

## 개수로 내 식생구간의 흐름저항 및 흐름특성에 관한 실험적 고찰

여홍구<sup>1)</sup> · 박문형<sup>1)</sup> · 강준구<sup>1)</sup> · 김태욱<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 수자원연구부

### Experimental Study of Flow Resistance and Flow Characteristics over Flexible Vegetated Open Channel

**Yeo, Hong Koo<sup>1)</sup> · Park, Moonhyeong<sup>1)</sup> · Kang, Joon Gu<sup>1)</sup> and Kim, Taewook<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup> Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology.

#### ABSTRACT

Hydraulic engineers and scientists working on river restoration recognize the need for a deeper understanding of natural streams as a complex and dynamic system, which involves not only abiotic elements(flow, sediments) but also biotic components. From this point of view, the role played by riverine vegetation in river dynamics and flow conditions becomes essential. Hydro-mechanic interaction between flow and flexible plants covering a river bed is studied in this paper and some previous works are discussed. Measurements of turbulence and flow resistance in vegetated open channel were performed using rigid and flexible tube. Measuring detailed turbulent velocity profiles within and above submerged and flexible stems allowed to distinguish different turbulent regimes.

Some interesting relationships were obtained between the velocity field and the deflected height of the plants, such as a reduced drag coefficient in the flexible stems. Turbulent intensities and Reynolds stresses were measured showing two different regions : above and inside the vegetation domain. In flexible vegetated open channel, the maximum values of turbulent intensities and Reynolds stresses appear above the top of canopy. Method to predict a flow resistance in flexible vegetated open channel is developed by modifying an analytical model proposed by Klopstra et al. (1997). Calculated velocity profiles and roughness values correspond well with flume experiments. These confirm the applicability of the presented model for open channel with flexible vegetation. The new method will be verified in the real vegetated conditions in the near future. After these verifications, the new method should be applied for nature rehabilitation projects such as river restorations.

Key Words : *Flexible vegetation, Flow characteristics, Flow resistance.*

## I. 서 론

### 1. 연구 배경

하천 내의 식생은 유사 및 오염물질의 여과 기능 및 용존산소량의 증가, 그리고 수중생태계의 서식처 역할 등을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 하천 환경 및 생태계에 미치는 순영향에 반하여, 치수적인 측면에서 홍수위 상승을 야기한다는 부정적인 면이 지나치게 강조되어 10여 년 전까지는 하천 내 식생의 식재가 엄격하게 금지되어 왔다. 이러한 규제는 수위 상승에 미치는 하천 내 식생의 영향을 평가하는 기법이 정립되지 않고 식생의 흐름저항을 지나치게 크게 본 것(Chow, 1959)에서 기인한다. 그러나 최근 하천복원에 관한 관심이 증대되면서 하천 내 식생에 의한 흐름변화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 하천 내 식생이 흐름저항에 미치는 영향이 기존의 인식만큼 크지 않은 것으로 나타났다. 국내에서는 1998년에 과거 치수위주로 엄격하게 관리되어 온 하천 내 수목관리를 제한된 범위 내에서 허용하는 방안이 제시되었다(한국건설기술연구원, 1998). 생태계에 여러 가지 유익한 영향을 미치는 식생의 식재 위치를 적절히 선정하고 식생의 도복 등의 피해를 줄이기 위한 식생 관리에 있어 정확한 유속예측이 필요하다. 또한 식생과 흐름은 상호 연관되어 있으며 식생의 변동과 흐름의 변화, 그리고 유사와의 관계에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 Nepf와 Vivoni(2000)가 제안한 휩강성에 대한 상사를 이용하여 갈대류의 직립성 초본의 수리모형실험을 수행하였다. 유연한 식생의 모의를 위하여 polyolefin 고무튜브를 이용하였으며, 동일한 크기의 곧은 식생(아크릴봉)에 대한 실험을 병행하여 결과를 비교하였다. 유속과 수위는 각각 micro-ADV와 servo형태의 수위계를 이용하여 측정하였으며, 획득된 자료로부터 평균유속, 난류강도, 레이놀즈 응력의 수심방향 분포를 살펴보았다. 또한 본 Klopstra 등(1997)이 제안한 방법에 식생의 변위를 계산하는 절차를 추가하여 식생의 유연성을 고려할 수 있는 유속예측 절차를 제안하였다. 그리고

검증실험을 통하여 제안한 모형의 적용성을 확인하였다.

### 2. 연구동향

#### 1) 흐름특성에 관한 연구

Dunn(1993)은 음파 도플러 유속계 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 식생된 개수로에서 난류량을 측정하였고, 이를 이용하여 식생의 항력계수를 제시하였다. 실험결과 식생의 항력계수는 깊이 방향에 따라 변하는 값이며, 식생높이의 1/3 지점에서 최대값을 이루고, 항력계수의 평균값을  $1.13 \pm 15\%$ 로 제시하였다. Nepf와 Vivoni(1999)는 ADV와 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용하여 침수식생과 정수식생을 갖는 개수로 흐름에서의 난류구조와 고유구조를 연구하였다. 침수식생의 경우 식생높이 보다 낮은 구간에서는 쓸기현상이 지배적이며, 식생높이 보다 높은 구간에서는 분출현상이 지배적임을 확인하였다. 또한 정수식생의 경우 쓸기현상과 분출현상이 전체 수심에 걸쳐 거의 평형 상태에 있는 것으로 나타났다. Nepf와 Vivoni(2000)는 ADV와 LDV를 이용하여 침수식생 및 정수식생 조건의 개수로 흐름의 난류구조를 연구하였다. 레이놀즈 응력의 분포형으로부터 침투수심(penetration depth)을 정의하였다. 침투수심 위와 아래 구간을 각각 연직방향 교환 영역(vertical exchange zone)과 흐름방향 교환 영역(longitudinal exchange zone)으로 구분하여 각 영역의 흐름특성을 분석하였다. Ghisalberti와 Nepf(2002)는 식생의 항력에 의한 단순한 경계층 흐름이 아닌 혼합층 이론과 유사하다는 사실을 실험을 통하여 구명하였다. 최성욱 등(2003)은 식생된 개수로 흐름의 평균유속분포가 Ghisalberti와 Nepf(2002)가 제안한 바와 같이 hyperbolic tangent 함수로 근사됨을 확인하였으며 식생층과 수면층에서 각각 분출현상과 쓸기현상이 현저함을 확인하였다.

이러한 연구들은 주로 곧은 식생이나 도복 상태(prone)의 식생 조건에 관한 연구로서 식생의 유연성이 개수로 흐름에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 그러나 최근 자연형 하천정비에서 빈번하게 이용되는 갈대 등

의 직립성 초본의 경우 식생이 진동하며 흐름과 상호 작용하게 되는데, 이러한 분야에 대한 연구는 상대적으로 미비하다. Wilson 등(2003)은 미역류를 모의한 유연한 식생을 이용하여 엽상구조가 흐름특성에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 분석하였다. 이들은 엽상구조를 갖는 식생조건에서 현저하게 유속이 감소하는 것을 확인하였다.

2) 흐름저항에 관한 연구

식생이 식재된 하천 내의 흐름저항을 평가하는 기법은 크게 수심방향의 유속분포를 결정한 후 이를 수심방향으로 적분하여 공식을 유도하는 방법과 평균유속을 직접 계산하는 방법으로 구분할 수 있다. 수심방향의 유속분포를 결정한 후 유도하는 방법은 역학적 법칙에 근거한 해석적 방법이 많으며, 평균유속을 직접 계산하는 방법은 회귀분석 등을 이용한 경험적 방법이 주종을 이루고 있다. 전자의 경우에는 Kutija와 Hong(1996), Tsujimoto 등(1996), 그리고 Klopstra 등(1997)의 연구가 있으며 후자의 경우에는 Kouwen과 Li(1980), Temple(1999) 등의 연구가 있다. 수심방향의 유속분포를 해석하는 연구는 흐름저항 예측 뿐 만 아니라 레이놀즈 응력 분포 및 와점성계수 분포의 예측에도 적용할 수 있다. Kutija와 Hong(1996)은  $k$ - $\epsilon$  방정식을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 해석하였으며, 식생 변형 해석을 위하여 외팔보의 미소변형이론에 근거하였는데, 이들이 적용한 방정식은 식생의 수심방향 변위를 계산할 수 없다. 이를 보완하기 위하여 식생의 유효길이 개념을 도입하였다. Tsujimoto 등(1996)은  $k$ - $\epsilon$  방정식을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 해석하였으며, 흐름에 의해 발생하는 식생의 변형을 외팔보 변위에 대한 정확해를 이용하여 수심방향 변형까지 계산하였다. Klopstra 등(1997)은 식생된 개수로흐름을 수심방향에 대하여 식생층과 수면층으로 구분하였으며, 각각에 대하여 운동량방정식과 거친 바닥 조건의 대수법칙으로부터 해석해를 유도하였다. 그러나 이들의 연구에서는 식생의 변형을 고려하지 않았다.

II. 유속분포 산정 모형의 개요

1. 곧은 식생의 유속분포 계산

Klopstra 등(1997)은 침수식생의 수심방향 유속분포와 흐름저항을 산정하는 모형을 제안하였다. 이들은 수심방향에 대하여 식생층과 수면층으로 구분하고, 두 층의 접촉면에서 적절한 경계조건을 부여하여 수심방향의 유속분포와 Chezy 계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 식생층과 수면층 각각에 대해서 운동량방정식과 Prandtl의 혼합 길이 이론을 적용하였다.

식생층에 적용한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = F_D(z) - \rho g S_e \tag{1}$$

여기서  $\tau$ 는 전단력,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $z$ 는 수심방향,  $g$ 는 중력가속도이며,  $S_e$ 는 수면경사,  $F_D$ 는 항력으로서 다음과 같이 정의된다.

$$F_D(z) = \frac{m d C_D u(z)^2}{2} \tag{2}$$

여기서  $m$ 은 단위면적당 식생의 줄기수,  $d$ 는 식생 줄기의 직경,  $C_D$ 는 항력계수, 그리고  $u(z)$ 는  $z$ 에서의 유속이다. 식 (1)에서 식생층의 전단력은 다음과 같은 Boussinesq 형태의 식을 이용하였다.

$$\tau = \rho a u(z) \frac{\partial u(z)}{\partial z} \tag{3}$$

여기서  $a$ 는 난류의 특성길이,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $u(z)$ 는  $z$ 에서의 유속이다. 위의 식에서  $a u(z)$ 는 와점성을 의미하며, 난류특성길이  $a$ 는 경험상수로써  $z$ 의 종속변수로 가정한다. 식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하여 해석해를 유도하면 다음과 같다.

$$u(z) = \sqrt{C_1 e^{-\sqrt{2A}z} + C_2 e^{\sqrt{2A}z} + u_{\text{d}}^2} \tag{4}$$

( $0 < z < k$ )

여기서  $z$ 는 바닥으로부터의 거리,  $k$ 는 식생 길이,  $A = (m d C_D)/(2a)$ ,  $u_{\text{d}} = \sqrt{(2g S_e)/(C_D m d)}$ 는 식생층의 단면평균유속,  $m$ 은 단위면적당 식생의

개체수,  $d$ 는 식생의 줄기 직경,  $C_D$ 는 항력계수, 그리고  $C_1 (= -2gS_e(h-k)[\alpha\sqrt{2A}(e^{k\sqrt{2A}} + e^{-k\sqrt{2A}})]^{-1})$  과  $C_2 (= -C_1)$ 는 적분상수이다.

Klopstra 등은 과거에 수행된 실험 자료들을 이용하여 식 (3)의  $\alpha$ 에 대한 아래의 경험식을 제안하였다.

$$\alpha = 0.0793k \ln \frac{h}{k} - 0.0009 \quad (5)$$

( $\alpha > 0.001$ )

여기서  $h$ 는 수심이다. Meijer와 van Velzen (1999)은 모의식생 및 실제 식생을 이용하여 Klopstra 등이 제안한 모형의 적용성을 확인하였다. 또한 과거에 수행되었던 실험적 연구 자료를 이용하여 Klopstra 등이 제안한 방법에서 유일한 경험적 결정 매개변수인 길이축척의 회귀분석을 실시하여 아래의 식을 제안하였다.

$$\alpha = 0.144\sqrt{hk} \quad (6)$$

수면층의 유속분포는 식생층 정부( $k$ )의 조금 아래( $h_s$ )에 가상의 바닥경계를 가정하여 다음과 같은 대수법칙으로 나타낼 수 있다.

$$u(z) = \frac{1}{\kappa} u_{*i} \ln \left[ \frac{z - (k - h_s)}{z_0} \right] \quad (7)$$

( $k < z < h$ )

여기서  $x$ 는 von Karman 상수,  $h_s$ 는 식생층의 정부와 가상의 바닥경계 사이의 거리,  $z_0$ 는 수면층부의 바닥조고에 대한 길이 축척, 그리고  $u_{*i} (= \sqrt{g(h-k+h_s)S_e})$ 는 가상의 바닥경계에서의 전단 속도이다.  $h_s$ 와  $z_0$ 는 식생층과 수면층의 경계( $z=k$ )에서 식생층과 수면층에 대한 식으로 산정된 유속과 속도경사가 같아야 한다는 조건으로부터 유도할 수 있으며, 다음 식들과 같다.

$$h_s = \frac{1 + \sqrt{1 + 4\varepsilon^2 \kappa^2 (h-k)/g}}{2\varepsilon^2 \kappa^2} \quad (8)$$

$$z_0 = h_s e^{-F} \quad (9)$$

여기서  $\varepsilon = \sqrt{2A} C_3 e^{k\sqrt{2A}} / 2\sqrt{C_3 e^{k\sqrt{2A}} + u_{*0}^2}$ ,

$$F = \kappa \sqrt{C_3 e^{k\sqrt{2A}} + u_{*0}^2} / \sqrt{g(h-k+h_s)},$$

$C_3 = C_2/S_e$ , 그리고  $u_{*0} = u_{*0}/\sqrt{S_e}$ 이다.

2. 식생의 변형계산

본 연구에서 식생을 외팔보로 가정하여 식생의 변형을 계산하였다. 외팔보의 변위에 대한 정확해는 다음 식과 같다.

$$\frac{M}{EI} = \left( \frac{d^2 \delta}{dz^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{d\delta}{dz} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (10)$$

여기서  $M$ 은 임의 지점( $z$ )에 작용하는 모멘트,  $EI$ 는 식생의 휨강성으로서 탄성율( $E$ )과 단면의 관성모멘트( $I$ : moment of inertia)의 곱, 그리고  $\delta$ 는 식생의 흐름방향 변위로서 각 기호의 정의는 그림 1에 제시하였다.

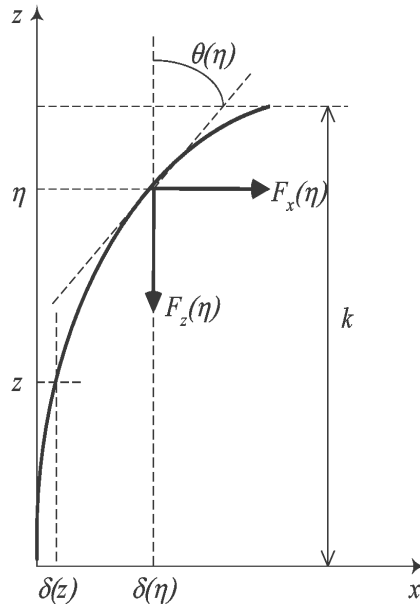


그림 1. 식생 변형 계산의 개념도.

식생구간의 유속이 주어지면 식생의 변위는 식 (10)을 해석하여 산정할 수 있다. 본 연구에서는 위의 식을 이산화 한 후 Runge-Kutta방법을 이용하여 계산하였다. 이 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{d\delta}{dz} = \delta = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (11)$$

식 (10)에 의하여 계산된 값은 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$k_0 = \int_0^k \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta}{dz}\right)^2} dz \quad (12)$$

여기서  $k_0$ 는 식생의 휘어지기 전의 길이이다. 식 (12)를 만족할 때까지 식 (11)을 시행착오법을 이용하여 반복 계산한다. Klopstra 등(1997)이 제안한 해석해를 이용하여 산정된 유속과 식 (11)에서 산정된 식생의 변위는 서로의 해에 영향을 준다. 본 연구에서는 시행착오법을 이용하여 계산된 유속이 일정한 값으로 수렴할 때까지 반복 계산하였다.

### III. 모의 식생을 이용한 실험

#### 1. 실험장치 및 실험조건

실험은 폭 1.5m, 높이 1.2m, 길이 14m의 가변 경사수로에서 실시하였다. 가변 경사수로의 바닥은 철재이며, 좌우 측벽은 강화유리로 구

성되어 있다. 개수로실험장치의 제원은 그림 2와 같다.

본 연구에서는 갈대와 같은 직립성 초본류를 대상으로 수심의 영향을 받는 침수 조건에 대하여 흐름저항 및 흐름특성을 고찰하였다. 모형식생의 크기는 개수로실험장치의 제원을 고려하여 결정하였다. 개수로실험장치의 높이가 1.2m이므로, 수심의 영향을 받는 침수식생조건을 구현하기 위해서 식생의 길이를 0.1~0.2m 정도로 선정하였다. 실제 직립성 초본류의 줄기직경과 길이의 비가 약  $10^{-2}$  정도이므로 모형식생의 줄기직경은 1~2mm로 결정하였다. 구리선, 아크릴 봉, 비닐튜브, polyolefin 수축튜브 등의 다양한 재료를 이용하여 기초실험을 실시하였으며, 휘어지는 정도를 육안 관찰하여 유연한 식생의 모의대상으로 각각 polyolefin 수축튜브를 선정하였다. 그리고 식생의 요동이 흐름에 미치는 영향을 연구하기 위하여 휘어지지 않는 곧은 식생에 대한 실험을 함께 수행하였는데 모의대상으로 아크릴 봉을 선정하였다. 식생의 유연한 정도를 평가하는 척도로서 휨탄성계수( $E$ )와 관성모멘트( $I$ )의 곱으로 표현되는 휨강성을 사용하고 있다. Nepf와 Vivoni(2000)는 식생의 거동을 분류하기 위하

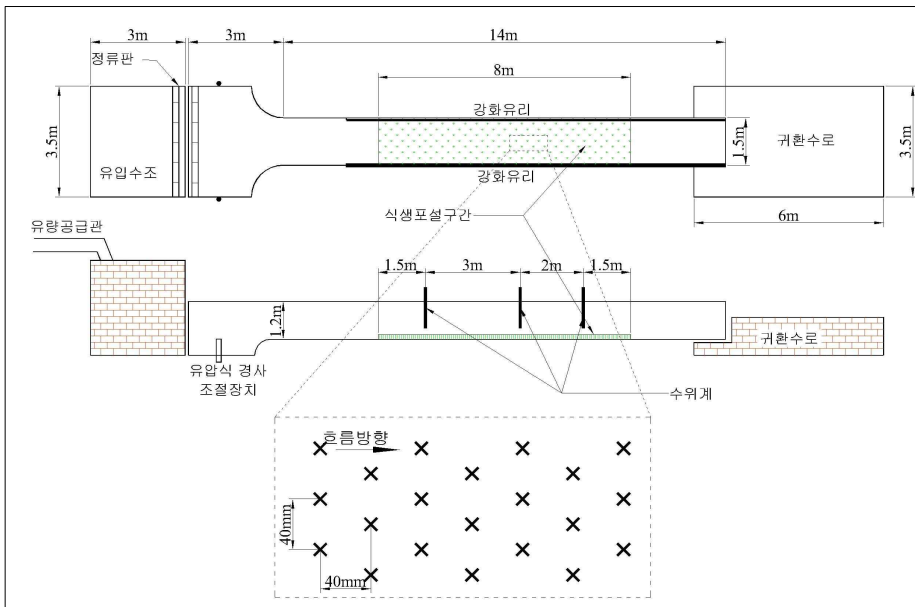


그림 2. 개수로실험장치 및 식생의 식재위치.

여 다음 식과 같은 상사조건을 제시하였다.

$$F = \frac{\text{drag}}{\text{rigidity}} = \frac{\rho U^2 k^3 d}{EI} \quad (13)$$

여기서  $U$ 은 식생 정부에서의 유속이다.

Kouwen과 Li(1980)의 실험 자료에 의하면 실제 식생은  $0.1 < F < 2000$ 의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다.  $F$ 의 값이 큰 경우는 도복상태를 의미하며, 작은 경우에는 직립상태임을 의미한다. 문헌조사를 통하여 잔디류, 직립성 초본, 그리고 목본의 휨강성을 조사하여 표 1에 제시하였다. 표 1에서 제시한 값과 하천의 유속이  $10^0$ 차원을 갖는다고 가정하여 상사조건을 계산하면,  $F$ 는 잔디류, 갈대, 버들류에 대하여 각각  $10^3$ ,  $10^1$ , 그리고  $10^{-1}$  정도의 차원을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 휨강성 시험을 통하여 선정된 모형식생의 휨강성을 계산하였다. 모형식생과 동일한 재료를  $25\text{mm} \times 120\text{mm}$ 의 크기로 재단한 후 1~4개 층을 적층하여 재하시험을 실시하였다. 재하시험을 통하여 산정된 총 10개 시편의 휨탄성계수는 평균과 표준편차가 각각  $3,634,773 \text{ N/m}^2$ 와  $346,963 \text{ N/m}^2$ 로 나타났으며, 변동률은 약 9% 정도로 산정되었다. 개수로실험장치의 제원을 감안할 때 실험의 유속은 약  $0.3 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 의 범위를 가질 것으로 예상된다. 이 값과 산정된 polyolefin 수축튜브의 휨탄성계수를 식 (13)을 이용하여 상사조건( $F$ )을 계산하면  $10^1$  정도의 차원을 갖는 것으로 나타났으며, 실제 하천의 존재하는 갈대류의 상사조건과 비슷한 차원을 가지는 것을 확인할 수 있다.

길이  $170\text{mm}$ , 외경  $1.5\text{mm}$ 의 아크릴 봉과 polyolefin 고무튜브를 이용하여 각각 끈은 식생

과 유연한 식생을 구현한 후, 그림 1에 나타난 것과 같이 단위면적당 625개의 줄기를 엇갈리게 식재하였다. 이 때 식생의 밀도는  $1.25 \text{ m}^{-1}$ 이다. 모의 식생을 식재한 개수로 전경은 그림 3에 제시하였다.

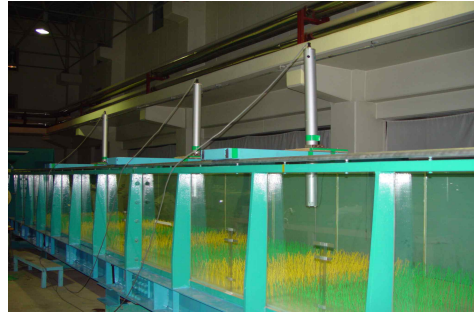


그림 3. 식생이 포설된 개수로실험장치.

실험조건은 표 2와 같다. 좌표축은 주흐름방향, 횡방향 그리고 하상의 수직방향을 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축으로 설정하였다. 상류측 유입유량은 삼각 예연위어에서 유통되는 수심을 포인트게이지를 이용하여 관측하였다. 수심의 관측은 그림 1에 제시된 바와 같이 식생이 식재된 구간의 상하류  $1.5\text{m}$  내외 중앙에서 servo형태의 수위계(SWT-100; Kenck사 제품)를 이용하여 실험 전 과정에서 관측하였으며 식생구간 각  $1\text{m}$  마다 눈금자를 부착하여 관측하였다. 유속측정은 Sontek사의 3차원  $16\text{MHz}$  micro-ADV를 이용하였다.  $16\text{MHz}$  micro-ADV는 1초당 50개의 자료 획득이 가능하다. 본 실험에서는 100초간 측정하여 총 5,000개의 자료군을 만들었다. 식생구간내의 흐름은 공간적으로 비균일하므로 횡단방향에 대하여 3점을 측정하여 공간평균을 취하였다.

표 1. 실제 식생의 종류별 휨강성.

	탄성계수 범위( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )	줄기직경(mm)	자 료 출 처
잔 디 류	0.00005 ~ 0.001	띠 형태	Kouwen과 Li(1980)
갈 대 류	0.43 ~ 1.28	7 ~ 12	Tsujimoto 등(1996); 건설교통부(2002)
버 들 류	0.18 ~ 40.59	9.5 ~ 25.4	Freeman 등(2000)

표 2. 실험조건.

유연한 식생( $EI=4.81 \times 10^{-7}$ )						곧은 식생( $EI=\infty$ )					
실험번호	$Q(m^3/s)$	$h(m)$	$U_0(m/s)$	$Fr$	$Re$	실험번호	$Q(m^3/s)$	$h(m)$	$U_0(m/s)$	$Fr$	$Re$
F-01-01	0.15	0.38	0.26	0.14	100,000	R-01-01	0.15	0.45	0.22	0.11	100,000
F-01-02	0.12	0.34	0.24	0.13	80,000	R-01-02	0.12	0.40	0.20	0.10	80,000
F-01-03	0.09	0.32	0.19	0.11	60,000	R-01-03	0.09	0.37	0.16	0.09	60,000
F-01-04	0.06	0.24	0.17	0.11	40,000	R-01-04	0.06	0.29	0.14	0.08	40,000
F-01-05	0.03	0.18	0.11	0.08	20,000	R-01-05	0.03	0.22	0.09	0.06	20,000
F-02-01*	0.15	0.32	0.31	0.18	100,000	R-02-01*	0.15	0.38	0.26	0.14	100,000
F-02-02	0.12	0.29	0.28	0.16	80,000	R-02-02	0.12	0.34	0.24	0.13	80,000
F-02-03	0.09	0.25	0.24	0.15	60,000	R-02-03	0.09	0.30	0.20	0.12	60,000
F-02-04	0.06	0.21	0.19	0.13	40,000	R-02-04	0.06	0.25	0.16	0.10	40,000
F-03-01	0.15	0.23	0.43	0.29	100,000	R-03-01	0.15	0.26	0.38	0.24	100,000
F-03-02	0.12	0.21	0.38	0.27	80,000	R-03-02	0.12	0.24	0.33	0.22	80,000
F-03-03	0.09	0.19	0.32	0.23	60,000	R-03-03	0.09	0.22	0.27	0.19	60,000
F-03-04	0.06	0.16	0.25	0.20	40,000	R-03-04	0.06	0.18	0.22	0.17	40,000

\*ADV를 이용한 유속분포 측정

2. 모의식생 실험 결과

1) 흐름특성

그림 4는 곧은 식생과 유연한 식생 조건에서 측정된 평균유속의 변화를 바닥으로부터의 거리에 따라 도시한 것이다. 수심의 변화에 따른 유속의 변화를 관찰하면 바닥으로부터 약5cm까지

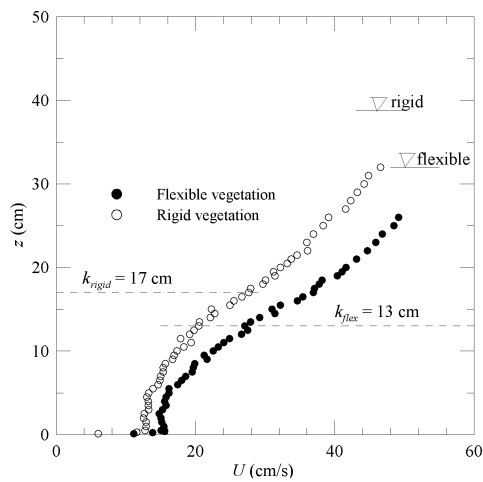


그림 4. 유속분포 비교.

는 거의 균일한 유속분포를 나타내며, 식생높이 부근에서 유속이 급격하게 증가하고 있다. 이후 수면층에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유

사한 대수분포의 형태를 보이고 있다. 식생높이 부근에서는 식생의 영향으로 인하여 마찰속도가 증가하며 마찰속도에 비례하는 속도경사 역시 증가하는 것으로 알려져 있다(강형식·최성욱, 2000). 곧은 식생 조건과 유연한 식생 조건을 비교하면, 바닥으로부터 5cm까지는 거의 동일한 속도경사를 보이며, 이후부터 유연한 식생 조건에서의 유속경사가 곧은 식생 조건보다 크게 나타나고 있다.

대수분포의 형태를 나타내는 구간의 유속분포는 다음의 식과 같은 대수법칙으로 표현할 수 있다.

$$\frac{U}{u_{*d}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (14)$$

여기서  $\kappa$ 는 von Karman상수(=0.4),  $d_0$ 는 기준면 변위(zero-plane displacement),  $u_{*d}$ 는  $z=d_0$ 에서의 전단속도,  $z_0$ 는 하상의 조도를 나타내는 계수이다. 식 (14)에서 결정하여야 할 매개변수는  $d_0$ ,  $u_{*d}$ ,  $z_0$ 이다. 기준면 변위는 운동량이 흡수되는 지점으로서 Jackson(1981)이 제시한 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$d_0 = \left[ \int_0^h \frac{d\overline{uw}}{dz} dz \right] \left[ \int_0^h \frac{d\overline{uw}}{dz} dz \right]^{-1} \quad (15)$$

식 (14)는  $z=d_0$ 를 바닥 경계로 하여  $d_0$  이상의 구간에 대하여 적용 가능하다. 이 경우 흐름의 유효수심은  $(h-d_0)$ 가 되며, 바닥경계에서의 전단속도는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$u_{*d} = \sqrt{gS_0(h-d_0)} \quad (16)$$

여기서  $S_0$ 는 바닥경사이다.

기준면 변위에서의 조고를 나타내는 계수  $z_0$ 는 식 (14)에 의하여 계산되어지는 유속분포와 측정된 유속분포를 비교하여 결정한다. 대수법칙을 적용한 결과는 그림 5(a), (b)와 같다. 그림에서 수면에서의 유속분포는 식 (14)에 제시된 대수법칙을 비교적 잘 따르는 것으로 나타났다.

식 (15), (16)과 그림 5를 이용하여 결정된 매개변수( $d_0, u_{*d}, z_0$ )를 표 3에 정리하였다. 식 (14)에서 제시된 매개변수들은 실제 바닥을 가상의 바닥으로 환산하여 식생의 항력에 의한 영향을 반영하기 위한 값들이다. 표에서  $d_0, u_{*d}, z_0$  모두 곧은 식생조건일 때 크게 산정되었다. 기준면 변위 이하의 구간은 운동량이 존재하지 않는다고 가정하므로 사수역 개념으로 생각할 수 있다. 즉 곧은 식생조건일 때 기준면 변위가 크다는 것은 식생

에 의한 항력에 의하여 흡수되는 운동량이 더 많다는 것을 의미한다. 기준면 변위에서의 조고와 전단속도를 의미하는  $z_0$ 와  $u_{*d}$ 는 가상의 바닥 조건에 대한 것이므로 실제 바닥조건을 의미하는 것은 아니다. 그러나 이러한 값들에는 식생의 항력의 영향이 내재되어 있으므로, 이 값들이 크다는 것은 곧은 식생조건일 때 항력에 의한 흐름저항이 더 크다는 것을 의미한다고 추론할 수 있다. 표 3. 대수법칙의 매개변수.

식생조건	$d_0$ (cm)	$z_0$ (cm)	$u_{*d}$ (cm/s)
곧은 식생	9.16	0.84	5.32
유연한 식생	8.60	0.33	4.79

그림 6은  $x, y, z$ 방향 난류강도( $\overline{u'}, \overline{v'}, \overline{w'}$ )의 변화를 나타낸 것이다. 곧은 식생조건과 유연한 식생조건 모두 기준면 변위 아래 부분에서  $w'$ 은 작은 값을 가지며,  $\overline{u'}$ 와  $\overline{v'}$ 은 비슷한 값을 나타내고 있다. 이후 구간에서는  $\overline{u'}$ 가 가장 큰 값을 가지며  $\overline{v'}$ 는  $\overline{u'}$ 의 약 80%,  $\overline{w'}$ 는  $\overline{u'}$ 의 60% 정도의 크기를 갖는 것으로 나타났는데, 이러한 성분별 난류강도의 비는 일반적인 개수로 흐름에서의 비와 유사한 값이다. 일반적인 개수로 흐름에서  $\overline{v'}, \overline{w'}$ 는 전수심에 대하여 각각  $\overline{u'}$ 것으로 알려져 있다(Nezu와 Nakagawa, 1993). 식생된 개수로 흐름의 식생층 하부에서  $x$ 와  $y$ 방향

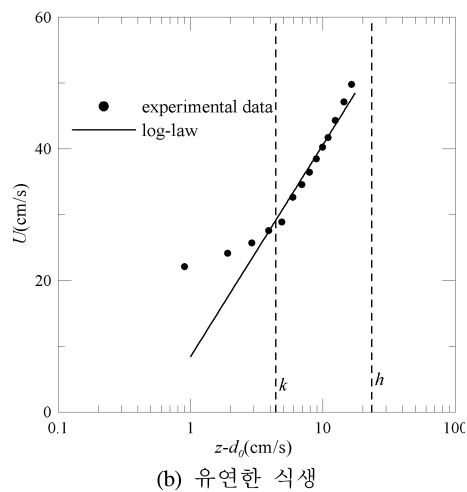
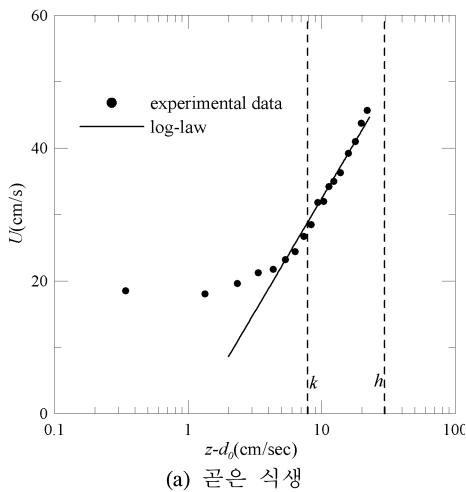


그림 5. 대수법칙.



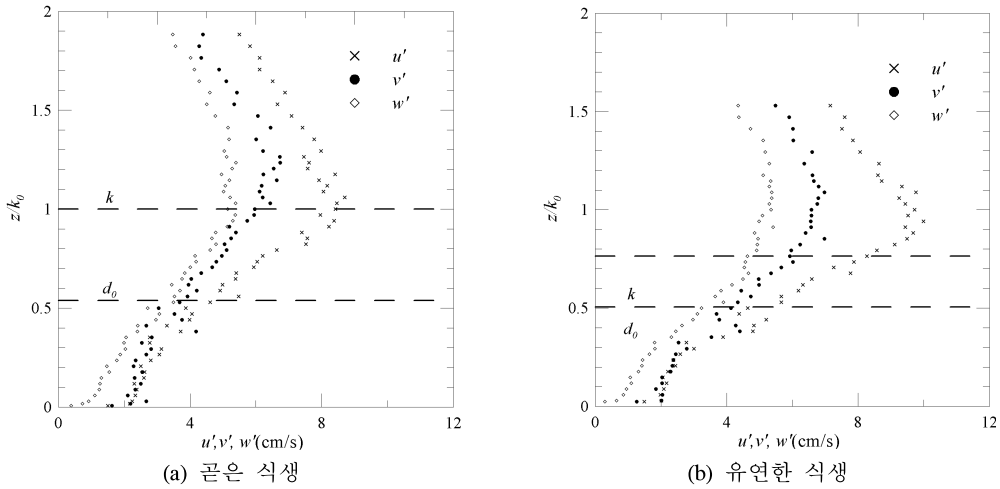


그림 6. 난류 강도 분포.

의 난류강도는 등방성을 나타내며  $z$ 방향의 난류 강도가 작은 값을 나타내는 현상은 식생구간 항력의 영향으로 판단된다. 곧은 식생조건인 흐름에서는 식생 높이에서 난류강도의 최대값이 발생하였으나, 유연한 식생은 변형된 후의 식생높이보다 높은 곳에서 최대값이 발생하였다. 최대값이 발생하는 구간은 대략 초기 식생높이( $k_0$ )부근인 것으로 확인 되었다. 유연한 식생조건 흐름에서 식생높이 보다 높은 곳에서 발생하는 이유는 식생의 진동에 의한 영향으로 보인다.

그림 7은 수심방향의 레이놀즈응력 변화를 도

시한 것이다. 그림에서 식생층의 정부 부근에서 최대값을 나타내며, 바닥과 수면으로 진행할수록 거의 선형적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 최대값이 발생하는 위치는 난류강도의 최대값이 발생하는 위치와 유사하게 곧은 식생조건과 유연한 식생조건에 대하여 각각 식생높이와 변형 전 식생높이 부근에서 형성되었다. 바닥부근의 레이놀즈응력은  $0.2\text{cm}^2/\text{s}^2$  정도의 일정한 값을 나타내고 있다. Nepf와 Vivoni(2000)는 식생영역 내에서 레이놀즈 응력이 최대값의 10%에 해당하는 지점을 침투수심( $k_p$ )라고 정의

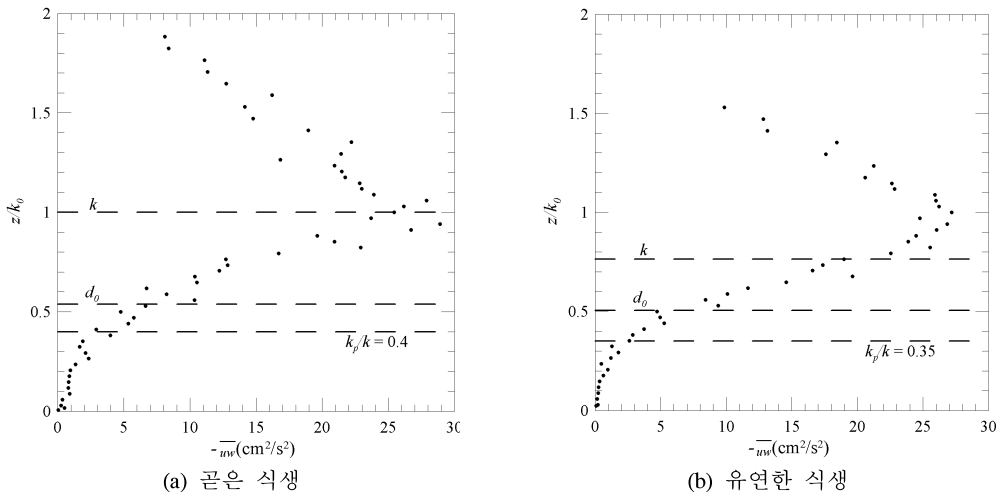


그림 7. 레이놀즈 응력 분포 비교.

하였으며, 침투수심 위 ( $z > k_p$ )와 아래 ( $z < k_p$ ) 구간을 각각 연직방향 교환 영역과 흐름방향 교환 영역으로 구분하였다. 흐름방향 교환 영역은 레이놀즈 응력이 거의 0에 가까운 값을 나타내는 구간으로서 난류에 의한 운동량의 전달을 무시할 수 있으며, 속도경사가 거의 없는 정수식생 조건에서의 흐름과 유사한 특징을 나타내는 것으로 알려져 있다.

2) 흐름저항 산정모형의 검증

그림 8은 측정된 유속분포를 Klopstra 등(1997)이 제안한 식과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 기호는 측정된 자료를 나타내며, 실선은

Klopstra 등(1997)이 제안한 식생이 존재하는 개수로 흐름의 유속분포식으로부터 계산된 결과이다. 실험을 통하여 측정된 유속의 변화를 살펴보면 바닥으로부터 식생높이의 약 1/2까지는 거의 균일한 유속분포를 나타내며, 식생높이 부근에서 유속이 급격하게 증가하고 있다. 식생높이 부근에서는 식생의 영향으로 인하여 마찰속도가 증가하며 마찰속도에 비례하는 속도경사 역시 증가하는 것으로 알려져 있다(강형식 · 최성욱, 2000). 이후 수면층에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유사한 대수분포의 형태를 보이고 있다. 그리고 유연한 식생 조건에서 유속 및 속도경사가 곧은 식생 조건에 비하여 크게 나타남을 알 수 있다.

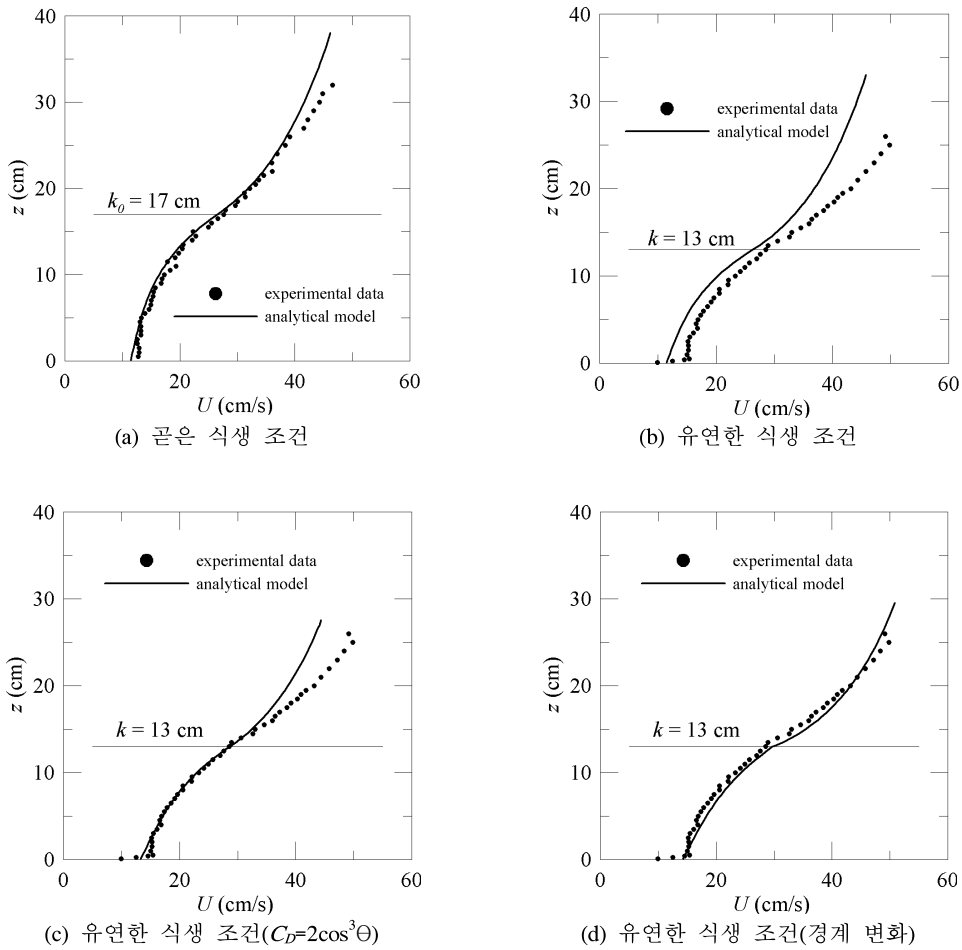


그림 8. 계산된 유속분포와 실험결과의 비교.

해석해의 결과와 비교하여 보면 곧은 식생의 경우(그림 8a)에는 Klopstra 등(1997)이 제안한 식으로부터 계산된 값과 측정된 값이 거의 일치하고 있으며, 유연한 식생조건(그림 8b)에서는 계산된 식생높이가 12.8cm로서 측정값인 13cm와 비교적 일치하였으나 계산된 결과가 유속 분포를 과소산정하고 있음을 확인할 수 있다. 식생층에서의 유속은 약 2cm/s 내외의 비교적 균일한 편차를 갖는 것으로 나타났으며, 수면층에서는 속도경사의 차이에 의하여 수면에 접근할수록 유속의 차이가 커지는 경향을 나타내고 있다. 유연한 식생은 흐름에 대하여 저항을 작게 하는 방향으로 변형하며, 항력계수가 직립상태일 때보다 작을 것으로 예상할 수 있다. 그러나 그림 8(b)에 실선으로 제시된 결과는 곧은 식생의 경우와 동일한 항력계수를 적용하였기 때문에 측정된 값에 비하여 계산된 값이 과소산정된 것으로 판단된다. 즉 유연한 식생의 정확한 흐름저항을 산정하기 위해서 식생의 변형에 따른 항력계수의 변화에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 보인다. 수면층에서는 계산된 결과의 속도경사가 측정된 속도경사 보다 작으며, 수면으로 갈수록 계산된 유속과 실험값의 차이가 크게 나타나고 있다. 수면층 유속을 산정하기 위한 식 (7)에서 속도경사는  $u_r$ 에 비례하는 것을 알

수 있는데, 그림 6과 7에서 유연한 식생조건 흐름의 난류특성이 곧은 식생조건과 최대값의 발생위치가 거의 동일함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 전술한 바와 같이 식생 요동의 영향인 것으로 판단된다. 즉 유연한 식생의 경우 식생의 영향을 받는 흐름구간이 식생의 정부뿐만 아니라 수면층까지 확장되는 경향이 있다. 그러나 Klopstra 등의 방법에서는  $u_r$ 를 산정함에 있어 식생 요동의 영향을 감안하지 못하므로 유연한 식생이 존재하는 개수로 흐름에서의  $u_r$ 를 과소 산정할 가능성이 있으며, 이 영향에 의하여 실험값과 계산값의 차이가 발생한 것으로 추정할 수 있다.

그림 8(c)는 변형된 Klopstra 방법에 Saowapon과 Kouwen(1989)가 제안한 다음의 항력계수를 적용하여 유속분포를 예측한 결과이다.

$$C_D = 2.0 \cos^3 \theta \quad (17)$$

여기서  $\theta$ 는 바닥과 유연한 식생이 이루는 각이다. 그림에서 식생층의 계산된 유속분포는 실험값과 거의 일치하며, 수면층에서는 속도경사를 작게 산정하여 계산된 결과가 작은 값을 갖는 것으로 나타났다.

그림 8(d)는 식생층과 수면층의 경계를 초기 식생 높이로 설정하여 예측한 결과이다. 계산된

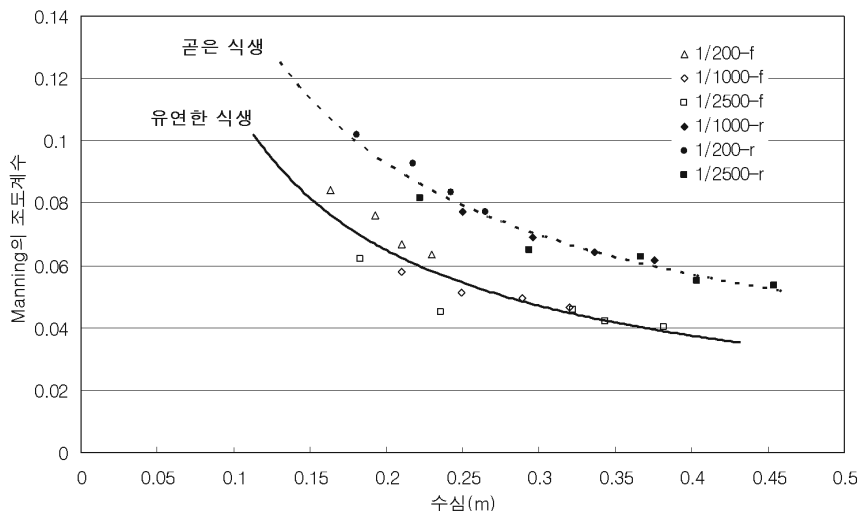


그림 9. 실험조건별 조도계수 변화.

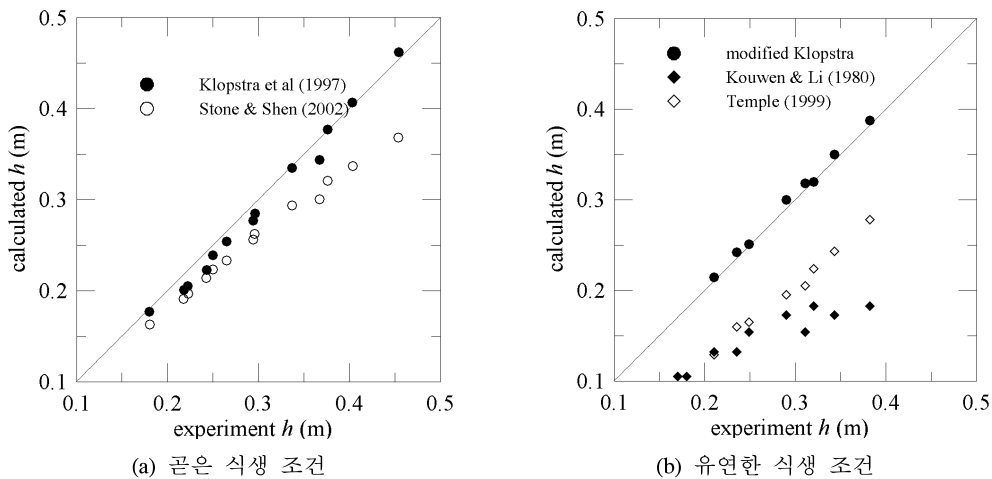


그림 10. 해석해를 이용한 수위예측.

결과가 비교적 실험값과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

등류수심 측정을 통한 조도계수 산정 결과는 그림 9와 같다. 기호와 선은 각각 실험결과와 지수함수를 이용한 회귀분석 결과이다. 그림에서 조도계수는 수심에 반비례하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 유연한 식생조건에서의 조도계수가 곧은 식생조건에서의 조도계수보다 0.02정도 작게 산정되었으며, 식생의 변형이 흐름저항을 감소시키는 방향으로 발생한다는 Freeman 등(2000)의 연구를 확인할 수 있었다.

그림 10(a)는 곧은 식생조건에 대한 실험결과에 대하여 Stone과 Shen(2002)의 방법과 Klopstra 등(1997)의 방법을 이용한 결과를 비교하였다. Stone과 Shen(2002)이 제안한 방법은 전반적으로 수위를 작게 예측하는 경향이 있었으며, Klopstra 등(1997)이 제안한 방법은 저수위에서는 다소 작게 산정하였으나 전반적으로 실험값과 일치하는 경향이 있다. Klopstra 등(1997)과 Stone과 Shen(2002)의 방법은 각각 4.08%와 13.27%의 오차를 나타내었다. 이러한 분석을 통하여 Klopstra 등(1997)이 제안한 방법이 곧은 식생조건에 대하여 양호하게 수위를 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 10(b)는 유연한 식생조건에 대한 실험결과에 대하여 변형된 Klopstra 방법과, Kouwen과

Li의 방법(1980), 그리고 Temple의 방법(1990)으로 산정된 결과를 비교한 것이다. 그림에서 변형된 Klopstra의 기법이 실험값과 비교적 근사하게 나타내고 있으며, 이외의 기법들은 수위를 지나치게 낮게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 변형된 Klopstra 방법, Kouwen과 Li의 방법, 그리고 Temple의 방법들의 오차는 각각 0.73%, 43.4%, 59.4%로서 변형된 Klopstra 방법의 정도가 우수한 것으로 나타났다. 그림 10(b)만으로 볼 때 Kouwen과 Li의 방법과 Temple의 방법은 적용하는데 주의를 기울일 필요가 있을 것으로 보인다. 그러나 Kouwen과 Li의 방법과 Temple의 방법은 실제 식생을 대상으로 한 예측기법으로서 본 연구에서 수행한 실험의 조건을 완전하게 반영할 수 있는 방법이 아니므로 본 실험결과와의 비교만으로 이들 기법의 정도가 떨어진다고 단정하기에는 무리가 있을 것으로 보인다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 개수로 내에 식재된 식생의 유연성이 흐름에 미치는 영향과 흐름저항 특성을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위하여 동일한 크기를 가지며 휨강성이 다른 두 가지의 모의 식생을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 구현하였으며, 유속과 수위를 각각 micro-ADV와 servo형

태의 수위계를 이용하여 측정하였다.

동일한 레이놀즈수에 대하여 식생의 유연성 변화에 따른 평균유속, 난류강도, 그리고 레이놀즈 응력을 분석하였다. 평균유속의 경우 유연한 식생 조건의 개수로 흐름에서 유속이 크게 나타났다. 이는 식생의 변형이 흐름저항을 완화시키는 방향으로 발달하기 때문이 것으로 판단된다. 유연한 식생 조건에서는 난류강도와 레이놀즈 응력분포 모두 굴절된 식생 높이( $k$ ) 보다 높은 곳에서 최대값이 형성되었다. 이것은 식생의 진동에 의한 결과로 보인다.

그리고 Klopstra 등(1997)이 제안한 해석해와 외팔보이론을 적용하여 유연한 식생이 식재된 침수조건을 갖는 개수로흐름의 유속분포예측모형을 개발하였으며, 수리실험을 통하여 검증하였다. 전 구간에 걸쳐 본 연구에서 제안한 모형이 비교적 정확한 유속분포를 예측함을 확인할 수 있었다. 다양한 경사와 유량 조건에 대하여 등류수심을 측정하여 본 연구에서 제안한 모형의 적용성을 기존의 모형들과 함께 비교하여 보았다. 유연한 식생조건에 대하여 Kouwen과 Li의 방법과 Temple의 방법들은 수위를 작게 산정하였으며, 변형된 Klopstra 기법이 비교적 정확하게 수위를 예측하였다. 본 연구는 식생구간의 흐름특성을 실제 식생이 아닌 모의 식생에 대하여 실험을 통하여 구명하였다. 향후 실제 식생에 대한 실험이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 실제 식생에 대한 적용성이 확인된 후에는 현재 하천정비의 기본방향인 자연형 하천정비의 설계 및 계획 등에 있어 식생의 식재 위치와 간격 그리고 수종 등을 적절히 선정하는 기준을 제시할 수 있을 것이다. 그리고 식생구간의 정확한 유속예측을 통하여 식생 도복 등의 피해를 줄이기 위한 식생 관리에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

## 인 용 문 헌

강형식 · 최성욱. 2000. 식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석. 한국수자원학회논문집 33(5) : 581-592.

건설교통부. 2002. 국제수문개발계획(IHP)연구보고서.

최성욱 · 양원준 · 박문형. 2003. 수심의 영향을 받는 침수 식생 개수로 흐름의 난류구조 및 고유구조. 대한토목학회 논문집, 23(3B) : 165-174.

한국건설기술연구원. 1998. 하천구역내 나무 심기 및 관리에 관한 규정.

Chow, V. T. 1959. Open Channel Hydraulics. New York : McGraw-Hill Book Company.

Dunn, C. J. 1993. Experimental determination of drag coefficients in open channel with simulated vegetation. M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.

Freeman, G. E., W. J. Rahmeyer. and P. R. Copeland. 2000. Determination of vegetative resistance due to shrubs and woody vegetation in floodplains and compound channels. Technical Report CHL-00-25, U. S. Army Engineering and Development Center.

Ghisalberti, M. and H. M. Nepf. 2002. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. Journal of Geophysical Research 107(C2) : 1-10.

Jackson, P. S. 1981. On the displacement height in the logarithmic velocity profile. Journal of Fluid Mechanics, 111 : 15-25.

Klopstra, D., H. J. Barneveld., J. M. Van Noortwijk. and E. H. Van Velzen. 1997. Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation. Proceedings of the 27th Congress. San Fransisco : International Association of Hydraulic Research. 775-780.

Kouwen, N. and R. M. Li. 1980. Biomechanics of vegetative channel linings. Journal of the Hydraulics Division 106(HY6) : 1085-1103.

Kutija, V. and H. T. M. Hong. 1996. A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation. Journal of Hydraulic Research 34(1) : 99-114.

Meijer, D. G. and van Velzen. 1999 Prototype-scale

- flume experiments on hydraulic roughness of submerged vegetation. Proceedings of the 27th Congress. Graz : International Association of Hydraulic Research. in CD.
- Nepf, H. M. and E. R. Vivoni. 1999. Turbulence structure in depth-limited vegetated flow : transition between emergent and submerged regimes. Proceedings of the 27th Congress. Graz : International Association of Hydraulic Research. in CD.
- Nepf, H. M. and E. R. Vivoni. 2000. Flow structure in depth-limited vegetated flow, *Journal of Geophysical Research* 105(C12) : 28547-28557.
- Nezu, I. and H. Nakagawa. 1993. *Turbulent Flow in Open-Channel Flows*. Netherlands : Balkema.
- Saowapon, C. and N. Kouwen. 1989. A physically based model for determining flow resistance and velocity profiles in vegetated channels. *Symposium on Manning's Equation*. American Society of Civil Engineering, 559-568.
- Stone, B. M. and H. T. Shen. 2002. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(5) : 500-506.
- Temple, D. 1990. Tractive force design of vegetated channels. *Transactions of ASME* 23 : 884-890.
- Temple, D. M. 1999. Flow resistance of grass-lined channel bank. *Applied Engineering in Agriculture* 15(2) : 129-133.
- Tsujimoto, T., T. Kitamura., Y. Fujji. and H. Nakagawa. 1996. Hydraulic resistance of flow with flexible vegetation on open channel. *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering* 14(1) : 47-56.
- Tsujimoto, T. and T. Kitamura. 1990. Velocity profile of flow in vegetated-bed channels, KHL Progressive Rep. No. 1 Kanazawa University, Japan.
- Wilson, C. A. M. E., T. Stoesser., P. D. Bates and A. Batemann Pinzen. 2003. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(11) : 847-853.

接受 2004年 11月 11日