

# 하천식생의 수리특성에 관한 연구

이삼희 (한국건설기술연구원, 선임연구원)

## 1. 서론

제방축조와 같은 일반적인 하천개수, 수자원개발을 위한 댐 건설, 토사생산 환경에 영향을 미치는 유역개발, 지구환경 변화에 따른 물순환계의 변화 등에 의해 流況과 토사수송 반응이 점차 변하고 있다. 다시 말해, 하천에서 중소규모 홍수발생빈도의 감소, 토사이동의 제어, 평수시의 유량 감소, 수위변동(位況) 감소, 수질 악화 등과 같은 현저한 변화가 일어나고 있는 국내외의 사례가 적지 않다. 이와 같은 수리 및 수질현상의 변화는 하도의 지형과 식생에 의한 하도의 지피(地皮)특성에 영향을 미치고 있다. 근래 아시아 문순지역에 속하는 일본의 자갈하도에서 식생에 의한 하도내의 森林化와 이에 따른 복단면 하도형태가 크게 진전되고 있는 것이 그 대표적인 사례로 지적되고 있다(이삼희, 1999). 이와 같은 현상은 곧 하도내의 지피상황이 계속해서 변하고 있다는 사실을 나타내며, 하천관리상 다음과 같은 주요한 과제로 대두할 가능성이 있다.

- ① 치수안전도에 영향을 미치는 하도내 조도 상승 및 이동상 하도의 고착화에 따른 과다 국소세굴심 발생 및 하안의 안정성 저해
- ② 하도내의 자연환경 변화(특히 생물서식환경 변

## 화 초래)

이와 같은 상황에서 하도내 지피형태가 앞으로 어떻게 변화해 나갈 것인가를 정량적으로 평가하고 예측하는 것은 적절한 하천관리를 위해서 매우 중요하다. 하천식생으로 대변되는 이와 같은 하도내 지피상황은 흐름, 토사수송, 하천지형, 하천구조물 등과 같이 하도의 중요한 요소, 즉 하도특성<sup>1)</sup>의 요소로 다루어야 할 필요가 있다. 이들 상호관계성을 명확히 규명하는 것 자체가 하천공학의 고도기술의 개발을 위해서 필요할 뿐만 아니라, 최근에 제기되고 있는 하천생태수리학(Habitat-hydraulics 혹은 Eco-hydraulics)의 정립과도 밀접한 관계가 있기 때문이다. 이에따라, 최근에 이르러 하도수리학 분야에서 독일, 일본 등 하도의 지피상황이 하도관리상 크게 문제가 되고 있는 일부 선진국에서 하천식생과 관련한 연구가 생태계 보전과도 깊은 관계가 있어 매우 활발히 전개되고 있는 상황이다.

현재, 홍수시의 흐름과 토사수송을 충분한 정도로까지 예측하기란 매우 어렵다. 그러나, 홍수유출시 하도 안정성의 확보와 평상시 자연환경의 회복을 충족시킬 수 있는 적정수준까지 이르기 위해서, 홍수시 흐름과 토사수송에만 주로 관계한 지금까지의 일반적인 수리해석 방법을 확장하여, 하천식생의 영향도

1) 河道特性 : 하천은 주어진 자연적, 인공적 환경에 응답한 형태를 나타내므로 하천마다 고유특성을 지녀 다양한 모습을 지니게 된다. 이와 같은 하천에 나타나는 다양한 모습을 총칭하여 河道特性이라 한다. 일반적으로 하도특성을 구성하는 요소는 a)홍수시의 수리량, b) 하도의 평면요소, c)소규모 하상파의 형태와 흐름의 저항, d)토사의 운동형태와 운동량, e)범람원(고수부지)의 특성, f)하도의 평면형상, g)하도의 횡단면, h)홍수위와 수면의 변화특성, i)하도의 중단형 변동특성, j)생태계, k)인위적 작용에 의한 하도특성의 변화형태, l)하천경관 등이 있다.

정량적으로 고려하는 방법으로 전개할 필요가 있다. 물론, 홍수유출시 뿐만 아니라 평수시 유황과 수질 해석 역시 하천생태계에 있어 중요하다.

본 장에서는 물의 흐름, 토사수송의 수리해석 방법에 대한 기본사항, 흐름에 미치는 식생효과와 모델화, 토사수송에 미치는 식생의 영향에 관한 연구내용을 살펴본다. 하천식생을 고려한 수리특성의 해석방법에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 수리모델과 수치해석방법 및 입력 데이터로 크게 나누어 해석방법을 검토할 필요가 있다. 하천식생을 고려하고, 하도의 복잡한 형태와 비선형성을 다루기 위해서는 고도의 정밀한 수치해석법이 중요하지만, 여기서는 수치해석법을 논외로 하고, 이른바 하천생태수리학에서 기초가 되는 식생을 고려한 수리모델 및 새로 하도변화 해석기법을 심으로 한 연구동향을 중심으로 살펴본다.

## 2. 하천식생을 고려한 홍수류 모델

### 2.1. 준 2차원 모델 : 하천식생 등의 효과를 반영한 부등류계산모델

하도정비계획을 수립할 때는 일반적으로 계획하도 단면, 즉 표준단면을 대상으로 하여 부등류계산을 실시하며, 여기에서 구한 계산 홍수위를 이용하여 각 단면의 유하능력을 평가한다. 부등류계산에서 지금까지 적용한 조도계수는 과거 홍수자료를 토대로 역산하여 구한 값이거나, 하도의 상황에 맞추어 하도의 횡단면 전체의 조도특성을 합성하여 구한 일정한 값을 적용해 왔다. 그러나, 최근에는 각 단면의 유하능력을 평가하는데, 수목, 교량 등의 구조물에 의한 수위상승, 지천합류의 영향에 의한 수위상승, 만곡에 의한 수위상승, 사주(하상파)에 의한 수위상승 등과 같은 추가 수위상승분을 별도로 분리계산하여 반영하는 부등류계산을 실시한다. 그리고, 조도계수를 적용함에 있어서도 조도의 근본적인 개념과 특성이 다른 저수로와 고수부지로 각각 분리하여 고려하고 있다. 저수로의 조도계수는 계획홍수유량이 유효할 때의 하상상태와 해당구간의 하상재료를 고려하여 산

정하고, 특히 대개 하천식생에 의해 지배받고 있는 고수부지의 조도계수는 고수부지의 지피상황이나 수목군의 존재와 분포형태를 고려하여 설정하도록 하고 있다. 여기서, 저수로와 고수부지를 분리하여 계산하므로 준 2차원 부등류계산이라고 하여 복단면 하도형태가 발달하는 하도에서 그 사용을 특히 권장하고 있다.

### 2.2. 식생을 고려한 2차원 모델

하천의 흐름에 대한 현상을 상세하게 파악하기 위해서는 하천의 지형특성상 3차원 모델이 비교적 이상적이지만, 계산에 소요되는 시간과 컴퓨터 기억용량, 정확도의 한계, 자료수집의 어려움 등 여러 제한성 때문에, 광범위한 영역에 걸쳐 장시간의 수리현상을 해석하는데 한계가 있다. 이에 따라, 하천식생에 의한 저항특성을 반영하고, 정수압 분포와 수심방향의 유속분포형태 및 부유사 농도분포를 가정함에 있어 방정식을 간략화한 2차원 천수류 모델이 적용 가능범위가 폭넓은 관계로 일반적으로 많이 사용되고 있다. 기초 방정식은 주류방향만을 기술할 때 다음과 같으며, 여기서 미지량은 수심  $h$ , 수심방향의 평균유속 2성분  $U, V$  및 부유사 농도  $C_i$ 이다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

- 운동량방정식

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{xx} hU^2}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{xy} hUV}{\partial y} = ghI_x - gh \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{sx} - \tau_{bx} + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} \right] - F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{xy} hUV}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{yy} hV^2}{\partial y} = ghI_y - gh \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{sy} - \tau_{by} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} \right] - F_y \quad (3)$$

여기서  $\beta_{xx}, \beta_{xy}, \beta_{yy}$ 는 운동량 보정계수,  $\tau_{xx}, \tau_{yy}$ 는 수면에 작용하는 전단응력,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ 는 하상에 작용하는 전단응력,  $T_{xx}, T_{xy}, T_{yy}$ 는 난류에 의한 운동량 확산,  $F_x, F_y$ 는 식생에 의한 저항을 나타낸다. 하상에서의 전단응력과 난류확산 항은 각각 다음과 같이 Manning의 조도계수와 유효 동점성계수  $\nu_e$ 의 개념을 사용하여 다음과 같이 모델화한다.

- 하상에서의 전단응력

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \rho g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2} / h^{1/3} \\ \tau_{by} &= \rho g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2} / h^{1/3} \end{aligned} \quad (4)$$

- 난류확산

$$\begin{aligned} T_{xx} &= 2\nu_e \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} k, \\ T_{xy} &= \nu_e \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_{yy} &= 2\nu_e \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} k \\ \nu_t &= KU \cdot h / 6 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\nu_t = c_k k^2 / \epsilon \quad (7)$$

유효 동점성계수  $\nu_e$ 는 식(6)을 대개 사용한다. 난류상태가 복잡한 경우에는  $\nu_e$ 로써 수심 평균된 난류에너지  $k$ 와 난류 소모율  $\epsilon$ 를 사용한 식(7)과 동일한 표현을 사용한다(Rodi, 1980). 그리고, 수심을 평균한  $k$ 와  $\epsilon$ 의 수평면의 분포는 각각의 방정식을 풀어서 구한다. 입경별 유사량의 연속식은 식(8)과 수심평균한 부유토사 농도를 식(9)에 의해 입경별로 산출한다.

- 입경별 유사량연속식

$$\begin{aligned} \delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + \dot{p}_i \frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial q_{Bi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bi}}{\partial y} + q_{si} - w_{oi} C_{bi} \right\} \\ = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $z_B$ 는 하상높이,  $q_{Bi}$ 는 소류사량,  $q_{si}$ 는 하상에서부터의 부상량,  $\delta$ 는 교환층 두께,  $p^*_i$ 는 입경  $d_i$ 의 입자의 교환층 중에 차지하는 비율,  $w_{oi}$ 는 침강속도,  $C_{bi}$ 는 하상 부근에서의 농도이다. 소류사량, 부유사의 부상량은 일반적인 산정식에 의해 평가한다.

하상부근에서의 부유사 농도  $C_{bi}$ 는 부유사 농도  $C_i$ 에 대한 다음 식에 의해 산출한다.

- 입경별 부유사의 수송방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial h U C_i}{\partial x} + \frac{\partial h V C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\nu_e}{S_c} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\nu_e}{S_c} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + (q_{si} - w_{oi} C_{bi}) h \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.3. 식생을 고려한 3차원 모델

식생이 존재하는 경우의 흐름과 토사수송에 대한 3차원 모델의 기초 방정식에서 주류방향만을 기술하면 식(10), 식(11)과 같다. 여기서, 미지량은 전부 공간적으로 평균한 수리량이다. 그리고, 평균흐름에 영향을 미치는 식생의 영향은 단위체적당 항력으로 나타낸다. 유동장의 미지량은 유속의 3성분인 U, V, W와 정수압에서의 편차압력 P' 이고, 밀도는 일정하다고 가정한다. 토사수송은 wash load, 부유사, 소류사별로 산정하고, 토사 수지식을 통해서 하상변동으로 변환한다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

- 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \\ = g I_x - g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P'}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xx}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{xz}}{\rho} \right) - f_x \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 주류방향은  $x$ 축, 하폭방향은  $y$ 축, 평균하상면에 수직방향은  $z$ 축,  $I_x$ 는  $x$ 방향의 하상경사,  $h$ 는 수심,  $f_x$ 는 식생에 의한 흐름의 항력이다. 부유사 농도가 흐름에 미치는 영향과 유체의 분자점성의 영향은 무시한다. 식(11)의 좌변은 비정상항과 이류항으로써, 이류항은 중요하다. 또한, 이들 두개의 항은 대규모 와류운동의 시간적, 장소적 발전을 설명하는데 중요하다. 한편, 우변은 흐름을 구동하는 요인을 나타내고 있다. 제1항은 중력, 제2항은 수심 변화, 제3항은 압력 변화, 제 4, 5, 6항은 난류효과, 마지막 항이 바로 식생에 의한 저항이다. 연속방정식과 운동량 방정식을 연립해서 해석하기 위해서는 식(11)의 우변에 나타난 모든 양을 계산가능한 양으로 나타내야 한다. 수심과 압력은 수면에서의 운동학적 조건과 연속방정식에 의해 구해지기 때문에, 난류효과와 식생 효과의 수리모델화가 필요하다. 난류효과의 표현에는 다양하며, 각각 적용범위와 계산비용이 다르다. 여기서, 식(11)에 나타나는 난류항과 식생항에 대한 모델의 사례는 다음과 같다.

- 난류모델 (와동점성계수 모델)

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2 \nu_t \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} k \quad (12)$$

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (13)$$

$$\frac{\tau_{xz}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad (14)$$

여기서,  $\nu_t$ 는 와동점성 계수로 식(6), 식(7)과 같다. 난류효과가 다른 항에 비해 중요하지 않은 경우는 일반적으로 식(6)과 같은 간단한 모델을 이용할 수 있다. 식(7)의 모델은 난류효과가 중요한 경우와 식(6)의 모델에서는 정도가 충분하지 않은 경우에 주로 사용된다. 난류 에너지  $k$ 와 난류 소모율  $\epsilon$ 의 분포는 각각에 대한 편미분방정식에 의해 구해진다. 이들 2개의 양으로 국소적인 난류상태를 표현하고, 와동

점성계수의 정도를 높인다( $k-\epsilon$  모델). 다만, 와동점성계수 모델은 식생역과 비식생역과의 경계부분에서 나타나는 대규모 와류에 의한 운동량이나 물질수송이 탁월한 경우는 그 영향을 정확하게 표현할 수 없는 것으로 알려져 있다.

- 식생모델

$$f_x = \frac{2}{3} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (14)$$

여기서  $f_x$ 는 식생에 의한 항력,  $C_D$ 는 항력계수,  $\lambda$ 는 식생밀도(=D/s<sup>2</sup>, D:식생의 간격)이다. 그리고 입경별 유사량의 연속식은 2차원 흐름모델에서 제시한 식(8)과 같으며, 입경별 부유사 수송방정식은 다음과 같다.

- 입경별 부유사의 수송 방정식

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{\partial (W-w_{oi})C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\nu_t}{S_c} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\nu_t}{S_c} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_t}{S_c} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \quad (15)$$

여기서,  $S_c$ 는 난류 슈미트수이다. 식 (14), (15)에서 식생의 토사이동에 대한 차폐효과는 반영되어 있지 않다. 이 두 식 모두 입경에 대해 해석하고, 하상고의 변화를 구한다.

### 3. 하천식생에 의한 수리모델

하천식생을 고려한 홍수류 모델의 적용성은 하천식생에 의한 의한 수리모델화에 크게 지배받는다 할 수 있다. 그러나, 하천식생은 그 종류가 다양하며, 기하학적 형태 및 분포특성도 매우 다르다. 이에 따라, 흐름의 영향을 받아 일어나는 그 응답 형태도 직립, 변형, 요동 등 다양한 형태로 나타난다. 여기에서, 일본 건설성 토목연구소 등에서 식생이 흐름에 미치는 영향을 모델화한 연구사례를 들어 간략히 소개한다.

### 3.1 식생에 의한 연직 2차원 흐름의 영향

광폭 수로에 직립한 모의식생(참고:갈대를 상징하며, 달뿌리풀이나 물억새와는 수리적 응답특성이 다름)을 전면에 걸쳐 배치한 경우, 수심방향의 유속과 난류응력의 분포의 측정결과는 그림-1과 같다(Nakagawa, 1990, 건설성 토목연구소 1997).

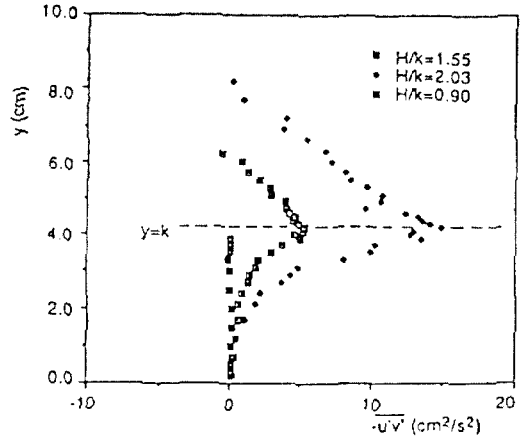
비수물식생의 경우(수심대 식생높이의 비  $H/K < 0$ 인 경우)에는 식생역 내부의 유속은 동일하고, 레이놀즈 응력도 0에 가깝다. 한편, 식생이 수물(수심대 식생고의 비  $H/K > 0$ 인 경우)하면 유속은 식생 윗부분의 표면층에서는 대수분포를 따르지만, 식생층내에서는 식생층 상면에서 하상에 근접함에 따라 감소해서 어떤 값에 점차 가까워진다. 그리고, 레이놀즈 응력은 식생층 상면에서 최대이고, 수면에 가까울수록 선형적으로 감소한다. 식생층내에서의 레이놀즈 응력은 식생층 상면에서부터 식생층 내부로 향함에 따라 지수함수적으로 감소한다. 정면에서 볼 때 식생층 윗부근에서 저주파수의 와류가 형성되고, 표면층의 고속 유체괴가 식생층 내부로 진입하는 듯한 운동이 생긴다. 또한, 표면층에서는 식생층에서의 저속유체괴가 나오는 듯한 운동이 관측된다. 그리고, 하상에서 전단응력은 작게 되어 토사의 용출과 이동은 어렵게 된다. 식생의 끝부근의 운동은 난류혼합을 촉진하고, 평균유속과 난류응력의 분포를 보다 동일화 한다. 충분히 발달한 흐름을 대상으로 하면, 수리모델은 가장 간단하게 되어, 운동량의 식은 이하와 같이 나타낼 수 있다.

$$- \text{식생층} : I_x + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_{xz}}{dz} - f_x = 0 \quad (16)$$

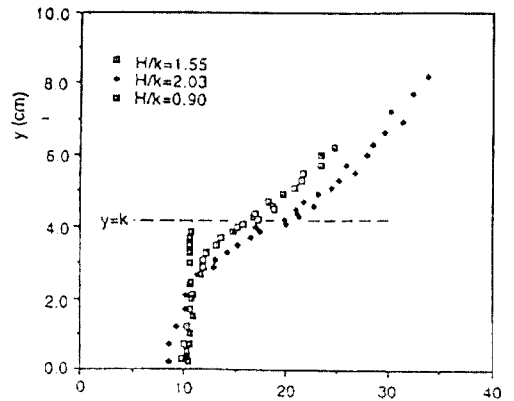
$$- \text{항력} : f_x = \frac{1}{2} C_D \lambda U^2 \quad (17)$$

$$- \text{표면층} : gI_x + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_{xz}}{dz} = 0 \quad (18)$$

여기서,  $\tau_{xz}$ 는 난류전단응력,  $f_x$ 는 식생의 항력,  $C_D$ 는 항력계수,  $\lambda$ 는 식물밀생도이다. 식생층내에서는 중력의 성분과 식생에 의한 항력과 난류응력과의 사



a) 평균유속



b) 레이놀즈 응력

그림 1. 식생이 흐름에 미치는 영향(Nakagawa, 1990)

이에서 균형을 이룬다.

비수물 식생의 경우는 식생층내에서는 중력의 성분과 식생에 의한 항력과 난류응력간에 균형을 이룬다. 일반적인 실험에 의하면 식생층내에서는 레이놀즈 응력은 기여하지 않기 때문에 식(16)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$gI_x = \frac{1}{2} C_D \lambda U_{sv}^2 \quad (19)$$

$$U_{sv} = \sqrt{2gI_x / (C_D \lambda)} = K_s \sqrt{I_x} \quad (20)$$

여기서,  $K_S$ 는 통수능과 같은 물리적 특성을 지니는 식생의 투과계수라고 부르며, 식생의 수리학적 성질을 나타낸다. 식생이 수몰하는 경우는  $k - \epsilon$  모델을 이용하여 난류응력을 모델화할 수가 있다.

### 3.2. 식생에 의한 수평 2차원 흐름의 영향

하천식생이 불규칙하게 분포하는 경우, 식생역에서 유속이 저감하며, 비식생역에서는 유속이 상대적으로 증대하여 유량이 증가한다. 식생에 관한 연구의 초기단계에서는 하도내 식생분포의 영향은 식생 효과만을 항력의 형태로 모델화할 수 있다고 생각했다. 그러나, 식생역과 비식생역과의 사이와 흐름방향으로 띠모양의 식생역의 양측에 흐름이 있는 경우는 흐름의 불안정성에 기인하는 대규모 수평와류가 형성되며, 이것이 유속분포와 물질수송에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 이와 같은 대규모 수평 혼합에 대한 계측과 모델화에 관한 연구가 수행되어 기본적인 특징을 재현하기에 이르렀다(Hujita, 1992). 대규모 와류의 발전을 파악하기 위해서는 식(2), 식(3)에 의한 이류항과 난류확산의 정밀도에 유의했던 비정상류 계산이 필요하다라는 사실이 알려졌다. 그리고, 앞에 서술한 연직 2차원의 흐름의 해석을 3차원에 확장하는 연구도 이루어지고 있지만, 평균 유속 3 성분을 어느 정도 충분하게 재현하는 수준까지는 이르지 못하고 있는 실정이므로 앞으로의 주요한 연구과제이다.

## 4. 식생의 토사유송에의 영향

하천 식생역의 존재는 전술한 바와 같이 흐름의 변화를 초래함과 아울러 소류사의 유송 및 부유사 유송(wash load의 유송 포함)에도 커다란 영향을 준다. 여기서 각 유사분급에 따라 식생에 의한 유사퇴적 현상을 살펴 본다.

### 4.1. 식생의 소류사 유송에의 영향

식생에 의한 균일사의 퇴적실험 결과는 그림 2과 같으며, 수로의 좌안(횡단면의 1/2)에만 비수몰 식

생역을 설치한 경우이다. 식생역 상류단(10m지점)에서 식생영역으로 접근하는 흐름이 급격히 변하고, 더불어 하강류가 생김과 동시에 하상의 전단응력이 증가하여 하상세굴현상이 생기기 쉽게 된다. 흐름이 식생영역으로 유하함에 따라, 식생역에서 유속이 감소하는 반면에 비식생역의 유속은 증대한다.

이에 따라, 식생역에서는 저면의 전단응력이 감소하고 토사이동량이 감소한다. 한편, 비식생역에서는 식생이 없는 경우에 비해서 토사의 이동량이 증가하고, 세굴경향을 나타내게 된다. 그리고, 소류력이 강한 비식생역에서 약한 식생역에의 소류사가 유입한다. 그리고, 식생역의 안쪽으로 토사가 유송되는 도중에 토사의 한계가 생기고, 종방향 띠모양을 형성한다. 식생역의 말단부의 배후에서는 유속이 작거나 역류역이 형성되어 경우에 딸 토사의 퇴적이 일어나기도 한다(건기연, 1999).

식생의 수몰의 경우에는 하상이 평탄하여 흐름이 평형영역에 달하고 있어도, 대규모 저주파의 와류운동에 소류사가 이끌려, 횡단방향의 운동이 생기는 것으로 밝혀져 있다.

### 4.2. 식생의 부유사 유송에의 영향

부유사는 비식생역과 식생역과의 사이에 형성된 대규모 와류운동에 의한 이류와 횡단방향의 난류확산에 의해 부유사 유송이 이루어진다. 식생이 수몰하는 경우에 의한 부유사의 농도분포의 계산결과를 그

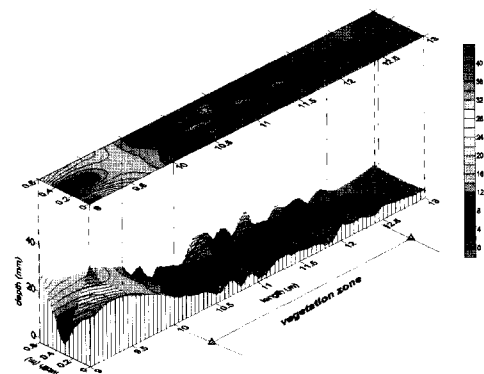


그림 2. 식생에 의한 유사퇴적 실험(건기연, 1999)

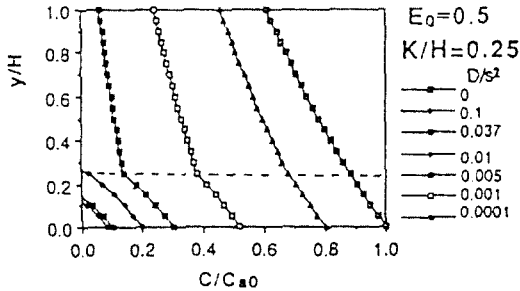


그림 3. 식생밀도와 부유사량의 연직분포(Simizu, 1991)

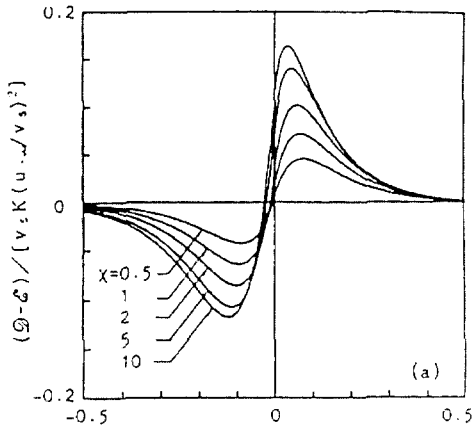


그림 4. 부유사의 퇴적속도(Ikeda, 1991)

림-3.과 같다(Simizu, 1991, 건설성 토목연구소, 1998). 식생밀도  $D/s^2$ 가 크게되면, 식생층 내부로 부유사는 유입되고 식생 상부의 표면층에 부유사가 존재하는 경우에는 분포형태가 동일하게 접근하는 것을 알 수 있다.

한편, 부유사의 횡단방향의 분포형태에 대한 연구결과는 그림 4.에서 보는 바와 같이 하도 한 측면에만 식생대를 가지는 수로에 의한 부유토사의 퇴적속도를 나타내고 있다. 횡축의 원점이 식생역과 비식생역과의 경계이고, 오른쪽의 영역이 식생역에 해당한다. 도표 속의  $x$ 는 식생밀도에 대응하고 있다. 식생역 경계부 부근에서 토사의 솟아오르고, 세굴경향을 나타냄과 동시에, 유송된 부유사는 식생역의 바로 내측에 퇴적하는 것을 알 수 있다.(Ikeda, 1991, 건설성 토목연구소 1998) 그리고, 식생에 의한 부유토사의 3

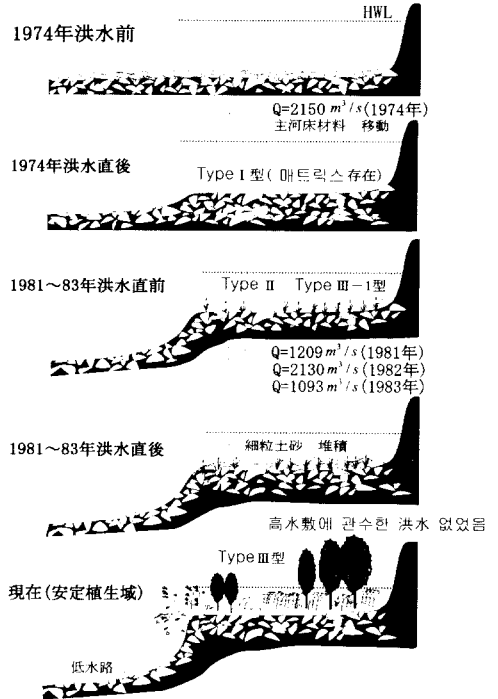


그림 5. 안정식생역의 확대 이미지(李參熙, 1998)

차원 분포에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있다.

## 5. 식생에 의한 하도변화의 영향

### 5.1. 하도변화에 대한 새로운 모색

하천에서의 생물서식공간(하도 그 자체의 모습)은 산림 등 육지역과는 달리 무엇보다 하천의 물리적인 작용에 큰 영향을 받으면서 형성되어 변화한다.

하천의 생물서식공간에서 기본이 되는 하천식생은 하천의 물리작용과 불가분의 관계에 있다. 수공학은 하상변동 등 여러 하도변화와 같이 앞으로 생물서식공간을 평가 및 예측대상으로 하지 않으면 안될 시점에 이르게 될 것이다. 생물서식공간 구성요소 가운데 하상의 형상은 종래의 수공학 기술과 지식을 거의 그대로 적용 가능하지만, 표층하상재료의 상태와 식물에 대해서는 새로운 수공학적인 접근을 필요로 한다. 아시아몬순지대에 속함에 따라 비교적 독특한 하도 형태를 지니는 우리나라의 하천에서 지금까지의 실

제 하천에서 유사거동의 한계도 바로 이와 같은 식생 상태와 미지형에 의한 하도변화와의 상호 관계성을 정량적으로 반영하지 않은데서 비롯되었다고도 할 수 있다.

## 5.2. 하천식생에 의한 미지형의 하도변화

생물서식공간의 기본이 되는 하천식생의 형성기구에 대한 해명과 예측에서도 근본적으로는 물과 토사의 움직임(유사)이라고 하는 수리현상이 기본이 되지만, 그것을 다루는 방법에 대해서는 달리 접근하여 적용할 필요가 있다.

하상변동의 예측과 식생의 예측은 서로 요구되는 정보의 본질이 크게 다르기 때문이다. 일본 타마가와와 나가타지구의 대표적인 지역에서 1968년 이후에 일어난 산림화 즉 안정적인 식생역의 확대에 대해 그림 5와 같은 시나리오의 제시 가능하다.

여기서, 1981, 1982, 1983년의 홍수에 의해 지금까지의 복단면 변화에 의해 발생한 고수부지형태의 하상(자갈)에 얇은 wash load가 기원이 되는 세립토사가 퇴적하게 된다. 세립토사가 퇴적이라고 하는 사상이 그 후에 산림화 즉 안정식생역의 확대에 있어 매우 중요하였다. 종래의 하상변동을 다룰 때는 wash load로 형성되는 이와 같은 약간의 지형변화는 그다지 중요하지 않았지만, 생물서식공간 형성이라고 하는 관점에서는 자갈위에 수 cm라도 세립토사가 덮혀 있는가 없는가에 따라 크게 달라진다. 즉, 생물서식공간예측을 위해서라도 수공학은 지금까지의 하상변동과는 차원이 다른 이와 같은 하도변화 현상을 대상으로 해야 함이 밝혀졌다(이삼희, 1998).

앞으로, 하천식생의 동태를 예측함에 있어 생물학적 지식이 불가결하다는 것은 말할 것도 없지만, 이와 동시에 달뿌리풀과 같이 하천에 의해서만 특징지워질 수 있는 하천 고유식물일수록 하천의 물리적 작용을 크게 받아 성립할 것이다. 하천의 물리적인 작용이 식물동태에 미치는 영향을 한번 철저히 정량 분석하고 이들에 의해 식생의 동태가 어디까지 추적 가능한가를 살핀 후, 이의 유용성과 한계를 분명히 할 필요가 있다. 그리고 나서, 이를 토대로 생물학적 접

근과 조합시켜 보면 궁극적인 식생 동태의 메카니즘을 해명할 수 있을 것이다.

## 6. 앞으로의 연구과제

앞으로 하천을 적절하게 관리함에 있어, 전술한 바와 같이 현황에 대한 수리현상을 정확히 파악하고, 정비후의 환경변화를 예측방법의 개발이 요망된다. 이를 위해서는 하천식생의 거동에 대한 정확한 해석과 아울러 수리모델의 개량, 복잡한 지형과 단면형태를 표현하는 수치해석법의 개량, 신뢰할 수 있는 관측 데이터의 축적을 병행해서 진행하는 것이 필요하다. 즉, 앞으로의 고도의 하천기술개발을 위해서는 다음과 같은 기술적 과제의 해결이 필요하다고 할 수 있다.

### (1) 난류모델

- 하천식생의 밀도와 배치 형태 등 식생의 물리적 특성을 고려한 2, 3차원 모델의 개량
- 실제 자연하천에의 적용성 검토

### (2) 식생모델

- 식생밀도의 높고 낮음에 따른 수리모델
- 하천 식생의 형태, 위치, 물리적 변형에 관한 수리모델
- 하천식생의 거동 : 세굴, 퇴적, 유체력에 의한 식생의 거동 해석

### (3) 토사유송 모델

- 혼합입경의 해석
- 하천식생의 차폐효과

### (4) 수치해석법의 고도화

- 수치오차의 저감

### (5) 수리조건

- 유량, 토사유송의 시간적, 공간적 변화

### (6) 하천수리량과 식생변화와의 상관성

- 하천수리량과 식생변화와의 상관성 해석
- 조도의 시간적, 공간적 예측 기법

### (7) 저수시의 수질, 수온등의 해석수법의 발전



## 6. 결론

우리나라에서 하천의 수리특성과 자연환경과의 상관성을 규명하는 구체적인 파악수법이 마련되어 있지 않은 가운데, 하천법의 개정에 즈음해 하천에서의 자연환경의 상황과 그에 따른 수리특성을 정확하고도 신속한 파악을 필요로 하고 있다. 지금까지 살펴본 바와 같이 하천식생에 따른 수리특성을 명확히 규명하는 것 자체가 하천공학의 고도기술의 개발은 물론 자연보전의 기틀을 마련하는 것임을 뜻한다. 따라

서, 기존의 하도수리학적 접근 방법에서 탈피하여, 앞으로 하천식생에 대한 정확한 해석 역시 하천공학에서 주요한 대상이라는 사실을 인식해야 할 시점이 이르렀다고 할 수 있을 것이다.

감사 : 본 내용은 필자의 연구내용과 필자가 소속되어 있었던 건설성 토목연구소와 일본 하천생태학술연구회의 연구결과 등을 토대로 정리한 것이므로, 건설성 토목연구소와 일본 하천생태학술연구회 소속 연구원들에게도 감사드린다.

## 〈참 고 문 헌〉

- 李參熙, 1999, "河川環境을 考慮한 治水 및 河川管理", 都市防禦能力 向上을 위한 技術심포지움, 한국수자원학회.
- 李參熙, 渡 敏, 望月達也, 藤田光一, 塚原隆夫, 1997, "礫床上的植物群落의 破壞と河床 材料의 移動", 土木學會第52回年次學術講演會概要集Ⅶ, pp.286-287.
- 李參熙, 藤田光一, 山本晃一, 1999, "礫床河川における安定植生域의 擴大シナリオ", 日本土木學會 水工學論文集(第43卷).
- 李參熙, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡 敏, 山本晃一, 望月達也, 1998, "礫床河川의 樹林化に 果たす洪水と細粒土砂流送의 役割", 土木學會水工學論文集, 第42卷, pp.433-438.
- 李參熙, 山本晃一, 高谷幸宏, 萱場祐一, 1996, "多摩川扇狀地河道部の河道内植生分布의 變化とその變化要因との關連性", 土木學會環境研究論文集, Vol.24, pp.26-33.
- 中川博次, Tsujimoto, T., Shimizu, Y., 1990, "植生を伴う開水路流れ의 構造に關する研究", 日本土木學會 水工學論文集(第34卷), 池田駿介, 泉典洋, 1991, "浮流砂의 橫斷方向擴散係數について", 日本土木學會 論文集, No.443.
- 清水義彦, Tsujimoto, T., 北村忠紀, 1991, "植生に覆われた砂床流れ의 浮流砂濃度分布", 日本土木學會 水工學論文集(第35卷).
- 清水義彦, 小栗竹重機, 茂木宏一, 小松みわ子, 1997, "植生が繁茂した砂洲周の土砂輸送に關する基礎的研究", 土木學會水工學論文集, 第41卷, pp.837-844.
- 鷺谷いづみ, 矢原徹一, 1996, 保全生態學入門, 文一總合出版.
- 한국건설기술연구원, 1999, 하천식생에 의한 수리특성 예측모형개발.
- Auble, G.T., J.M. Friedman and M.L. Scott, 1994, "Relating riparian vegetation to present and future streamflows", Ecological Applications, Vol.4, No.3, pp.544-554.
- Coppin N.J. and I.G. Richards, 1990, Use of Vegetation in Civil Engineering, CIRIA.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft, 1987, Hydraulische Probleme Beim Naturnahen Gewasserausbau, Forschungs Bericht.
- Ikeda, S. and G. Parker, 1989, River Meandering, American Geophysical Union, Water Resources Monograph 12.
- Itakura, T. and T. Kishi, 1980, "Open channel flow with suspended sediments", Pros. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 106, HY8, 1325-1343.
- Kondolf, G.M. and P.R. Wilcock, 1996, "The flushing flow problem : Defining and evaluating objectives", Water Resources Research, Vol.32, No.8, pp.2589-2599.
- Rosgen, D., 1996, Applied River Morphology, Hilton

- Lee Silvey.
- Tsujimoto, T. and Y. Shimizu, 1994, "Flow and suspended sediment in a compound channel with vegetation", Proc. 1st Int. sym. Habitat Hydraulics, Trontoheim, Norway, pp.357-371.
- USGS-PWRI, 1995. Joint Research Group Concerning Sediment Transport And Fluvial Geomorphology : "Potential fluvial geomorphic responses to global climate change and human modifications of rivers", Proceedings of the Third PWRI-USGS Workshop on Hydrology, Water Resources and Global Climate Changes, pp.45-69.
- 리버프론트整備센터, 1994, 河道内の樹木も伐採.植樹のためのガイドライン(案), 山海堂.
- 建設省九州地方建設局, 1997, 河道内における樹林化實態調査報告書.
- 藤田光一, John A. MOODY, 宇多高明, R.H. Meade, 1995, "川幅縮小機構についての考察-パウダー川と川内川の観察結果から-", 河道の水利と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.183-190, 土木學會水利委員會河川部會.
- 藤田光一, 渡邊敏, 李參熙, 塚原隆夫, "礫床河川の植生繁茂におよぼす土砂堆積作用の重要度", 日本土木學會, 第4回 河道水利と河川環境シンポジウム論文集.
- 藤田光一, 李參熙, 渡邊敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也, 2000(계재예정), "扇狀地礫床河川における安定植生域消長の機構とSimulation", 日本土木學會 論文集.
- 山本晃一, 1988, 河道特性論, 土木研究所資料第2662號, 建設省土木研究所.
- 山本晃一, 藤田光一, 佐木克也, 有澤俊治, 1993, "河岸形成における土砂と植生の役割", 土木技術資料, 第35卷8號, pp54-60.
- 本哲郎, 北村忠紀, 1996, "植生周での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の擴大過程, 土木學會 水工學論文集", 第40卷, pp.1003-1008.