

식생하도에서 Mertens와 Nuding식의 수위-유량 비교 연구

Comparative Study on Rating Curve Using Mertens and Nuding Equation for Vegetated Channel

송주일*, 원진영**, 김종우***, 윤세의****

Ju Il Song, Jin Young Won, Jong Woo Kim, Sei Eui Yoon

요 지

식재된 하도의 흐름 해석을 위하여 많은 연구자들이 모형을 제시하였지만 이들 연구는 주로 균일한 형태를 갖는 수로의 실험자료를 활용하여 검증되었다. 자연하천의 경우 하도는 복잡한 형태를 보이고 동시에 식생위치, 밀도 등이 다양하여 흐름 또한 매우 복잡하다. 이러한 자연하도에서 유량을 정확히 예측하는 것은 매우 어려우며 이러한 이유로 식생이 존재하는 자연하도의 실측자료에 대하여 검증이 필요하다. 본 연구에서는 Mertens와 Nuding의 방법을 활용하여 주수로와 홍수터 그리고 식생구역과 비식생구역 사이의 운동량 교환에 의한 흐름저항을 산정하고, Darcy-Weisbach식을 이용하여 분할단면 별 유속을 계산하였다. 계산된 유속으로부터 분할단면의 유량을 계산하고 이들의 총합으로 전단면의 유량을 산정하였다. 독일의 도시하천인 Enz강 4개 단면에 대하여 두 가지 방법에 의해 수위에 따른 유량을 계산하고 실측 유량과 비교하였다. 비교결과 모든 단면에서 Nuding 방법이 Mertens의 방법보다 유량을 크게 산정하고 있음을 확인하였다. 이는 식생구역과 비식생구역 사이에서 운동량 교환이 발생하는 폭이 크면 클수록 경계면에서의 마찰은 증가하게 되는데 Nuding 방법이 Mertens방법보다 운동량 교환 폭을 상대적으로 작게 산정하여 경계면의 마찰 또한 작게 산정한 결과로 판단된다. 복단면의 홍수터에 식생이 존재하는 경우에는 Nuding방법이, 복단면 형태이더라도 식생이 호안에 존재하거나 단단면의 제방에 식생이 존재하는 경우에는 Mertens방법에 의해 계산된 유량이 실측유량과 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 식생하도, 흐름저항, 운동량 교환, Mertens, Nuding

1. 서론

하천내의 식생은 흐름저항을 크게 하여 식생구역내의 유속과 침식력을 감소시킨다. 그 결과로 침전된 부유물질 중에 포함된 질소, 인 등을 식생이 흡수함으로써 하천의 정화기능은 증대된다. 또한 식생은 수중생물의 산란지를 제공하고 생물종을 다양하게 한다. 그러나 하도내에 존재하는 식생은 비식생구역의 유속을 증가시키는 한편, 하천의 통수능을 저하시키고 홍수위를 증가시킨다. 따라서 식생이 존재하는 하도의 유속과 수위는 식생의 영향을 고려하여 계산되어야 한다. 하도내에 식생이 존재하는 경우 수로의 흐름은 매우 복잡하다. 이준호(2006)는 실험을 통해 복단면의 경우 주수로의 유속은 홍수터 식생 밀도에 비례관계에 있고 수심비(홍수터 수심/식생높이)와는 반비례함을 보였다. 그 범위는 관목의 경우 최대 75%, 교목의 경우 최대 71%로 홍수터에 식생이 식재된 후에는 주수로의 유속은 상당히 증가하게 된다. 또한 홍수터 식생층 위의 유속은 식생전과 비교하여 식재 후 감소하지만, 홍수터 한측에만 식생이 존재하는 경우 반대편 홍수터의 유속은 식생이 없을때와

* 정회원 · 경기대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 E-mail : toyou012@hanmail.net

** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 E-mail : wjy30228@nate.com

*** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 강사 · 공학박사 E-mail : kimjw0426@nate.com

**** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 E-mail : syoon@kyonggi.ac.kr

비교하여 약 40 % 증가하게 된다. 이러한 실험결과를 바탕으로 이준호(2006)는 식생에 의한 수리 특성 변화는 수로 조건, 수심비, 식생밀도, 식생종류, 식생 배치 등에 따라서 다양하게 발생하므로, 특히 자연하천에서 실측치를 이용한 검토가 필요함을 기술하였다. 식재된 수로의 흐름해석을 위하여 기존에 많은 연구에서 모형을 제시하였지만 이러한 모델들은 균일한 홍수터와 단단한 원기둥 형태를 갖는 실험자료를 활용하여 주로 검증하였다(Helmio, 2004). 국내에서는 윤세의 등(1997)이 식생구역과 비식생구역 사이의 전단력을 고려한 준 2차원 모형을 이용하여 수목이 있는 가상하도에서의 수위를 예측하였다. 최성욱 등(2005)은 Yen(1984)이 제안한 배수방정식을 이용하여 복단면 1차원 수치모형을 개발하고 이를 HEC-RAS결과와 비교하였다. 김원 등(2009)은 식생항력을 추가한 Saint-Venant식을 이용하여 1차원 부정류 모형을 개발하고 실험결과와 비교한 바 있다. 그러나 실제 식생하도를 대상으로 검증이 이뤄진 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 독일의 Enz 강의 4개 단면에 대하여 4가지 수위조건(CASE 1, 2, 3, 4)의 실측유량과 Mertens(1994)와 Nuding(1998)의 방법에 의해 산정된 마찰계수를 이용하여 계산된 유량을 비교하였다.

2. 기본이론

전체단면의 유량계산 위하여 우선 단면의 형태, 식생조건 등을 고려하여 단면을 몇 개의 분할단면으로 나누고 각 분할단면별로 하상 거칠기, 식생, 경계면의 상호작용 등에 의한 마찰계수를 산정하고 분할단면의 유속을 계산하였다. 계산된 유속을 이용하여 분할단면별 유량을 계산하고 산정된 분할단면 유량들의 합으로 전체단면의 유량을 계산하였다. 각 분할단면에서의 평균유속은 식 (1)의 Darcy-Weisbach공식에 의해 계산된다.

$$v = \sqrt{\frac{8gRI}{f}} \quad (1)$$

여기서 f :단면에서의 무차원 평균 마찰 계수, g :중력가속도, I :하상경사, R :동수반경

각 단면의 유속계산을 위해서는 적절한 마찰계수 f 의 산정이 필요하다. 각 분할단면이 갖는 흐름저항은 식생과 하상의 거칠기에 결정된다. Einstein과 Banks의 개념에 따르면 이러한 구역에서의 마찰은 다음과 같다(Indlekofer, 1981). 그러나 식생에 의한 마찰저항과 비교하여 하상거칠기에 의한 마찰저항이 매우 미소할 경우에는 식생에 의한 마찰저항만을 고려할 수 있다.

$$f = f_s + f_v \quad (2)$$

여기서 f :분할단면에서의 평균 마찰, f_s :하상 거칠기에 의한 마찰, f_v :침수된 식생에 의한 마찰

하상과 경사면의 거칠기(K_s)에 의한 하상 저항은 Rickert(1988)가 제시한 식 (3)을 이용하여 계산하게 된다.

$$\frac{1}{\sqrt{f_s}} = -2.03 \log\left(\frac{K_s}{14.84R}\right) \quad (3)$$

정수 식생의 마찰계수 f_v 는 Kaiser(1984), Lindner(1982), Pasche(1984)에 의해 조사되었다. 나무가 존재하는 단면에서 f_v 는 침수된 식생으로부터의 저항에 기초하여 계산되고 홍수터 전체 면적에 관계된다.

$$\lambda_v = \frac{4h_p d_p}{a_x a_y} C_{wR} \cos\alpha \quad (4)$$

여기서 h_p :나무의 침수된 높이, d_p :나무 직경, α :횡방향 경사 각, C_{wR} :침수된 나무부분의 무차원 항력계수

주수로의 경우에는 인접 분할단면과의 운동량 교환을 함께 고려해주어야 한다. Mertens(1989)는 주수로와 홍수터의 경계면을 K_T 의 거칠기를 갖는 가상의 경계면으로 가정하여 경계면에서의 마찰계수 f_T 를 산정하였고, Nuding(1991)은 인접 분할단면과의 유속비를 고려하여 마찰계수 f_T 를 산정하였다.

$$\sqrt{\frac{8}{f_T}} = 2.5 \ln \left(\frac{R_{III}}{K_T} \right) + 6.27 \quad (\text{Mertens, 1989}) \quad (5)$$

$$f_T = 4 \left[\log \left(\frac{v_{M,ideal}}{v_F} \right) \right]^2 \frac{R_F}{h_T} \frac{B_{EFF}}{B_m} \quad (\text{Nuding, 1998}) \quad (6)$$

3. 수위-유량 계산

3.1 적용단면

수위-유량 계산의 적용단면은 독일 Baden주의 Enz강 4개 단면이다. Enz강은 인공적으로 하천을 사행시키기 위해 Karlsruhe공대의 수리, 수문, 생태학적 연구결과에 의해 만들어진 다양한 모형을 사용하여 하천의 자연성이 회복되도록 하천정비를 실시하였다. 그 결과 단조로운 하천단면에서 자연생태계가 복원되고 하천주변의 환경이 생태계보전 지구로 변화함과 아울러, 하천주변의 공원과 연계하여 자연과 인간이 공존하는 공간으로 변화하였다. 그림 1은 본 연구의 4개 적용단면의 형태이다. 4개 단면의 특징을 살펴보면 A, C, D는 복단면, B는 반복단면형태이다. 식생의 존재하는 위치는 A단면의 경우 양안 홍수터, B와 C단면은 한측은 홍수터 반대측은 호안, D단면의 경우는 양안 모두 호안에서부터 식생이 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

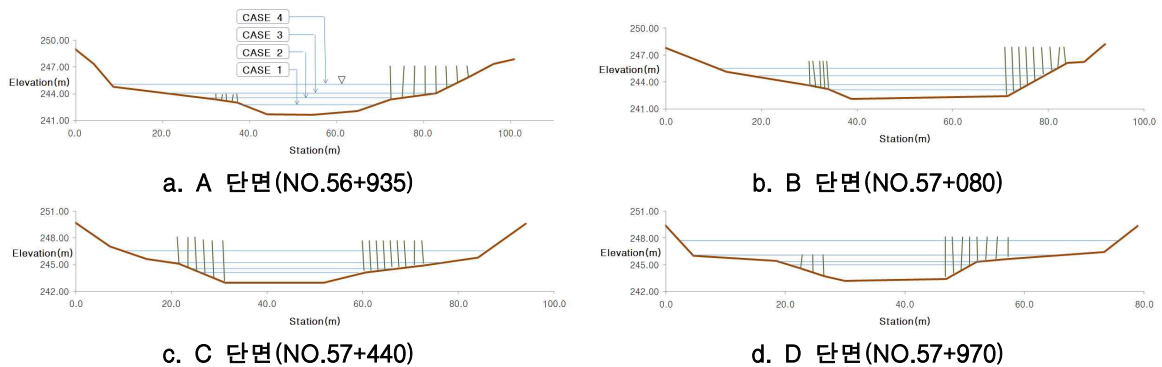


그림 1. Enz강 적용단면

3.2 계산 결과

Mertens와 Nuding의 방법으로 각각 주수로에서의 경계면 마찰저항을 산정하고 수위에 따른 유량을 산정한 결과 모든 경우에서 Nuding방법에 의한 유량이 Mertens방법에 의한 유량보다 크게 산정되었다. 이는 식생구역과 비식생구역 경계면에서의 운동량 교환 폭(contributing width)을 Nuding방법이 Mertens방법보다 상대적으로 작게 산정하고 이 때문에 마찰계수 또한 작게 산정된

결과로 판단된다. D단면의 저수위(CASE 1, 2)에 대해서는 계산유량이 과대 산정된 것을 확인할 수 있는데 D단면에서의 식재간격은 흐름방향으로 2.0 m, 흐름과 직각방향으로 좌안 2.0~3.0 m, 식생직경은 0.1 m로 식생의 밀도는 상대적으로 낮는데 반하여 식생경계면의 운동량 교환을 고려하게 되는 경우 상대적으로 커지는 운반의 영향으로 실제 마찰계수보다 작은 마찰계수를 산정하게 된 결과로 판단된다. Mertens방법은 호안에 식재된 경우의 실험결과를 바탕으로 마찰계수 산정식을 제시하였고, Nuding방법은 복단면 홍수터에 식생이 존재하는 경우의 실험결과로 마찰계수 산정식을 제시하였다. 따라서 복단면 양안 홍수터에 식생이 존재하는 A단면의 경우 Nuding방법에 의한 계산 유량이 식생의 영향이 확연히 발생하는 고수위에서 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있고, 양안 호안에 식생이 존재하고 있는 D단면의 경우 반대로 Mertens방법에 의해 계산된 유량이 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 한측은 홍수터, 반대측은 호안에 식생이 존재하는 B, C 단면의 경우 식생의 영향이 크게 발생하는 고수위에서 실측유량이 두 계산유량의 사이에 존재하고 있음을 확인하였다. 따라서 단면B와 C에 대하여 호안에 식생이 존재하는 경우에는 Mertens방법을 홍수터에 식생이 존재하는 경우에는 Nuding방법을 적용하여 유량을 계산한 결과 그림 3과 같은 결과를 보였다. 각각의 독립된 방법으로 산정하였을 때 보다 두 방법을 혼용하여 계산한 결과가 실측치와 더 일치함을 확인하였다.

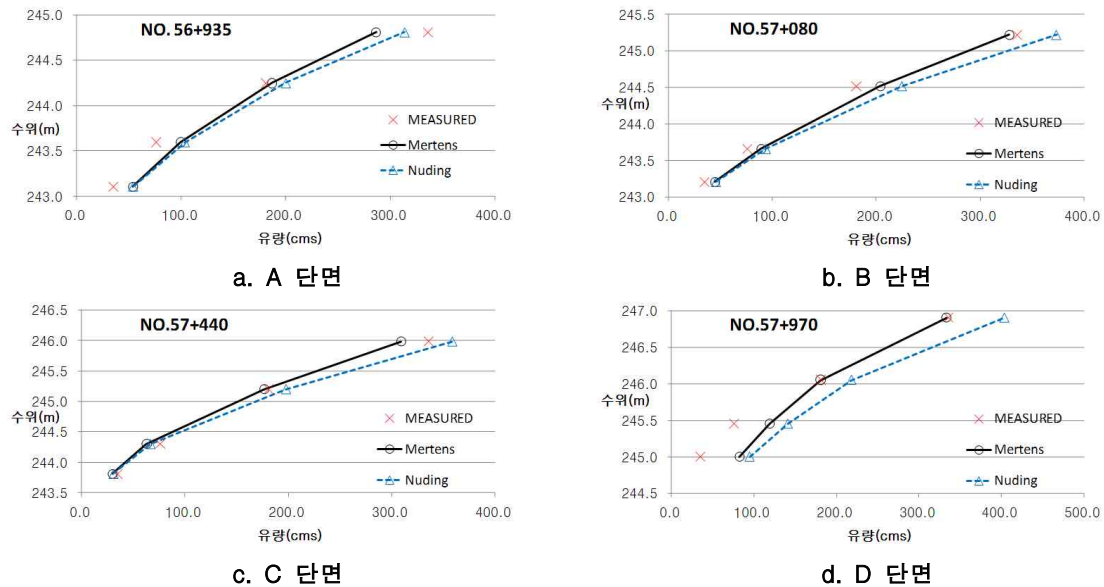


그림 2. 실측 및 계산 수위-유량 비교

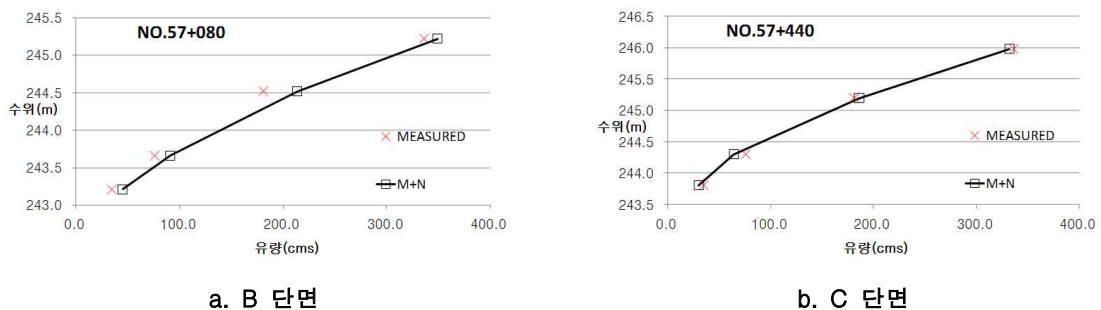


그림 3. Mertens와 Nuding방법 혼용 계산 수위-유량 비교

4. 결론

본 연구에서는 독일의 Enz 강의 4개 단면에 대하여 4가지 수위조건의 실측유량과 Mertens와 Nuding 방법에 의해 산정된 마찰계수를 이용하여 계산된 유량을 비교하였다. 비교결과 모든 단면에서 Nuding 방법이 Mertens방법보다 유량을 크게 산정하고 있음을 확인하였다. 이는 식생구역과 비식생구역 사이에서 운동량 교환이 발생하는 폭이 크면 클수록 경계면에서의 마찰은 증가하게 되는데 Nuding방법이 Mertens방법보다 운동량 교환 폭을 상대적으로 작게 산정하여 경계면의 마찰 또한 작게 산정한 결과로 판단된다. 그러나 단면의 형태와 식생이 식재된 위치에 따라 보다 실측유량과 일치하도록 계산하는 방법이 다르게 나타남을 확인하였다. 복단면의 홍수터에 식생이 존재하는 경우에는 Nuding방법이, 복단면 형태이더라도 식생이 호안에 존재하거나 단단면의 제방에 식생이 존재하는 경우에는 Mertens방법에 의해 계산된 유량이 실측유량과 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 Mertens와 Nuding방법에 의해 식생하도의 유속을 예측하는 경우 단면형태와 식생위치에 따라 단일 방법보다는 두 방법을 혼용하여 사용하는 것이 합리적일 수 있음을 확인하였으나 보다 많은 실측자료를 통한 검증은 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술혁신사업(03산학연 C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다.

참고 문헌

1. 김 원. (2009) 「이코리버21」 2차년도 개발기술 요약서, ECORIVER21 자연과 함께하는 하천 복원 기술개발 연구단.
2. 송주일, 원진영, 김종우, 윤세의 (2009) 식재된 수로에서 1차원 수치모형을 이용한 흐름특성 분석, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, pp. 661-664.
3. 윤세의, 정재욱, 김원화, 김환국. (1997) 수목이 있는 하도에서의 수위 예측, 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 69-74.
4. 이준호. (2006) 하천식생에 의한 수리특성 변화 분석, 박사학위 논문, 경기대학교.
5. 최성욱. (2005) 하도식재설계 기술 I, 도시홍수재해관리연구단
6. Helmiö. T. (2004) Flow Resistance due to Lateral Momentum Transfer in Partially Vegetated Rivers. Water Resources Reserch. Vol. 40, pp. 1-10.
7. Pasche, E., Rouve, G. (1985) Overbank Flow with Vegetatively Roughened Floodplains. Journal of Hydraulic Engineering 111(9), pp. 1262-1278.
8. Rickert, K. (1988) Hydraulische Berechnung naturnaher Gewässer mit Bewuchs. DVWK-Fortbildung 13, pp. 25-83.
9. Indlekofer, H. (1981) Überlagerung von Rauigkeitsein-flüssen beim Abfuß in offernen Gerimmen. Mitt. Institutfür Wasserbau und Wasserwirtschaft 37, pp. 150-145.
10. Mentens, W. (1994) Hydraulisch-sedimentologische Berechnungen naturnah gestalter Fließgewässer. DVWK.
11. Nuding, A. (1998) Zur Durchflußermittlung bei gegliederten Gerinnen. Wasserwirtschaft 88(3), pp. 130-132