

유연한 식생이 식재된 개수로흐름의 유속분포 예측

Prediction of Velocity Profiles in Open Channel Flows with Flexible Vegetation

박문형*, 최성욱**, 여흥구***

Sung-Uk Choi, Hong Koo Yeo, Moonhyeong Park

요 지

본 연구에서는 유연한 식생이 식재된 개수로흐름에서의 유속분포 예측 모형을 제시하였다. 유속의 산정은 Klopstra 등(1997)이 제안한 해석해를 이용하였으며, 식생의 변형은 Tsujimoto 등(1996)이 사용한 외팔보 이론을 적용하여 해석하였다. 제안한 모형의 검증을 위하여 수리실험을 실시하였다. 검증실험에서 유속의 측정에는 micro-ADV를 이용하였으며, 수위는 servo형 수위계를 이용하였다. 검증 실험 결과 본 연구에서 제안한 모형이 식생층에서는 비교적 정확하게 유속을 예측하였으며, 수면층에서는 실험값보다 다소 작게 예측하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 유속예측 모형은 향후 식생된 개수로흐름의 부유사 농도분포 예측의 중요 매개변수인 와확산계수 등의 예측에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 개수로흐름, 유연한 식생, 유속분포, 흐름저항

1. 서론

하도 내의 식생은 유사와 오염물질의 여과 기능 및 용존산소량의 증가, 그리고 수중생태계의 서식처 역할 등을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 하천 환경 및 생태계에 미치는 운영향에 반하여, 치수적인 측면에서 홍수위 상승을 야기한다는 부정적인 면이 지나치게 강조되어 10여년 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 것에서 기인한다. 최근에 하천 내 식생에 의한 흐름저항을 정량적으로 평가하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되면서 하천 내 식생이 흐름저항에 미치는 영향이 기존의 인식만큼 크지 않은 것으로 나타났다.

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 경우로는 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 뿐만 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.

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원(E-mail:moon@kict.re.kr)

** 연세대학교 부교수(E-mail:schoi@yonsei.ac.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원(E-mail:yeo917@kict.re.kr)

본 연구에서는 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. 검증실험에서 아크릴봉과 polyolefin 고무튜브를 이용하여 각각 곧은 식생과 유연한 식생을 구현한 후, micro-ADV와 servo형태의 수위계를 이용하여 유속과 수위를 측정하여 계산된 결과와 비교하였다. 본 연구에서 제안한 유속예측 모형은 향후 부유사 농도분포 예측에 있어 중요한 매개변수인 와확산계수 등의 예측에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 유속분포 산정 절차

2.1 곧은 식생의 유속분포 계산

Klopstra 등(1997)은 침수식생의 수심방향 유속분포와 흐름저항을 해석적으로 산정하는 모형을 제안하였다. 이들은 식생된 개수로 흐름을 수심방향에 대하여 식생층과 수면층으로 구분하였으며, 각각에 대하여 운동량방정식과 대수법칙을 이용하여 해석해를 유도하였다.

식생층에 적용한 운동량 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 τ 는 전단응력, ρ 는 물의 밀도, z 는 바닥으로부터의 거리, g 는 중력가속도이며, F_D 는 항력이다. 위의 식에서 식생층의 전단력은 다음과 같은 Boussinesq형태의 식을 이용하였다.

$$\tau = \rho \alpha u(z) \frac{\partial u(z)}{\partial z} \quad (3)$$

여기서 α 는 난류의 특성길이, ρ 는 물의 밀도, $u(z)$ 는 z 에서의 유속이다. 위의 식에서 $\alpha u(z)$ 는 와점성을 의미하며, 난류특성길이 α 는 경험상수로서 z 의 종속변수로 가정한다. 식(2)를 식(1)에 대입하여 해석해를 유도하면 다음과 같다.

$$u(z) = \sqrt{C_1 e^{-\sqrt{2A}z} + C_2 e^{\sqrt{2A}z} + u_{s0}^2} \quad (0 < z < k) \quad (4)$$

여기서 z 는 바닥으로부터의 거리, k 는 식생 길이, $A = (mdC_D)/(2\alpha)$, $u_{s0} (= \sqrt{(2gS_e)/(C_D m d)})$ 는 식생층의 단면평균유속, m 은 단위면적당 식생의 개체수, d 는 식생의 줄기 직경, C_D 는 항력계수, S_e 는 바닥경사 그리고 $u(z)$ 는 z 에서의 유속, α 는 난류의 특성길이, 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.

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

$$u(z) = \frac{1}{\kappa} u_{*i} \ln \frac{z - (k - h_s)}{z_0} \quad (k < z < h) \quad (2)$$

여기서 κ 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 있다.

2.2 식생의 변형계산

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

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

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 δ 는 식생의 흐름방향 변위이다.

식생구간의 유속이 주어지면 식생의 변위는 식(3)을 해석하여 산정할 수 있다. 본 연구에서는 위의 식을

이산화 한 후 Runge-Kutta방법을 이용하여 계산하였다. 이 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{d\delta}{dz} = \delta = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (4)$$

식 (3)에 의하여 계산된 값은 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$k_0 = \int_0^k \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta}{dz}\right)^2} dz \quad (5)$$

여기서 k_0 는 식생의 휘어지기 전의 길이이다. 식 (5)를 만족할 때까지 식 (4)을 시행착오법을 이용하여 반복 계산한다. Klopstra 등(1997)이 제안한 해석해를 이용하여 산정된 유속과 식 (4)에서 산정된 식생의 변위는 서로의 해에 영향을 준다. 본 연구에서는 시행착오법을 이용하여 계산된 유속이 일정한 값으로 수렴할 때까지 반복 계산하였다.

3. 실험장치 및 실험조건

본 실험은 폭 1.5 m, 높이 1.2 m, 길이 14 m의 가변 경사수로에서 실시하였다. 가변 경사수로의 바닥은 철재이며, 좌우 측벽은 강화유리로 구성되어 있다. 개수로실험장치의 제원은 그림 1과 같다. 식생의 유연성이 흐름에 미치는 영향을 파악하기 위하여 유수 중에서 휘지 않는(곧은) 식생과 휘어지는(유연한) 식생 2종류의 모의 식생을 선정하였으며, 정류장치로부터 하류방향으로 2m 지점에서 10 m 지점사이 모의 식생을 식재하였다. 길이 170 mm, 외경 15 mm의 아크릴 봉과 polyolefin 고무튜브를 이용하여 각각 곧은 식생과 유연한 식생을 구현한 후, 그림 1에 나타낸 것과 같이 단위면적당 625개의 줄기를 엇갈리게 식재하였다. 이 때 식생의 밀도는 1.25 m^{-1} 이다.

실험조건은 표 1과 같다. 좌표축은 주흐름방향, 횡방향 그리고 하상의 수직방향을 각각 x, y, z 축으로 설정하였다. 상류측 유입유량은 삼각 예연위어에서 월류되는 수심을 포인트게이지를 이용하여 판독하였다. 수심의 관측은 그림 1에 제시된 바와 같이 식생이 식재된 구간의 상하류 1.5 m 내와 중앙에서 servo형태의 수위계(SWT-100; Kenek사 제품)를 이용하여 실험 전 과정에서 관측하였으며 식생구간 각 1 m 마다 눈금자를 부착하여 판독하였다. 유속측정은 Sontek사의 3차원 16MHz micro-ADV를 이용하였다. 16MHz 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.

4. 모형의 검증

그림 2는 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(강형식과 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.

해석해의 결과와 비교하여 보면 곧은 식생의 경우(그림2a)에는 Klopstra 등(1997)이 제안한 식으로부터 계산된 값과 측정된 값이 거의 일치하고 있으며, 유연한 식생조건(그림2b)에서는 계산된 식생높이가 12.8 cm로서 측정값인 13 cm와 비교적 일치하였으나 계산된 결과가 유속 분포를 과소산정하고 있음을 확인할 수 있다. 식생층에서의 유속은 약 2 cm/sec 내외의 비교적 균일한 편차를 갖는 것으로 나타났으며, 수면층에서는 속도경사의 차이에 의하여 수심에 접근할수록 유속의 차이가 커지는 경향을 나타내고 있다. 유연한 식생은 흐름에 대하여 저항을 작게 하는 방향으로 변형하며, 항력계수가 직립상태일 때보다 작을 것을 예상할 수 있다. 그러나 그림 2(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. 수면층구간에서는 계산된 결과의 속도경사가 측정된 속도경사 보다 작으며, 수심으로 갈수록 계산된 유속과 실험값의 차

이가 크게 나타나고 있다. 수면층부 유속을 산정하기 위한 식(2)에서 속도경사는 u_{s_i} 에 비례하는 것을 알 수 있는데, 식생이 요동(oscillating)하는 경우의 u_{s_i} 는 식생이 직립된 경우보다 큰 값을 가질 것으로 추측된다. 그러나 Klopstra 등의 방법에서는 u_{s_i} 를 산정함에 있어 식생 요동의 영향을 감안하지 못하므로 유연한 식생이 존재하는 개수로 흐름에서의 u_{s_i} 를 과소 산정할 가능성이 있으며, 이 영향에 의하여 실험값과 계산값의 차이가 발생한 것으로 추정할 수 있다.

그림2(c)는 변형된 Klopstra 방법에 Saowapon과 Kouwen(1989)가 제안한 다음의 항력계수를 적용하여 유속분포를 예측한 결과이다.

$$C_D = 2.0 \cos^3 \theta \quad (6)$$

여기서 θ 는 바닥과 유연한 식생이 이루는 각이다. 그림에서 식생층의 계산된 유속분포는 실험값과 거의 일치하며, 수면층에서는 속도경사를 작게 산정하여 계산된 결과가 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 식생 요동의 영향 및 식생 요동에 의한 난류길이축척의 변화에 기인한 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

등류수심 측정을 통한 조도계수 산정 결과는 그림 3과 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.

그림4(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 양호한 수위예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림4(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 7.13%, 43.4%, 59.4%이었다. 변형된 Klopstra 방법은 실측값보다 다소 크게 산정된 결과는 나타내고 있는데, 유속분포에서 살펴본 바와 같이 식생의 요동에 의한 영향을 반영하지 못한 결과인 것으로 보인다. 향후 이러한 현상을 반영하여 변형된 Klopstra 방법의 정도를 개선할 예정이다. 그림 4(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.

5. 결론

본 연구에서는 Klopstra 등(1997)이 제안한 해석해와 외팔보이론을 적용하여 유연한 식생이 식재된 침수조건을 갖는 개수로흐름의 유속분포예측모형을 개발하였으며, 수리실험을 통하여 검증하였다. 식생층에서는 본 연구에서 제안한 모형이 비교적 정확한 유속분포를 예측함을 확인할 수 있었으며, 수면층에서는 작게 산정하고 있음을 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 연구에서 제안한 유연한 식생조건에서의 유속예측 기법은 수위 예측 뿐 만 아니라 향후 레이놀즈응력분포 및 와점성계수 등의 예측에 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 강형식, 최성욱(2000). "식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석." 한국수자원학회논문집, 33(5), 581-592
2. Klopstra, D., Barneveld, H.J., Van Noortwijk, J.M., and Van Velzen, E.H. (1996). "Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation" *Proceedings of the Congress - IAHR, Conf.27*, v.COM, 775- 780.
3. Kouwen, N. and Li, R.M. (1980). "Biomechanics of vegetative channel linings." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 106(HY6), 1085-1103.
4. Kutija, V., and Hong, H.T.M. (1996). A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 34, No. 1, pp. 99-114.
5. Saowapon, C., and Kouwen, N. (1989). "A physically based model for determining flow resistance and velocity profiles in vegetated channels." *Symposium on Manning's Equation*, 559-568
6. Stone, B.M., and Shen, H.T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(5), 500-506
7. Temple, D.M.(1999). "Flow resistance of grass-lined channel bank." *Applied Engineering in Agriculture, ASAE*, 15(2), 129-133
8. Tsujimoto, T., Kitamura, T., Fujji, Y. and, Nakagawa, H. (1996). Hydraulic resistance of flow with flexible vegetation on open channel," *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 47-56.

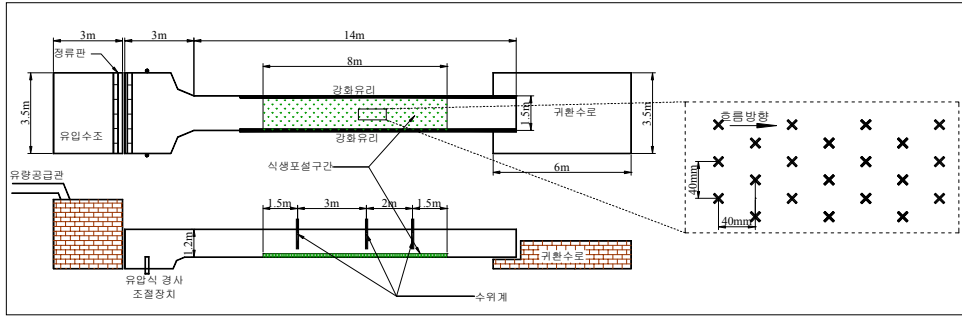


그림 1 개수로실험장치 및 식생의 식재위치

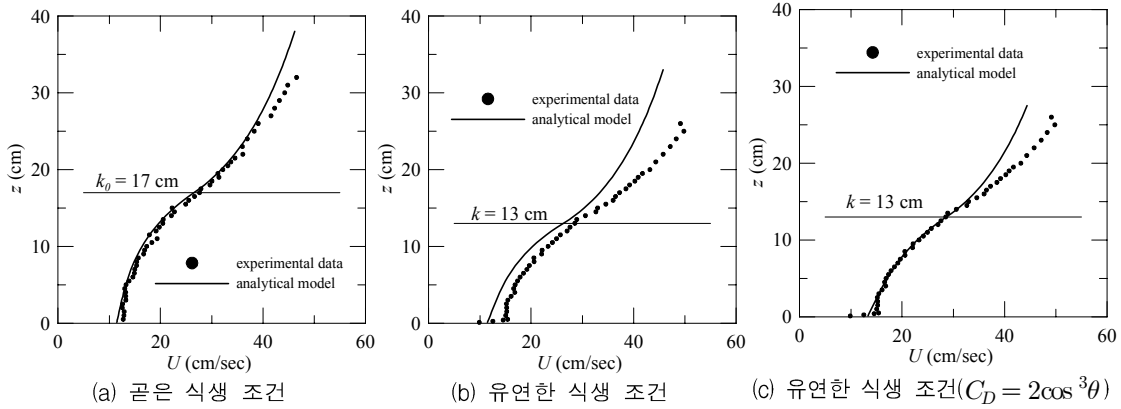


그림 2 계산된 유속분포와 실험결과의 비교

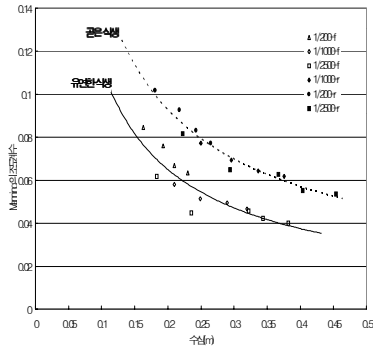


그림 3 실험조건별 조도계수 변화

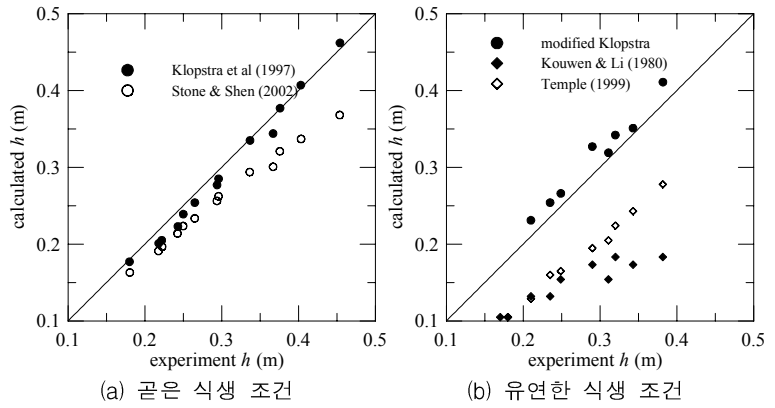


그림 4 해석해를 이용한 수위예측

표 1 실험조건

유연한 식생($ET=4.81 \times 10^{-4}$)					곧은 식생($ET=\infty$)				
실험번호	$h(m)$	$U_0(m/sec)$	Fr	Re	실험번호	$h(m)$	$U_0(m/sec)$	Fr	Re
F-01-01	0.38	0.26	0.14	100,000	R-01-01	0.45	0.22	0.11	100,000
F-01-02	0.34	0.24	0.13	80,000	R-01-02	0.40	0.20	0.10	80,000
F-01-03	0.32	0.19	0.11	60,000	R-01-03	0.37	0.16	0.09	60,000
F-01-04	0.24	0.17	0.11	40,000	R-01-04	0.29	0.14	0.08	40,000
F-01-05	0.18	0.11	0.08	20,000	R-01-05	0.22	0.09	0.06	20,000
F-02-01*	0.32	0.31	0.18	100,000	R-02-01*	0.38	0.26	0.14	100,000
F-02-02	0.29	0.28	0.16	80,000	R-02-02	0.34	0.24	0.13	80,000
F-02-03	0.25	0.24	0.15	60,000	R-02-03	0.30	0.20	0.12	60,000
F-02-04	0.21	0.19	0.13	40,000	R-02-04	0.25	0.16	0.10	40,000
F-03-01	0.23	0.43	0.29	100,000	R-03-01	0.26	0.38	0.24	100,000
F-03-02	0.21	0.38	0.27	80,000	R-03-02	0.24	0.33	0.22	80,000
F-03-03	0.19	0.32	0.23	60,000	R-03-03	0.22	0.27	0.19	60,000
F-03-04	0.16	0.25	0.20	40,000	R-03-04	0.18	0.22	0.17	40,000

* ADV를 이용한 유속분포 측정