Flexible	160step/1.44m <sup>2</sup> 480step/1.44m <sup>2</sup>	Movable	-
Yoon, T.H. et al.	2002	Single Channel	20 × 0.9	Flexible	0.044	Movable	-
Cho, H.J. et al.	2002	Single Channel	30 × (6.4~8.5)	Rigid	0.1~0.490	Fixed	0.15~0.16
Song, J.W. and Park, S.S.	2004	Single Channel	20 × 0.8	Flexible	0.008~0.03	Fixed	0.03~0.06
Yeo, H.K. et al.	2004	Single Channel	14 × 1.5	Rigid, Flexible	0.061	Fixed	0.03~0.15
Choi, S.W. et al.	2004	Single Channel	12 × 0.9	Rigid	0.02	Fixed	0.05 (m <sup>3</sup> /s)
Choi, S.W. et al.	2005	Single Channel	8 × 0.45	Rigid	1.375	Fixed	0.00375(m <sup>3</sup> /s)
Rhee, D.S. et al.	2006	Single Channel	16.5 × 1.0	Flexible	-	Fixed	0.01~0.08

본 연구에서는 직사각형 단단면 수로와 홍수터를 가지는 복단면 수로에서 관목의 식생시 수리량 변화 특성을 분석하기 위하여 인공 식생을 이용하여 실험수로를 제작하였다. 유량, 수심비, 식생밀도, 식생위치 등을 변화시키며 실험을 실시하였으며, 실험수위와 계산수위가 일치하는 조도계수를 구하기 위하여 실무에서 많이 사용되고 있는 HEC-RAS 와 RMA-2 모형을 이용하였다.

## 2. 수리실험

### 2.1 수리실험 장치

수리실험은 Fig. 1과 같은 길이 16 m, 폭 0.8 m, 높이 0.9 m 이고 벽면이 아크릴로 된 직사각형 가변 경사 개수로 실험 장치를 이용하였다. 고수조에는 유량을 조절하기 위한 삼각위어가 설치되어 있으며, 하류단에는

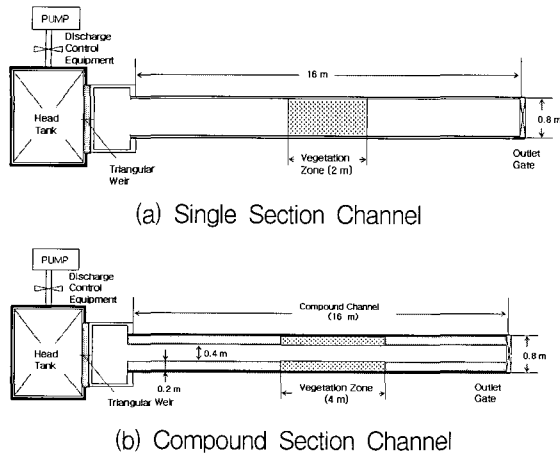


Fig. 1. Plan View of Experimental Flume

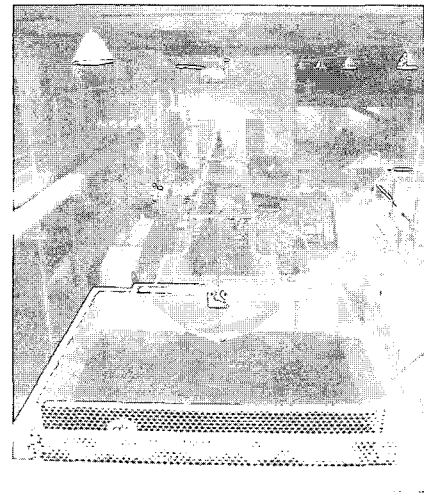


Fig. 2. View of Experimental Flume

수위 조절을 위한 수문이 설치되어 있다. Fig. 2는 수리 실험 장치의 전경을 나타낸 것이다. 식생에 의한 수리학적 특성 변화량의 분석을 위해 수로내의 식생이 있는 경우와 없는 경우에서 유량 및 수심변화에 따른 유속 및 수위의 변화량을 측정하였다. 상류측 유입유량은 삼각 예연웨어에서 월류되는 수심을 포인트 게이지를 이용하여 관측하였다. 수심은 식생된 구간의 상·하류측에 설치된 포인트 게이지와, 수로의 측벽에 부착된 눈금자를 이용하여 관측하였다. 유속의 측정은 KENEK사의 2차원전자유속계 VM 201과 ALEC사의 2차원 전자유속계 ACM250-A를 이용하였다.

## 2.2 식생조건 및 실험방법

식생수로 실험은 자연식생을 수로에 설치하기 어렵

고, 실험기간동안 식생을 일정한 상태로 유지하기 어렵기 때문에 인공식생을 이용하여 실험하였다. 본 연구에서는 특정 하천을 대상으로 축소모형을 제작한 것이 아니며, 식생은 하천에 일반적으로 식생되는 관목을 대상으로 하였다. 식생모형은 높이 7 cm ~ 8 cm, 직경 약 0.6 mm ~ 1 mm 정도인 유연한 폴리프로필렌 재질의 재료를 사용하였다. 모형식생을 합판에 Fig. 3과 같이 4.5 mm 정도의 원형구멍에 고정하여 식생 모형판을 제작하였다.

식생구역은 단단면 수로의 경우 Fig. 4와 같이 수로 중간부분의 2 m 구간에 식생을 하였고, 복단면 수로의 경우 Fig. 5와 같이 하류단에서 4.5 m ~ 8.5 m 사이의 4 m 구간에 복단면 좌·우안에 설치하여 식생 전·후의 흐름특성을 비교하였다

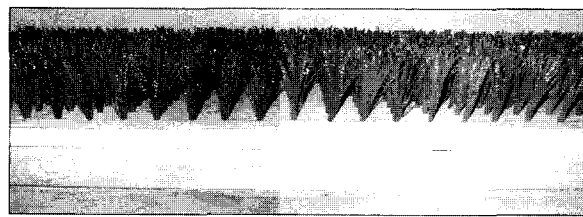
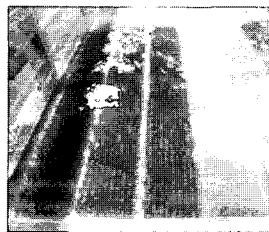


Fig. 3. Vegetation Plate

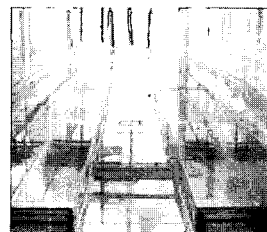


(a) Before Vegetation

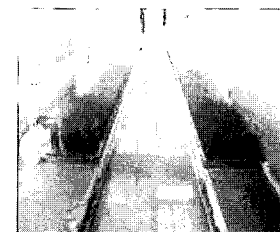


(b) After Vegetation

Fig. 4. Single Section Channel



(a) Before Vegetation



(b) After Vegetation

Fig. 5. Compound Section Channel

실험조건은 단단면 수로의 경우 수로경사는 0.5 %로 고정시키고, 식생조건에 따라 수심비(수심/식생높이)를 1.5 ~ 3.4 범위에서, 상류단의 유량은 0.01 m<sup>3</sup>/s ~ 0.04 m<sup>3</sup>/s 범위로 변화시키면서 실험하였으며, 식생밀도는 3.5 %로 고정하였다. 복단면 수로의 경우 유량은 0.02 m<sup>3</sup>/s, 0.03 m<sup>3</sup>/s, 0.04 m<sup>3</sup>/s의 조건하에서, 복단면 수심비(홍수터수심/식생높이)를 1.6, 2.3, 3.0 정도로 변화시켰다. 밀도는 Fig. 6과 같이 1.4 %, 2.4 %, 3.5 %로 변화시키면서 실험하였다. 또한 식생위치를 Fig. 7과 같이 홍수터의 중앙, 저수측, 제방측으로 변화시키면

서 실험하였다. Table 2는 실험조건 및 범위를 나타낸 것이다.

복단면 수로에서 수리량은 식생구간 상·하류부에서 수위를 측정하였으며, 복단면의 경우 식생구간 주위의 흐름의 변화를 관찰하기 위해 Fig. 8과 같이 흐름방향으로 식생 구간 내에서 3개 단면과 식생구간 상·하류부 각각 1 단면에서 측정하였다. 이는 복단면 홍수터에 식생으로 인한 저수로 및 식생구간의 전면부 및 후면부의 흐름특성 변화를 관찰할 수 있도록 한 것이다. 또한 수심방향으로 4 ~ 5개 지점에서 유속을 측정하였다.

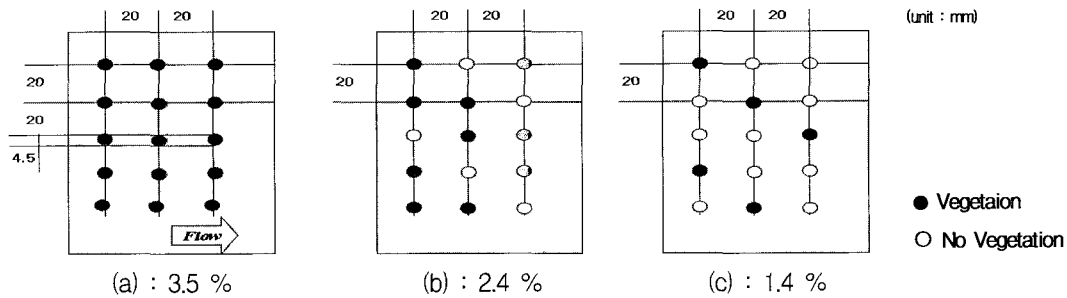


Fig. 6. Change of Vegetation Density

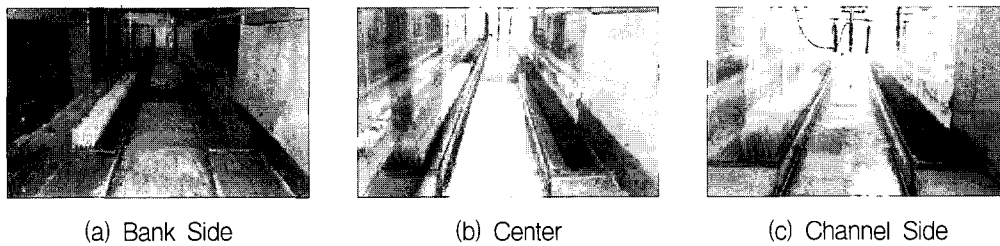


Fig. 7. Vegetation Location in Floodplain

Table 2. Experimental Condition

	Single Section Channel	Compound Section Channel
Channel Slope	0.005	0.005
Discharge	0.01m <sup>3</sup> /s, 0.03m <sup>3</sup> /s, 0.04m <sup>3</sup> /s	0.02m <sup>3</sup> /s, 0.03m <sup>3</sup> /s, 0.04m <sup>3</sup> /s
Vegetation Density	3.5%	1.4%, 2.4%, 3.5%
Vegetation Location	Low Flow Channel	Floodplain. Channel Side of Floodplain Center of Floodplain Bank Side of Floodplain
Depth-Vegetation Height Ratio	1.5, 2.2, 2.8, 3.4	1.6, 2.3, 3.0

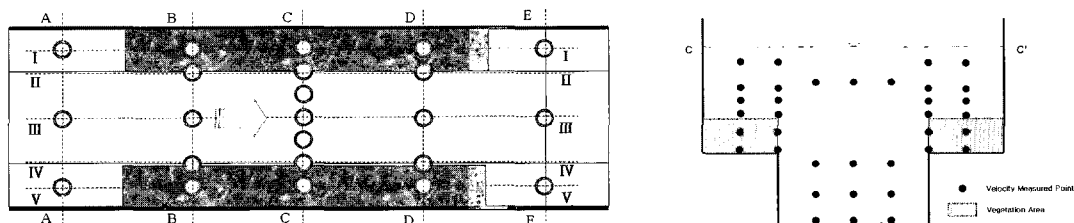


Fig. 8. Location of Velocity Measurement in Compound Section Channel

### 3. 실험결과

#### 3.1 단단면 수로

단단면 수로에서 식생구역은 수로의 하류단에서 6 m ~ 8 m 사이의 구간이며, 유량이 0.01 m<sup>3</sup>/s ~ 0.04 m<sup>3</sup>/s로 변화할 때 수심비를 1.5, 2.2, 2.8, 3.4로 변화시키면서 수위변화를 측정하였다. Fig. 9는 수로내 식생의 유·무에 따른 식생구간 상류부의 수심변화를 식생전의 수심(h)과 식생후의 수심(h<sub>v</sub>)의 비로서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 식생 전·후에 식생구간 상류부의 수심이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 같은 유량에서 수위가 증가 할수록 수심증가가 작아지는 현상을 확인 할 수 있다. 즉, 유량이 같은 경우에는 수심비

가 커질수록 식생에 의한 수위 상승의 영향이 작아짐을 의미한다.

Fig. 10은 식생구역 상류부 한 지점(Fig. 8에서 A 지점)에서 유량에 따른 수심비와 수심변화량 관계를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 수심비가 3.5 이상 되면 수심변화가 거의 없는 것으로 실측 되었다. 따라서 저수로에서 식생의 높이가 홍수위의 1/4 이하가 되면 수위 상승은 미미할 것으로 판단된다. Fig. 11은 유량 0.04 m<sup>3</sup>/s, 수심비 2.8에서 식생 상부의 수심방향 유속분포를 나타낸 것으로서 그림에서와 같이 결정계수가 0.9 정도로 비교적 좋은 선형관계를 나타내었고, 따라서 식생 상부의 유속분포가 대수분포 형태를 이루고 있음을 확인하였다.

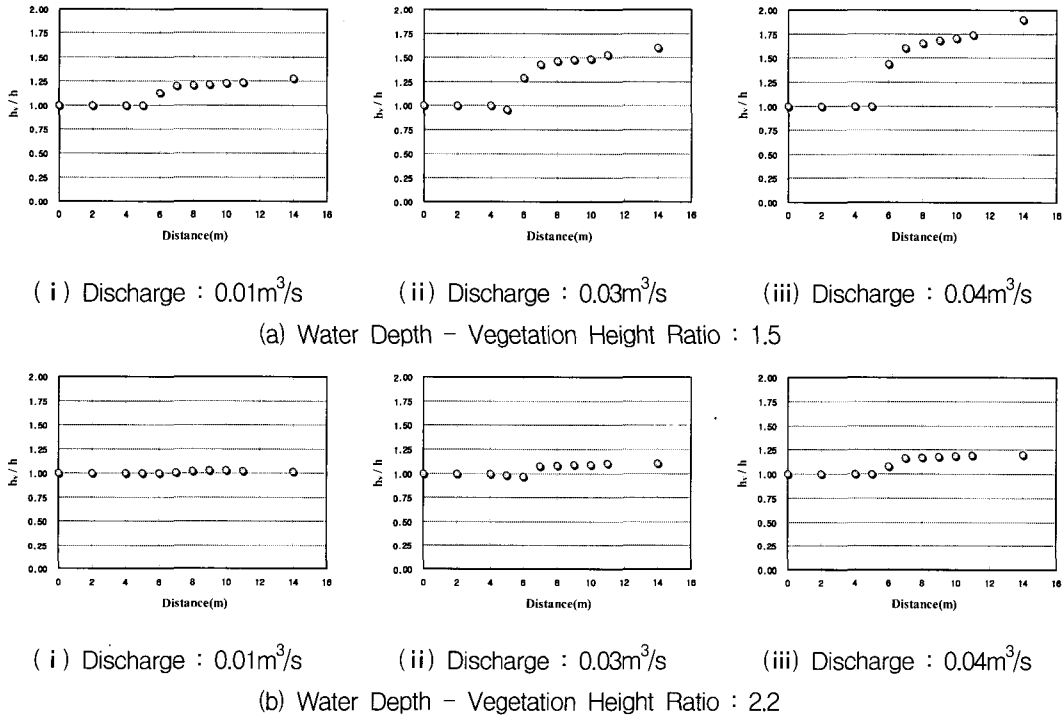


Fig. 9. Water Depth Change due to Vegetation in Single Section Channel

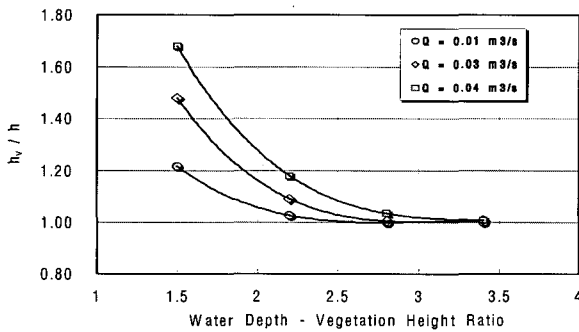


Fig. 10. Relationship between Water Depth Change and Water Depth-Vegetation Height Ratio for Different Discharges

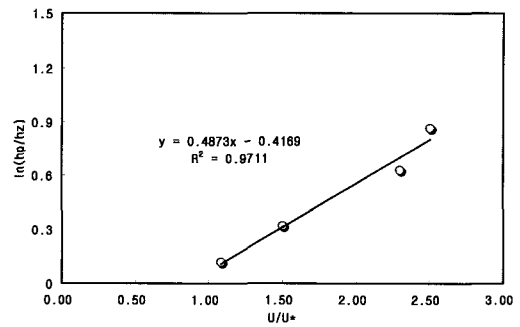


Fig. 11. Relationship between  $U/U^*$  and  $\ln(h_p/h_z)$  in Vegetated Channel

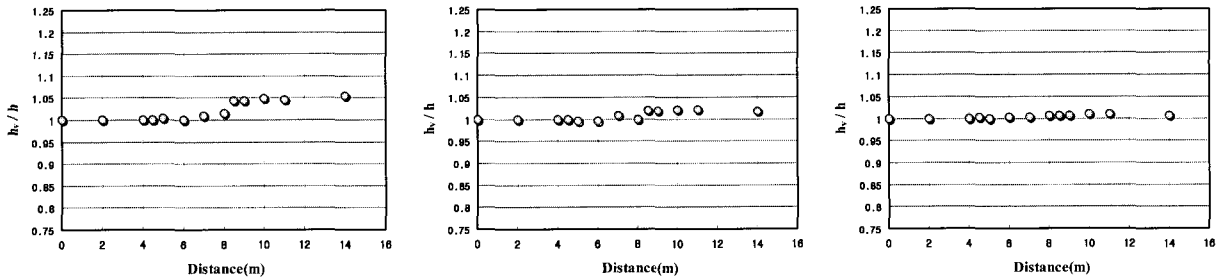
### 3.2 복단면 수로

Fig. 12는 유량  $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ , 식생밀도 3.5 % 에서 식생 전·후의 수심증가비를 나타낸 것이다. 수심비가 커질수록 수위 상승량이 작아짐을 확인 할 수 있다. 수심증가비는 수심비 1.6 에서 식생구간의 상류부에서 식생전의 수심에 6 % 정도의 상승이 최대로 나타났다.

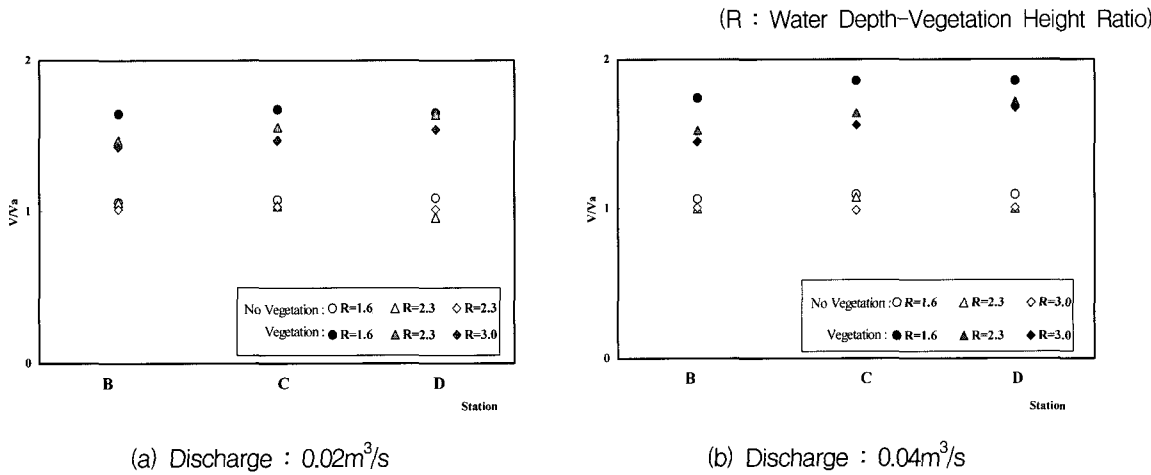
Fig. 13은 식생 전·후에 저수로 중앙부(Fig. 8에서 III)에서 유량과 수심비 변화에 의한 식생구간(B~D)의 유속변화를 대상지점의 수심방향평균유속( $V$ )/단면평균유속( $V_a$ )의 관계로 나타낸 것이다. 그림과 같이 식생 후 저수로부의 유속은 식생전의 단면평균유속과 비교해서 25 % ~ 85 % 정도 증가하는 현상을 나타내었다. 이는

식생에 의해 홍수터의 통수능이 감소하므로 저수로의 유속이 증가한 것으로 판단된다. 또한 동일한 유량에서는 식생시 수심비가 증가할수록 저수로부의 유속 증가량이 적어짐을 확인하였다.

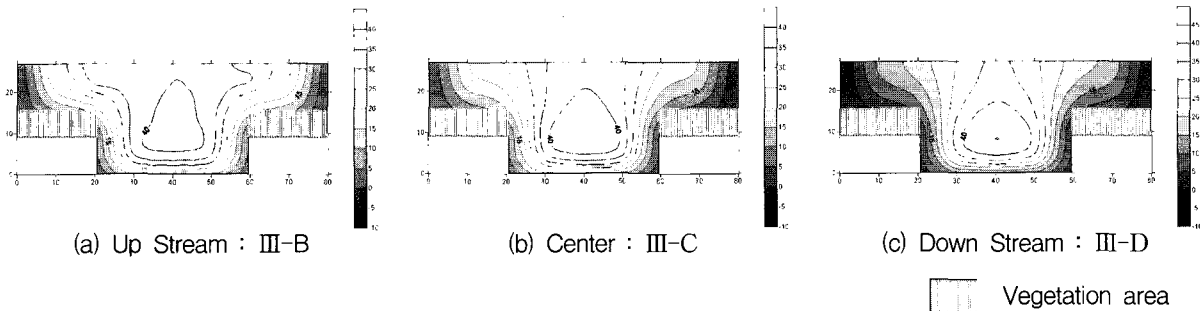
Fig. 14는 유량이  $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$  일 경우 식생구간의 상(B), 중(C), 하류(D) 지점에서의 종방향유속의 횡단분포를 나타낸 것이다. 식생구간의 하류부로 갈수록 저수로 내부의 유속은 복단면과 식생을 포함한 높이 이하 구간에서 최대유속이 나타나고 있다. 이는 식생구간을 통과 하면서 식생구역의 유속과 저수로구역의 유속 차에 의해 운동량의 교환이 활발해 지면서 저수로 위의 유속을 저하시키는 결과로 판단된다.



(a) Water Depth-Vegetation Height Ratio : 1.6 (b) Water Depth-Vegetation Height Ratio : 2.3 (c) Water Depth-Vegetation Height Ratio : 3.0  
**Fig. 12. Water Depth Increase Ratio between Vegetation and No Vegetation(Discharge :  $0.04\text{m}^3/\text{s}$ )**



(R : Water Depth-Vegetation Height Ratio)  
**Fig. 13. Velocity Change Ratio in Low Flow Channel between Vegetation and No Vegetation**



**Fig. 14. Streamwise Velocity Distribution Diagram in Vegetation Area**

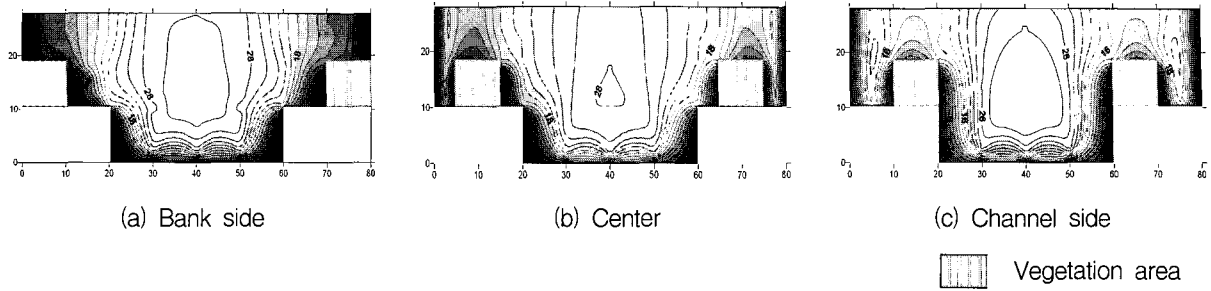


Fig. 15 Velocity Distribution Diagram for Vegetation Location Variation in Floodplain

Fig. 15는 유량이  $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$  일 때 식생구역의 중앙 지점(Fig. 8에서 C지점)에서 식생의 위치변화에 따른 수로내 종방향 유속분포를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 홍수터 중앙부에서 식생을 할 경우 저수로의 유속 증가가 세 경우 중에서 가장 작게 나타났으나, 그 차이는 적게 나타났다. 향후 식생의 위치 변화에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 4. 비교 및 고찰

##### 4.1 수심비 및 식생밀도변화

Table 3은 단단면 수로에서 식생의 유량 및 수심비의 변화에 따른 식생구역 상류지점에서의 식생전·후의 수심증가비를 나타낸 것이다. 수심비가 1.5 일때 식생후의 수심은 22 % ~ 68 % 의 범위에서 증가하였으며, 수심비가 증가 할수록 식생후의 수심증가는 작아지며, 수심비 3.4 에서는 수심의 증가는 거의 없었다. 따라서 수심비가 3.5 이상 되면 식생에 의한 수위 영향은 미미

하다고 판단된다.

Table 4는 홍수터를 가지는 복단면 수로에서 식생의 밀도변화, 유량변화, 수심비의 변화에 따른 식생구역 상류지점에서의 식생전·후의 수심증가비를 나타낸 것이다. 수심의 경우 식생밀도가 3.5 % 일 경우 유량변화 및 수심비의 변화에 따라 1.0 % ~ 6.0 % 범위로 증가하였으며, 밀도 2.4 % 에서는 최대 1.0 % 로 수심이 증가하였고, 밀도 1.4 % 에서는 수심의 변화가 거의 없게 나타났다. Table 5는 식생구역의 중앙지점(Fig. 8에서 C지점)에서 식생에 의한 저수로의 유속증가를 나타낸 것이다. 식생전의 단면평균유속과 식생후의 저수로 내 유속의 비로서 나타내었다. 저수로의 유속증가는 식생밀도 3.5 % 에서는 47 % ~ 85 % 의 범위이며, 식생밀도 2.4 % 에서는 35 % ~ 67 % 로 유속이 증가하였고, 식생밀도 1.4 % 에서는 25 % ~ 46 % 증가하였다. 따라서 복단면 수로에서 식생에 의한 수위상승 효과보다는 저수로의 유속증가가 더 크게 나타남을 확인하였다.

Table 3. Water Depth Change Ratio for Vegetation Condition (Single Section Channel)

		Water Depth-Vegetation Height Ratio			
		1.5	2.2	2.8	3.4
Water Depth Change Ratio	0.01 $\text{m}^3/\text{s}$	1.22	1.01	1.00	1.00
	0.03 $\text{m}^3/\text{s}$	1.48	1.09	1.01	1.01
	0.04 $\text{m}^3/\text{s}$	1.68	1.18	1.03	1.01

Table 4. Water Depth Change Ratio for Vegetation Condition (Compound Channel)

		Density Change of Vegetation								
		3.5			2.4			1.4		
Water Depth - Vegetation Height Ratio		1.6	2.3	3.0	1.6	2.3	3.0	1.6	2.3	3.0
Water Depth Change Ratio	0.02 $\text{m}^3/\text{s}$	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.03 $\text{m}^3/\text{s}$	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.000	1.00	1.00	1.000
	0.04 $\text{m}^3/\text{s}$	1.06	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.000



Table 5. Velocity Change Ratio of Low Flow Channel for Vegetation Condition (Compound Channel)

		Density Change of Vegetation								
		3.5			2.4			1.4		
Water Depth - Vegetation Height Ratio		1.6	2.3	3.0	1.6	2.3	3.0	1.6	2.3	3.0
Low Flow Channel Velocity Change Ratio	0.02 m <sup>3</sup> /s	1.68	1.55	1.47	1.49	1.42	1.35	1.40	1.27	1.25
	0.03 m <sup>3</sup> /s	1.84	1.57	1.48	1.63	1.43	1.38	1.41	1.30	1.30
	0.04 m <sup>3</sup> /s	1.85	1.64	1.56	1.67	1.46	1.41	1.46	1.39	1.32

4.2 식생위치 변화

Table 6은 복단면 수로에서 유량이 0.02 m<sup>3</sup>/s 일 때 식생구역의 중앙지점(Fig. 8에서 C지점)에서 홍수터에 식생 위치변화에 따른 수로 내 식생전의 평균유속과 식생후의 저수로 내 평균유속의 비를 나타내고 있다. Table 6에서와 같이 제방측에 식생이 되어 있을 경우 20 % ~ 52 %, 홍수터 중앙의 경우 20 % ~ 33 %, 저수로측에 식생이 되어있을 경우 14 % ~ 44 % 의 유속증가를 나타내었다. 따라서 저수로 내의 유속은 식생이 홍수터 중앙에 위치한 경우 저수로의 유속상승이 가장 적게 나타났으나 그 차이가 크지 않으므로 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

4.3 수치모형을 이용한 조도계수 산정

본 연구에서는 실측된 실험결과를 범용적으로 사용

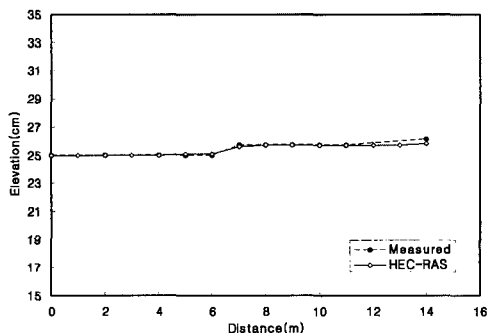
되고 있는 수치해석 모형인 HEC-RAS와 RMA-2 모형과 비교하여, 실무에서 사용할 수 있는 식생에 따른 조도계수의 범위를 제시하고자 하였다.

수치모형의 식생구간에서 조도계수를 변화시키면서 실측수위와 계산수위를 일치되도록 하였다. 즉, 수치모형에서 단면 평균조도계수를 변화시킨 것이 아니고 식생이 된 구역만의 조도계수를 변화시켰다. 유량조건은 실험에서 비교적 수위변화가 큰 0.04 m<sup>3</sup>/s, 수심비는 단면의 경우 2.2, 2.8, 3.4, 복단면에서는 1.6, 2.3, 3.0 의 경우를 대상으로 하였다. Fig. 16은 유량 0.04 m<sup>3</sup>/s, 수심비 2.8 에서 실측치와 수치모의 결과를 나타낸 것이다. Table 7은 실측된 실험결과에 단단면 수로에는 HEC-RAS 모형을 이용하고, 복단면 수로에는 RMA-2 모형을 적용하여 산정된 식생구간에서의 조도계수를 나타내고 있다.

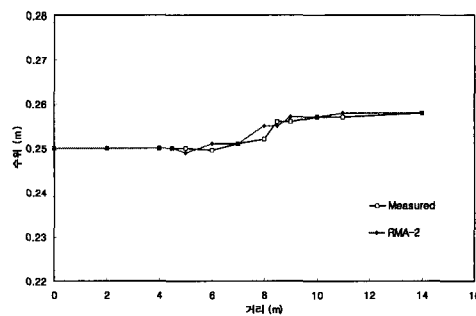
단단면 수로의 경우 식생전의 조도계수는 0.0175 정

Table 6. Velocity Change Ratio for Vegetation Location Variation in Floodplain (Compound Channel)

Location Change of Vegetation	Bank Side			Center			Channel Side		
	1.6	2.3	3.0	1.6	2.3	3.0	1.6	2.3	3.0
Water Depth - Vegetation Height Ratio									
Low Flow Channel Velocity Change Ratio	1.52	1.25	1.20	1.33	1.25	1.20	1.44	1.14	1.14



(a) Single Channel(HEC-RAS)



b) Compound Channel(RMA-2)

Fig. 16 Comparison of Experimental Data with Numerical Model data

Table 7. Roughness Coefficients in Vegetated channel

Numerical Model		HEC-RAS			RMA-2		
		Single Section Channel			Compound Channel		
Experiment Condition	Discharge	0.04m <sup>3</sup> /s			0.04m <sup>3</sup> /s		
	Water Depth Ratio	2.2	2.8	3.4	1.6	2.3	3.0
	Density	3.5%			3.5%		
Manning's n Coefficient	No Vegetation	0.0175			0.0180		
	Vegetation Area	0.140	0.085	0.055	0.063	0.072	0.085
	Section Average	-	-	-	0.038	0.041	0.046

도이며, 식생후에 식생구역의 조도계수는 수심비에 따라 0.055 ~ 0.14 정도로 산정되었다. 홍수터에 식생된 경우 식생전에는 0.018, 식생후에는 0.063 ~ 0.085 정도로 산정되었다. 또한 단면평균조도계수를 구하기 위하여 단면의 윗변과 각 부분의 계산된 조도계수를 이용하고 Eq. (1)(우효섭, 2001)을 홍수터에 식생된 경우를 대상으로 적용한 결과 0.038 ~ 0.046 정도로 산정되었다.

$$n_e = \left[ \frac{\sum_{i=0}^N (P_i n_i^2)}{P} \right]^{1/2} \quad (1)$$

단단면에서 조도계수가 비교적 크게 산정되었는데, 이는 식생의 밀도가 35 % 로 밀생하며, 수로 저면 전체에 식생을 하였기 때문으로 판단된다. 또한 식생에 의한 수위상승의 영향은 조도계수만으로 고려하는 것은 한계가 있으며, 점성력과 유체력 등에 의한 수위상승 또한 고려해야 한다고 생각된다. Table 7의 조도계수는 본 연구의 범위에서의 값이며 일반적인 조도계수 예측에는 더욱 많은 실험 및 실측 자료가 필요하다고 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 직사각형 단단면 수로와 홍수터를 가지는 복단면 수로에서 관목의 식생시 수리량 변화 특성을 분석하였다. 인공식생을 이용하였으며, 유량, 수심비, 식생밀도, 식생위치 등을 변화시키며 실험을 실시하였다. 실험수위와 계산수위가 일치하는 조도계수를 실무에서 많이 사용되고 있는 HEC-RAS 와 RMA-2 모형을 이용하여 추정하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 단단면 수로 저면에 관목을 식생하였을 경우 수심비가 증가 할수록 식생에 의한 수위의 상승량은 감소하였으며, 수심비가 약 3.5 이상부터는 식생에 의한 수위 증가는 거의 없는 것으로 관측되었다.
2. 복단면 홍수터에 관목을 식생할 경우 수위 상승량은 최대 6 % 정도로 나타났다.
3. 복단면의 홍수터에 관목의 식생시 저수로 내 유속은 식생전의 단면평균유속에 비하여 약 25 % ~ 85 % 정도로 증가하였다. 따라서 홍수터에 식생시에 저수로의 유속증가로 인한 하상세굴을 고려해야 한다.
4. 홍수터 식생에 의한 저수로 유속 증가량은 식생밀도와 비례하고 수심비와는 반비례한다.
5. 실측 수위에 수치모형의 계산 수위를 일치 시켜서 얻은 식생구역에서의 조도계수는 단단면의 경우 0.055 ~ 0.14 복단면의 경우 0.063 ~ 0.085 로 산정되었다. 또한 홍수터에 식생된 복단면에서의 단면평균조도계수는 0.038 ~ 0.046 으로 산정되었으며, 이 결과들은 본 연구의 실험범위 내에서 결과이며 식생과 조도계수의 관계는 향후 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구 성과입니다.

### 참 고 문 헌

송재우, 박성식 (2004). "식생수로와 비식생수로에서의

- 조도특성 및 유속분포.” *대한토목학회논문집*, 제24권, 제6B호, 대한토목학회, pp. 545-552.
- 여흥구, 박문형, 강준구, 김태욱 (2004). “개수로 내 식생구간의 흐름저항 및 흐름특성에 관한 실험적 고찰.” *한국환경복원녹화기술학회논문집*, 제7권, 제6호, 한국환경복원녹화기술학회, pp. 61-74.
- 우효섭 (2001). *하천수리학*, 청문각.
- 윤태훈, 신용진, 이지송 (2002). “수초영역으로 인한 개수로 흐름변화.” *대한토목학회논문집*, 제22권, 제2B호, 대한토목학회, pp. 143-149.
- 이동섭, 우효섭, 권보애, 안홍규 (2006). “식생 조도계수 산정을 위한 선별된 식생에 관한 실험 연구.” *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1291-1294.
- 이삼희, 옥기영, 강천수, 이진원 (2000). “하천식생에 의한 유사퇴적의 실험적 고찰.” *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 634-639.
- 조홍제, 최현근, 이태영 (2002). “도시하천의 둔치내 식생의 평면적 분포에 따른 홍수위 변화의 실험적 연구.” *한국수자원학회 논문집*, 제35권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 203-212.
- 최성욱 (2004). *레이저도플러유속계를 이용한 식생수로의 난류 측정*, 한국수자원학회 03분과위원회 연구과업보고서, 한국수자원학회, pp. 23-52.
- 최성욱 (2005). “복단면 개수로의 1차원 수치모형의 개발.” *도시하천의 생태 및 수리특성 분석기술*, 도시홍수재해관리기술연구단 기술보고서, 건설교통부, pp. 25-40.
- 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.
- Cokgor, S., and Kucukali, S. (2005). “Variation of turbulence intensities in/around emergent vegetation zones.” *31st Congress of IHAR*, Seoul, Korea, CD-ROM, PC-14.
- Darby, S. E. (1999). “Open channel and sheet flow over flexible roughness.” *21st Congress of IHAR*, Melbourne, Australia.
- 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.
- Fukuoka, S., Fujita, K., and Niida, H. (1992). “Prediction in flood water level of river course with vegetation.” *Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 447, pp. 17-24.
- Fukuoka, S., Watanabe, A., Takatsugu, W., and Salamoto, H. (2001). “Mixing structure & flow development accompanying the change in the density of vegetation by conditional sampling method.” *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 45, pp. 859-864.
- 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.
- Jarvela, J. (2002). “Flow resistance of flexible and stiff vegetation a flume study with natural plants.” *Journal of Hydrology*, Vol. 269, pp. 44-54.
- Jordanova, A. A. and James, C. S. (2003). “Experimental study of bed load transport through emergent vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 6, pp. 474-478.
- Kouwen, N., Unny, T.E., and Hill, H.M. (1969). “Flow retardance in vegetated channel.” *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol. 95, No. 2, pp. 329-340.
- Lopez, F., and Garcia, M. H. (2001). “Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, pp. 392-402.
- 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.
- Sellin, R.H.J. (1964). “A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its floodplains.” *La Houille Blanche*, Vol. 7, pp.793-802.
- Stephan, U. and Dieter, G. (2002). “Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation.” *Journal of Hydrology*, Vol. 269, pp. 27-43.
- 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.
- Struve, J., Falconer, R.A., and Wu, Y. (2003). “Influence of model mangrove trees on the hydrodynamics in a flume.” *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 58,

pp. 163-171.

Wark, J. B., Samuels, P. G., and Ervine, D. A. (1990).

“A practical method of estimating velocity and discharge in a compound channel.” *Flood Hydraulics*, W. R. White(ed.), Wiley, Chichester, England.

Winson, C.A.M.E., Bates, P.D., and Hervouet, J.M.

(2002). “Comparison of turbulence models for

stage-discharge rating curve prediction in reach scale compound channel flows using two-dimensional finite element.” *Journal of Hydrology*, Vol. 257, pp. 42-58.

Yang, K. (2005). “Velocity distribution in compound channels with vegetation floodplains.” *31st Congress of IHAR*, Seoul, Korea, CD-ROM, PC-22.

(논문번호:06-104/접수:2006.10.27/심사완료:2007.02.26)