

식생에 대한 항력 모델의 적용



이 해 군 |
단국대학교 토목환경공학과 전임강사
haegyun@dankook.ac.kr



이 남 주 |
경성대학교 토목공학과 교수
njlee@ks.ac.kr



류 시 원 |
창원대학교 토목공학과 교수
minilite@sarim.changwon.ac.kr

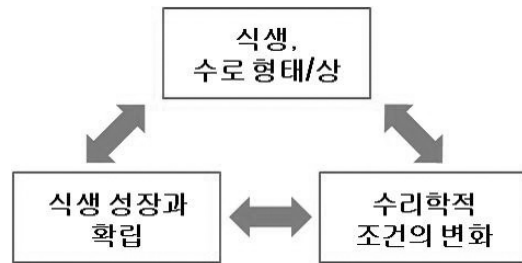


그림 1. 식생과 흐름, 하상 변화의 상호 관계

항은 흐름의 속도를 감소시키고 주수로와 홍수터의 속도차이를 크게 하며, 저항으로 인하여 수위의 저하를 가져온다. 이에 따라 하천의 평균유속은 감소하게 되는 등 수리학적 모델링의 주요 어려움으로 알려져 왔다. 또한, 식생은 하천의 흐름을 변화시키고, 흐름은 다시 식생의 성장과 발달에, 유사이동 등을 통하여 하천 지형의 변화에 영향을 주는, 복잡한 상호관계 속에 자리 잡고 있다 (그림 1).

일반적으로 하상저항은 하상입자에 의한 저항 (grain roughness)과 하상형태에 의한 저항(form roughness)으로 구분할 수 있다. 전자는 흐름에 대한 전단응력에 의한 것으로, 후자는 하상형태 (bed form)와 같이 규모면에서 보다 큰 형태에 의한 압력차에 기인한다. 수리학자들은 두가지 형태의 하상저항을 모두 Manning의 n 으로 표현하려고 노력해 왔다. 여기에 하천흐름에 중요한 식생저항을 고려할 필요가 있다.

Chow (1959, p.102)는 다음과 같이 식생의 저

1. 서론

보통의 자연하천과 인공하천은 주수로(main channel)와 홍수터(floodplain)로 나눌 수 있다. 홍수터는 부분적으로 관목(shrub)과 교목(tree) 등의 식생에 의하여 덮여 있는 경우가 많으며, 홍수시에 증가하는 수량을 운송하는 통로가 된다. 이와 같은 식생은 자연적으로 발생하기도 하지만, 하천의 침식방지, 환경과 미관에 대한 고려 등에 의하여 인공적으로 식재하기도 한다. 이에 의한 수리학적 저

항을 Manning n 값의 변화로 설명한 바 있다. '식생은 표면저항으로 간주될 수 있으며, 이는 하천의 통수능을 감소시키고, 흐름을 늦춘다. ... 1925년 3월, 수로에 (식생이 거의 없는) 양호한 상태였을 때, 평균 n 값이 0.003이 관찰되었는데, 1926년 4월에는 수로 측면 경사부가 버드나무 관목과 마른 풀로 뒤덮여, n 값 0.055가 관찰되었다. 이러한 n 값의 증가는 1년 동안 식생의 성장을 반영한다.' Cowan (1956)은 흐름에 영향을 주는, 식생에 의한 영향을 포함하여 여러 가지 요소들을 반영한 n 값 산정 공식을 다음과 같이 제시하였다.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (1)$$

여기서 n 은 기본값으로서 일직선형으로 식생이 거의 없는 수로에 상당하는 값이다. n_1 은 하상의 불규칙적인 형태를, n_2 는 흐름 단면의 면적 및 형상 변화를, n_3 은 자연적/인공적 장애물에 의한 영향을, n_4 는 식생에 의한 영향을 나타내며, m 은 하천의 사행(meandering)을 반영하는 수정계수이다. 이후에도 Manning의 n 산정에는 사진과 도표가 많이 이용되었다 (예를 들면, Chow (1959), Barnes (1967), Arcement와 Schneider (1989) 등).

식생에 의한 저항을 고려하기 위하여 고안된 이와 같은 정성적인 기법들은 간단하고 적용의 용이함으로 인하여 많이 사용되고 있으나, 흐름의 변화에 대한 유체역학적인 이해를 위해서는 미흡하다고 할 수 있다. 본고에서는 식생을 실린더(원형 기둥)으로 모의하고 항력을 운동량 방정식에 고려하는 기법에 대하여 문헌을 조사하였다.

2. 항력계수산정을 위한 연구

2.1 실린더 집합체에 작용하는 항력

항력(Drag) 모델은 다음과 같은 기본 가정에서 출발한다. 1) 항력은 식생을 통하여 흐름이 있을 때

발생한다. 2) 항력은 흐름내에 속도 구배와 와류를 유발하며 이로 인하여 운동량의 손실을 유발한다. 3) 물에 잠기지 않은 식생(unsubmerged vegetation)에 적용할 수 있다. 원통형(Cylinder)으로 모델링하는 것이 일반적이다.

우선 식생의 형태학적 특성이나 유연성(flexibility)를 고려하지 않을 경우, 식생은 균일한 지름을 가진 실린더의 집합으로 모의할 수 있을 것이다. 단일 실린더에 대하여 흐름에 대한 항력을 추정한다면, 항력은 항력계수, C_D ,를 이용하여 $F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2$ 으로 표현할 수 있다. 운동량 방정식에 적합한, 여러 개의 실린더 집합에 대한 단위 유체 질량당 항력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \left[\frac{\text{force}}{\text{mass}} \right] = \frac{1}{2} \overline{C_D} a U^2 \quad (2)$$

여기서 $\overline{C_D}$ 는 체적항력계수(bulk drag coefficient)로서 식생밀도(vegetation density), a 의 함수이며, 전체 유체 체적에 대한 흐름방향의 식생 투영면적(Dh)의 비로서, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$a = \frac{Dh}{(\Delta S)^2 h} = \frac{D}{(\Delta S)^2} = nD \quad (3)$$

D 는 실린더의 지름, h 는 수심, $n(=1/(\Delta S)^2)$ 은 단위 면적당 실린더의 수(m^{-2}), ΔS 는 실린더 사이의 평균 간격을 의미한다. Nepf 등(1997)은 무차원 식생 밀도로서 aD 를 정의하고, 실린더 집합체에 대한 실험에서 $aD=0.008 \sim 0.070$ 인 경우, $Re_D=UD/\nu=150 \sim 200$ 에서 와류발산(vortex shedding)이 시작됨을 관찰하였다.

체적항력계수($\overline{C_D}$)는 식생밀도의 함수이며, Bokaian과 Geoola (1984)는 $\overline{C_D}$ 와 그 관계를 파악하기 위하여 그림 2와 같이 2개의 실린더 조합(A와 B)에 대하여 실험을 수행하였다. 대체로 상류에 위치한 실린더 A의 후류(wake)에 의하여 하류 실린더 B의 항력계수(C_D)는 감소하는 경향이 있음을 관찰하였다. 이러한 경향은 흐름 방향에 대한 실린더 간격 (L), 흐름에 직각방향 실린더 간격(T)과 실린

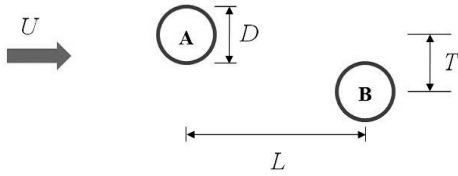


그림 2. 실린더 배열 형태

터 지름(D)의 비인 T/D 와 L/D 가 작아질수록 뚜렷해지는 경향이 있으며, 이는 후류에 대한 다음 두가지 특성에 기인한다 (Luo 등, 1996). 첫째, 하류 실린더 B는 상류 실린더 A로 인한 후류에 의하여 작은 접근 유속을 경험하게 된다. 둘째, 실린더 A의 후류로 인한 난류가 실린더 B 표면의 박리점(separation point)의 발생을 지연시키고, 이로 인하여 실린더 주위의 압력차를 작게 하여 항력을 감소시킨다.

그림 3은 실린더 B의 항력계수가 앞서 언급한 간격의 비에 따라 어떻게 달라지는가를 도시한 것이다 (Nepf, 1999; Tanino와 Nepf, 2008). 이와 같은 경향으로 볼 때, \bar{C}_D 는 T/D 와 L/D 가 작아질수록 또는 식생 밀도 αD 가 증가할수록 감소한다. Bokaian과 Geoola (1984)는 여러 개의 실린더를 랜덤하게 배치하고 각각의 실린더에 대한 항력을 수치해석을 통하여 추정하였다. 그들의 관찰에 의하면 대체로 항력계수는 상류(upstream)방향으로 가장 가까운 거리에 위치한 실린더에 의하여 생성되는 후류(wake)의 영향을 받으며, 다른 여러 실린더들의 존재로 인하여 누적되는 후류의 영향은 무시할 만한 수준이라는 것이다. 이는 Nepf (1999)의 관찰에 의하여 재확인되었다.

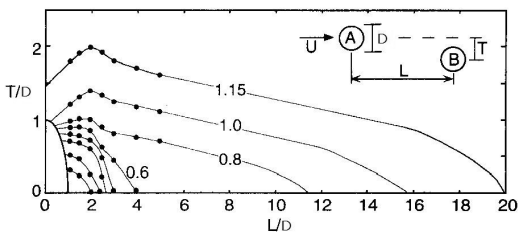


그림 3. 실린더 B에 대한 항력계수 값의 분포 (Nepf, 1999)

2.2 항력계수의 적용

Petryk과 Bosmajian (1975)은 잠기지 않은 식생(수심이 최대 식생 높이보다 작거나 같은 경우)의 n 값 산정을 위하여, 정상 등류 (steady uniform flow) 가정과 운동량 보존을 고려하여 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$n = n_b \left[1 + \frac{C_D \sum A_i \left(\frac{1}{n_b} \right)^2 R_h^{4/3}}{2gAL} \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 n_b 는 식생을 고려하지 않은 기본 값(base value)이다. A_i 는 i -번째 식생의 흐름방향(streamwise direction)에 대한 투영면적, A 는 흐름 단면, L 은 관심 대상 하천의 길이, R_h 는 동수반경(hydraulic radius)이다. Petryk (1969)은 선행 연구를 통하여 항력계수의 값으로 1을 제안하였다. Petryk과 Bosmajian (1975)의 실험에 의하면 식생의 밀도가 일정한 경우, 수심의 증가에 따라 n 값도 증가하는 경향을 보인다. Lopez와 Garcia (1997)는 식생 밀도, α 값이 증가함에 따라 초기에는 변화를 보이지 않으나 특정 한계값을 초과함에 따라 급격하게 n 이 증가하는 것을 관찰하였다.

Turner와 Chanmeesri (1984)는 밀(wheat)을 이용하여, 완전히 잠기지 않는 조건에서 Manning의 n 과 마찰계수(friction coefficient)를 측정하였다. 그들은 항력계수(\bar{C}_D)가 수심이 증가함에 따라 감소함을 보고하고 있다. Chiew와 Tan (1992)은 잠기지 않은 식생에 대한 현장 실측 결과를 토대로 마찰저항은 수심변화에 무관함을 주장하고 있다. 반면에 Wu 등 (1999)은 완전히 잠기지 않는 식생의 경우 수심의 증가에 따라 항력은 특정 임계 깊이까지는 감소하나, 그 후 수심의 증가에 따라 다시 증가하는 것을 보고한 바 있다.

전통적으로, 항력모델에서는 다음과 같이 시간평균한 Navier-Stokes 방정식에 운동량 손실항(sink term)을 더하여 식생으로 인한 항력효과를 고려하였다 (Fischer-Antze 등, 2001).

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \nu_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - F_{D_i} \quad (5)$$

2차원/3차원 모델의 경우 실리더 지름을 기준으로 레이놀즈 수 ($Re_D = UD/\nu$)가 1,000일 때, 항력 계수(C_D)는 약 1의 값을 많이 사용해 왔다.

Burke와 Stolzenbach (1983)는 처음으로 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 식생이 있는 자유수면 흐름에 적용하였으며, 그 후 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델은 많은 연구자들에 의하여 관련 연구에 사용되었다. 그들의 연구에서는 연직방향의 난류에너지 변화와 수평방향 평균유속 (U)의 변화를 잘 재현할 수 있었다. 다만, 식생의 식재 특성에 따른 항력계수의 변화를 반영하지는 못했다. Lopez와 Garcia (1997)는 식생이 있는 개수로에서 부유사의 농도를 모의하였다. 역시 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 이용하였으며, 항력계수의 산정을 위한 실험을 통하여 $C_D = 1.13 \pm 15\%$ 의 값을 제안하였다. 또한, 항력에 의한 저면의 전단응력 저하가 유사의 퇴적을 증진시킴을 확인하였다. Ghisalberti와 Nepf(2004)는 물에 잠긴 식생에 의한 속도 전단층의 성장과 난류 에너지의 생성과 소산의 균형을 모의하고 이를 실험과 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 국내에서는 권기원과 최성욱 (2000)이 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 난류구조를 연구하였으며, 김지성 등(2009)은 항력저항을 운동량 방정식에 적용한 일차원 부정류 해석기법을 제안한 바 있다. L과 Ming (2005)은 항력모델과 정상 등류에 대한 운동량 방정식, Manning 공식을 이용하여, 식생저항에 상당하는 Manning의 n 을 구하는 공식을 제안하였다.

$$\frac{U^2 A_d C_D}{2g} = S \quad (6)$$

여기서 U 는 흐름 단면 평균유속, A_d 는 흐름방향으로 단위 길이당 식생밀도 ($\mathcal{L}A_f/A\mathcal{L}x$), A_f 는 흐름방향에 대한 i 번째 식생의 투영면적이다. 이를

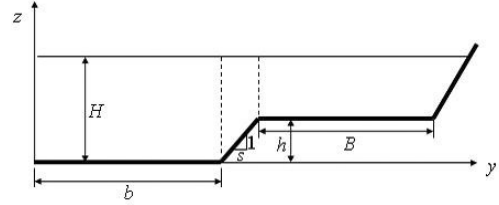


그림 4. 복단면 하천의 횡방향 단면도

Manning 공식을 이용하여 간단히 하면, 다음과 같은 관계를 얻게 된다.

$$n = R_h^{2/3} \left(\frac{A_d C_D}{2g} \right)^{1/2} \quad (7)$$

여기서 R_h 는 동수반경, C_D 는 항력계수이다.

2.3 복단면 하천에 대한 식생저항의 고려

복단면 하천의 경우, 흐름은 주수로(main channel)와 홍수터(floodplain)로 구분할 수 있다. 홍수터는 일반적으로 식생에 의하여 피복되는 경우가 많기 때문에 주수로에 비하여 작은 유속을 보이는 경우가 많다. 이로 인한 속도의 차이는 횡방향의 전단층을 형성하게 하고 활발한 운동량과 질량의 교환을 유발하게 된다. 따라서, 주 흐름방향(x -방향)이 아닌 횡방향 (y -방향)에 대한 유속분포는 동수능 등 홍수시 방재, 유사이동, 오염물질의 확산 등 실용적인 측면에서 하천의 기능과 밀접한 관계에 있다 (그림 4). 이에 대한 주목할 만한 연구로서, Tang과 Knight (2008)는 흐름방향, x 에 대한 운동량 방정식에 항력에 의한 운동량 손실항을 더하여 식생에 의한 효과를 모의하고, 횡방향에 대하여 저항을 계산한 바 있다.

더 나아가 Tang과 Knight (2009)는 수심이 일정한 경우($s=\infty$)와 일항력계수 반적인 복단면 하천 ($0 \leq s < \infty$)에 대하여, 수심평균 종방향 유속에 대한 해석해를 제안하였다. Tang과 Knight (2009)의 연구에서는 항력계수 $C_D=1$ 을 사용하였으며, 구한

중방향 수심평균유속은 실험값과 매우 잘 일치함을 확인하였다. Rameshwaran과 Shiono (2007)는 유사한 연구와 Hydraulics Research Ltd, Wallingford의 FCF (Flood Channel Facility) 실험자료를 이용하여 Colebrook-White 방정식에 대한 수정된 공식을 제안하였다.

적인 측면에서 식생의 흐름에 대한 영향을 모의하는 한 기법으로 항력 모델에 대하여 문헌을 조사하고 실용적으로 의미가 있는 복단면 하천의 경우에 대한 적용 사례를 소개하였다. 다양한 식생에 대하여 적용이 가능한 보편적인 모델의 개발까지는 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3. 결론

식생은 경관과 기능적인 측면 모두에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 본 기사에서는 하천의 기능

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다. ☺

참고문헌

1. 권기원, 최성욱 (2000). 식생된 개수로 흐름의 κ - ϵ 난류 해석, 대한토목학회논문집, 제20권, 제1-B호, pp. 11-21.
2. Arcement, G. and Schneider, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2339.
3. Barnes, V.T. (1967). Roughness characteristics of natural channels. Water Resources, Paper 1849, U. S. Geological Survey, Washington, D.C.
4. Bokaian A. and Geoola F (1984). Wake-induced galloping of two interfering circular cylinders. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 146, pp. 383-415.
5. Burke, R. W. and Stolzenbach, K. D. (1983). Free surface flow through salt marsh grass. MIT-Sea Grant Report MITSG 83-16, Cambridge, MA 252.
6. Chiew, Y. and Tan, S. (1992). Frictional resistance of overland flow on tropical turfed slope, J. Hydraul Eng., Vol. 118, No. 1, pp. 92-97.
7. Chow, V.T. (1959). Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Civil Engineering Series, New York, N.Y.
8. Cowan, W.L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
9. Dunn, C.J. (1996). Experimental determination of drag coefficients in open channel with simulated vegetation, MS Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
10. L, N. and Ming, Y.Z. (2005). Study on the flow of water through non-submerged Vegetation, Hydrology Days 2005.
11. Lopez, F. and Garcia, M. (1997). Open-Channel Flow Through Simulated Vegetation: Turbulence Modeling and Sediment Transport, USACE WES.
12. Luo, S.C., Gan, T.L., and Chew, Y.T. (1996). "Uniform flow past one (or two in tandem) finite length circular cylinder(s)." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 59, No. 1, pp. 69-93.

13. Nepf, H. M. (1999). "Drag, turbulence and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 479-489.
14. Nepf, H.M., Sullivan, J., and Zavistoski, R. (1997). "A model for diffusion within emergent vegetation." *Limnology and Oceanography*, Vol. 42, No. 8, pp. 85-95.
15. Fischer-Antze, T., Stoesser, T., Bates, P. and Olsen, N.R.B. (2001). "3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 3, pp. 303-310.
16. Petryk, S. (1969). "Drag on Cylinders in Open Channel Flow, Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
17. Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975). Analysis of flow through vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 101, No. 7, pp. 871-884.
18. Turner, A.K. and Chanmeesri, N. (1984). "Shallow flow of water through non-submerged vegetation." *Agricultural Water Management*, Vol. 8. pp. 375-385.
19. Rameshwaran, P. and Shiono, K. (2007). "Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 3, pp. 302-315.
20. Tang, X.N. and Knight, D.W. (2008). "Lateral depth-averaged velocity distributions and bed shear in rectangular compound channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 9, pp. 1337-1342.
21. Tang, X.N. and Knight, D.W. (2009). "Lateral distributions of streamwise velocity in compound channels with partially vegetated floodplains." *Science in China Series E: Technical Science*.
22. Tanino, Y. and Nepf H.M. (2008). "Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 34-41.
23. Wu, F.-C., Shen, H.W., and Chou, Y.-J. (1999). "Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering.*, Vol. 125, No. 9, pp. 934-942.