

수위-유량관계의 불확실도 분석

Uncertainty Analysis of Stage-Discharge Relation

○차 준 호* · 윤 광 석** · 이 등 섭* · 김 원***

1. 서론

관측지점에서의 연속적인 유량기록은 수위자료에 레이팅을 적용함으로써 계산될 수 있다. 즉, 유량레이팅 곡선은 수위자료를 연속적인 유량으로 변환시킨다. 또한 레이팅곡선은 관측된 유량을 수위수문곡선으로 변환 하는데 이용되어진다. 유량곡선은 하도구간과 흐름에 따라서 단순, 혹은 복잡한 형태로 분류할 수 있는데 유량이 수위만의 관계가 될 경우가 단순한 경우이며 유량을 수위만의 함수로 나타낼 수 없는 경우가 복잡한 경우이다. 수위-유량관계는 일정기간동안의 수위와 유량의 측정으로부터 계산되어진다. 유량은 유속측정자료로부터 계산되어지므로 일반적으로 수위-유량관계를 개발하기 위해서는 많은 유량과 수위측정자료를 필요로 한다. 수위-유량관계의 개선을 위해서는 기존의 수위-유량관계에 대한 정확도를 알 필요가 있다. 유량자료의 활용측면에서 자료에 내재되어 있는 오차에 대한 불확실도 분석은 중요한 의미를 가진다. 국내의 경우 지금까지 수위-유량관계의 개발, 활용 등에서 발생하는 오차에 대해 체계적으로 분석한 연구가 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 유량관련 오차 중에서 수위-유량관계 오차 분석방법을 조사하고 실제 적용을 통해 우리나라에서 사용되고 있는 수위-유량관계에 대한 불확실도를 분석하였으며 개선방안을 도모하였다.

2. 수위-유량관계의 복잡성

기존 국내의 수위-유량관계를 나타내는 레이팅곡선은 수위만의 함수로 유량을 산정할 수 있도록 개발되었다. 부정류에서의 에너지경사는 변화하기 때문에 결과적으로 수위-유량관계를 나타내는 레이팅곡선은 수위만으로 유량을 결정할 수 없다. 수위-유량관계를 개발하기 위한 유량측정은 하천유속과 흐름단면을 측정함으로써 결정된다. 유속은 한 단면 내에서 위치에 따라 유속은 변하더라도 한 지점의 수심과 흐름방향유속이 변하지 않으면 등류라는 개수로 등류 가정에 의해서 측정되며 실제로 하천흐름은 비정상 부정류이기 때문에 측정시간에 따른 평균값과 측정 시의 수위변화를 고려하여 불확실성을 줄이기 위한 노력이 행해지고 있다. 관측수위를 이용하여 연속적인 유량을 알기 위해서 수위-유량관계가 개발, 이용되고 있으며, 국내에서 이용되는 수위-유량관계는 금년도 측정자료와 기측정 자료에 대한 회귀식을 계산하여 상관계수를 비교하여 개발되며 많은 경우 정상 등류 가정 하에서 개발되고 있는 것이 현실이다. 실제 흐름은 비정상 부정류이기 때문에 수위-유량관계를 개발하는 데는 주의가 필요하다.

유량, Q 는 마찰경사, S_f 에 의해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = C_m \alpha S_f^{1/2} \tag{1}$$

여기서 C 와 α 는 매개변수이며, $m = A/P$, 그리고, P 는 윤변이다.

식 (1)의 관계와 연속방정식과 운동량방정식을 이용하여 유량식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = Q_s \left[1 - \frac{1}{S_0} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{S_0 g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{S_0 g} \frac{\partial V}{\partial t} \right] \tag{2}$$

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
 *** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원

여기서 S_0 는 하상경사이며 Q_s 는 등류유량이다. 식 (2)는 루프레이팅곡선으로 알려져 있다. 식 (2)는 그림 1과 같은 루프형의 특징을 갖는다. 간략화된 운동파모형에서 $Q = Q_0$ 이며 흐름은 비정상등류가 된다. 수면경사, 하상, 그리고 에너지경사는 서로 평행하게 되며 유량은 수위만의 함수가 된다. 등류흐름일 경우 식 (1)은 식 (3)과 같으며 전형적인 식은 Chezy식과 Manning식이다.

$$u = CR^\alpha S_0^\beta \quad (3)$$

여기서 u 는 평균유속, R 은 수리반경, S_0 은 하상경사이고 α 와 β 는 매개변수이다.

그림 1은 전형적인 루프형 수위-유량관계를 나타내기 위해 1차원 운동량방정식을 이용하여 이상적인 직사각형 수로에서 조도계수와 하상경사가 일정한 경우 수위변화율에 따라 계산된 수위-유량관계를 도시한 것이다. 수위상승과 하강시의 유량 크기가 달라 루프형을 나타내고 있다. 그림 1에서의 두 점은 최대유량(A)과 최대수위(B)를 나타낸다.

상류가정에서 주어진 유량에 대한 관측소 수위는 하류의 통제요소의 영향을 받는다. 통제는 수위변화에 대해서 독립적으로 작용하거나 또는 다른 통제와 관계가 있게 된다. 하천에서의 수위에 대한 통제요소는 배수와 관련이 있으며 통제가 변화하지 않는다면 배수 또한 변화하지 않으므로 유량은 수위만의 함수가 된다. 또한 수면경사는 변화하지 않는다. 통제요소의 변화는 수위와 경사를 변화시키는데 이때 유량은 유량과 강하의 함수로 나타낼 수 있게 된다. 변화하는 유량에 대해서는 레이팅의 개발 시에 레이팅적합이 필요하게 되며 Boyer방법과 Wiggins방법 등이 있다(USGS, 1982).

3. 수위-유량관계의 불확실도 분석기법

수위-유량관계에서 불확실도를 결정하기 위해서는 대수변환을 통해서 관계식을 선형화하는 것이 편리하다. 일반적인 수위-유량관계식은 다음과 같다.

$$Q = C(h + a)^n \quad (4)$$

여기서 C 는 무차원계수, h 는 수위, a 는 회귀식을 선형화하기 위해 영유량을 나타내는 기준면보정, 그리고 n 은 경험적인 예외가 존재하지만 1.5-2.5사이의 하천상태를 반영하는 멱지수이다. 양변에 자연로그를 취하면 식 (4)는 식 (5)와 같다.

$$\ln Q = \ln C + n \cdot \ln(h + a) \quad (5)$$

신뢰수준 95%에서의 추정치의 표준오차, S_e 는 식 (6)과 같다.

$$S_e = \left[\frac{\sum (\ln Q_i - \ln Q_c)^2}{N-2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

여기서 Q_i 는 유속계를 이용한 유량측정치이며 Q_c 는 레이팅에 의해 계산된 유량으로 식 (7)과 같다.

$$Q_c = C(h + a)^n \quad (7)$$

평균에 대한 표준오차, S_{mr} 은 식 (8)에 의해서 계산된다(Hersch, 1995a; ISO 7066/1, 1989; 1100/2, 1998).

$$2S_{mr} = \pm t S_e \left\{ \frac{1}{N} \frac{\ln(h+a) - \overline{\ln(h+a)}}{\sum \ln(h+a) - \overline{\ln(h+a)}} \right\}^{1/2} \times 100 \quad (8)$$

여기서 t 는 수위-유량관계에 있어서의 소자료크기에 따른 검정통계량이다. $\log_e(h+a) = \overline{\log_e(h+a)}$ 일 때 최소가 되어 아래 식 (9)와 같이 간략화 된다.

$$S_{mr} = \frac{tS_e}{\sqrt{N}} \quad (9)$$

3. 국내 수위-유량관계의 불확실도 분석

1995년 ISO를 포함한 7개의 국제기구는 측정에 있어서의 불확실도 분석에 대한 안내서를 개발하였고 이러한 결과는 ISO를 통해 발간되어 전 세계 기관과 국가들은 불확실도 분석에 있어서 ISO의 절차와 기준에 따라 불확실도 분석을 행하게 되었다. 따라서 국내에서 개발된 수위-유량관계의 불확실도분석을 통하여 기존의 개발방법을 제고할 필요가 있다. 국내 수위-유량관계의 불확실도 분석을 위해서 1999년과 2000년의 5대강 수위-유량관계에 대해서 불확실도 분석이 이루어졌다. ISO 8363(ISO, 1997)의 수위-유량관계를 이용한 유량산정의 경우 추정치에 대한 표준오차의 경우 10%, 평균에 대한 표준오차의 경우 5%가 획득가능한 불확실도로 규정하고 있다. 국내 수위-유량관계에 대한 불확실도 분석결과 추정치에 대한 표준오차와 평균에 대한 표준오차가 ISO기준에 대해서 적게는 5배에서 많게는 30배 이상의 불확실도를 나타내었다. 이러한 수치는 국내 수위-유량관계에 대한 개발방법에 대한 제고를 필요로 한다. 그림 2는 국내 수위-유량관계에서의 추정치에 대한 불확실도를 나타내며 그림 3은 평균에 대한 불확실도를 나타낸다. 그림에서 사각형 막대는 1999년 자료를 원형막대는 2000년 자료를 나타낸다. 1999년의 경우 추정치에 대한 불확실도와 평균에 대한 불확실도는 $\pm 81.22\%$, $\pm 23.55\%$ 이며 2000년의 경우 1999년 자료보다 증가해 각각 $\pm 113.25\%$ 와 $\pm 34.34\%$ 를 나타내고 있다. 이는 전국평균이며 5대강 수위-유량관계의 불확실도를 감안하면 그림에서 보듯이 금강의 2000년에 개발된 수위-유량관계의 경우 ISO와 비교하여 추정치에 대한 불확실도의 경우 30배의 차이를 보이고 있다. 표 1에 5대강 불확실도 분석결과가 나타나 있다.

4. 결론

수위-유량관계에서의 불확실도 분석을 통하여 기 개발된 수위-유량관계의 불확실도가 분석되었다. 수위-유량관계를 개발하기 위해서는 많은 유량측정자료를 필요로 하기 때문에 국내의 경우 급회 측정자료로 개발된 수위-유량관계와 전 자료를 이용한 수위-유량관계에 대해서 상관계수비교를 통하여 개발되고 있는 것이 현실이다. 분석결과 불확실도가 ISO 기준에 대해서 5-30배 정도임을 알 수 있었다. 하천유량은 비정상 부동류이기 때문에 유량은 수위만의 함수로 나타내어 질 수 없는 점을 감안하여 수위-유량관계 개발 시에 주의가 필요하다. 수위-유량관계에 대한 불확실도는 수위-유량관계의 개발방법에 따라 감소할 수 있기 때문에 국내 수위-유량관계 개발방법의 제고가 필요하며 통계와 부동류요소를 감안한 수위-유량관계의 적합을 통한 분석이 차후에 행해져 수위-유량관계의 불확실도를 줄이는 노력이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Herschy, R. W., 1999, Hydrometry, John Wiley & Sons.
2. ISO 748, 1997. Measurement of liquid flow in open channels -Velocity-area methods-. ISO, Geneva.
3. ISO/TR 8363, 1997. Measurement of liquid flow in open channels -General guidelines for selection of method. ISO, Geneva.
4. ISO 748, 1997. Measurement of liquid flow in open channels -Velocity-area methods-. ISO, Geneva.
5. ISO 1100/2, 1998. Measurement of liquid flow in open channels -Part 2: Determination of the stage-discharge relation. ISO, Geneva.
6. S. E. Rantz et al., 1982. Measurement and Computation of Streamflow: vol. 1, USGS.
7. S. E. Rantz et al., 1982. Measurement and Computation of Streamflow: vol. 2, USGS.

표 1. 수위-유량관계의 불확실도 분석

유역	1999년		2000년	
	평균에 대한 표준오차 (%)	추정치에 대한 표준오차 (%)	평균에 대한 표준오차 (%)	추정치에 대한 표준오차 (%)
한강 임진강	평균=±21.62%	평균=±70.11%	평균=±34.89%	평균=±86.26%
북한강 안성천	평균=±34.74%	평균=±120.62%	평균=±39.07%	평균=±112.23%
남한강	평균=±16.85%	평균=±59.93%	평균=±22.25%	평균=±57.61%
금강	평균=±40.92%	평균=±92.97%	평균=±88.40%	평균=±287.36%
낙동강	평균=±11.55%	평균=±41.28%	평균=±19.11%	평균=±50.60%
성진강	평균=±27.84%	평균=±182.17%	평균=±28.81%	평균=±131.76%
영산강	평균=±10.36%	평균=±51.45%	평균=±10.84%	평균=±56.73%
전국	평균=±21.86%	평균=±71.22%	평균=±39.34%	평균=±113.25%

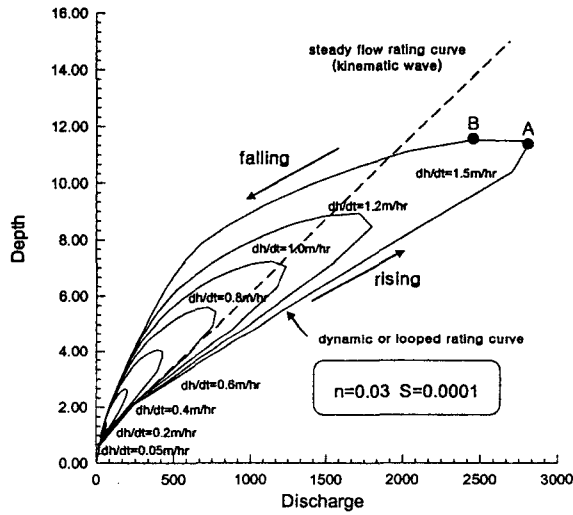


그림 1. Looped rating curve

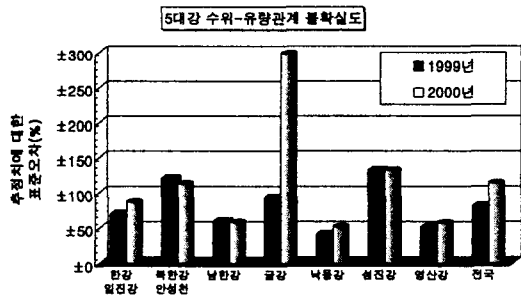


그림 3. 추정치에 대한 표준오차

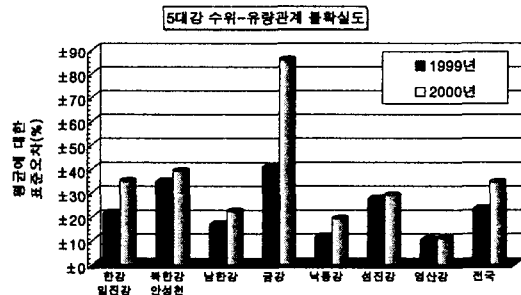


그림 4. 평균에 대한 표준오차