

수위-유량곡선의 보정기법 소개



이 우 석 |

한국수자원공사 K-water 교육원 교수
leews@kwater.or.kr

1. 수위-유량 관계곡선

수위-유량 관계곡선은 수위와 유량간의 관계를 곡선으로 나타낸 식이다. 이러한 관계는 이론적으로 하천수리학의 등류(uniform)에서의 유속공식에서 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= CR^V S^W \\ Q &= ACR^V S^W \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 V 는 평균속도(mean velocity), C 는 조도계수(roughness coefficient), R 은 수리반경(hydraulic radius), V, W 는 지수상수이다. 단면적의 기하학적 형상, 조도계수 등이 수심에 따라 거의 일정하다는 가정에서 멱함수 형태의 수위-유량곡선을 유도할 수 있다. 즉, $CS^W = K_1$ 이라 놓고 $AR^V = K_2 y^z$ 라 놓는다면 다음 식이 성립된다.

$$Q = Ky^z \quad (2)$$

위의 유도과정에서 알 수 있듯이 수위-유량 관계식은 안정되게 하도지점이 통제되었을 때 의미가 있다. 이러한 수위-유량곡선의 통제(control)에는 단면통제(section control)와 하도통제(channel control)로 나눌 수 있다. 단면통제는 자연적인 암반, 전석으로 뒤덮힌 여울(riffle), 보나 위어 또는 flume 같은 인공구조물로 인해 발생한다. 하도통제는 하도의 크기, 경사, 조도, alinement, 축소 및 확대, 형태 등 거의 모든 물리적인 요소가 작용하게 된다. 또한 저수위에서는 단면통제가 일어나고, 그 이상의 수위에서는 하도통제가 일어나는 복합통제의 경우도 있게 된다. 이러한 수위-유량관계의 안정성은 유량 측정의 횟수와 시기에 큰 영향을 미친다. 만약 하도가 안정적이면 1개월에 1회 정도 측정해도 되지만, 하도가 모래로 이루어져서 불안정하다면 불규칙한 shift로 인해 더 자주 측정해야 할 것이다. 미국 USGS(Tillery 등, 2001)에서는 수위-유량관계의 안정성을 저수위와 고수위의 통제에 따라 다음 표 1, 표2와 같이 나타내고 있다. 우리나라에서도 수위-유량 단면의 안정성에 대해 유의하고 있지만, 이러한 안정성 평가기준이 확실히 정립되어 있지 않고 있다. 향후 이에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

표 1. 수위-유량 조절의 안정성 평가

Rating	조 건	비 고
1	저수위의 고수위의 통제가 극도로 불안정	충격하천
2	약간의 흐름 범위에서 극도로 불안정	충격하천+안정된 독
3	대부분의 흐름에 대해 비교적 안정	자갈하상+홍수에 침식되는 독
4	대부분의 흐름에 안정	자갈하상+안정된 독 관측위어+상하류에 침식과 퇴적이 일어나는 하도
5	모든 흐름에서 저수위-고수위 안정	콘크리트 단면통제+안정된 상하류 하도

출처 : Tillery 등, 2001.

표 2. 안정성 평가 예 (Maricopa County, Arizona)

Station number	Station name	Type of control	Control-stability ratings
09512162	Indian Bend Wash at Curry Road	Culvert	4
09512200	Salt River Tributary at Phoenix	Culvert	4
09513650	Agua Fria River at El Mirage	Gravel riffle ¹⁾	3
09513780	New River near Rock Springs	Gravel riffle ¹⁾	3
09513860	Skunk Creek near Phoenix	Concrete apron	4
09516500	Hassayampa River near Morristown	Shifting sand at low flows ¹⁾	2
09517000	Hassayampa River near Arlington	Gravel riffle (low-flowchannel) ¹⁾	2
09517490	Centennial Wash at Southern Pacific Railroad Bridge	Gravel riffle ¹⁾	3

¹⁾ Channel control when weir is buried by sand
출처 : Tillery 등, 2001.

2. 수위-유량 측정자료

Hersch (1985)는 수위-유량 자료의 측정오차를 통계적 기법으로 나타내었다. 측정오차에는 무작위 오차, 계통오차 및 실수에 의한 오차가 있는데 유량을 측정하는 과정에서 발생하는 오차들이

전파되어 최종 유량 관측값에 포함되는 잠재오차를 정량적으로 계산한 바 있다. 오차는 유속 측정방법, 유량을 산정하는 과정에 모두 포함되어 있다. 최종적으로 나타나는 유량측정자료의 오차는 참값에 대한 측정치의 차이이다. 동일한 수리, 수문학적인 조건하에서 충분한 수의 유량 측정이 가능하다면, 유량 측정의 평균값을 그 참값으로 간주할 수 있다. 따라서 오차는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^0_i = \frac{Q_i^0 - \overline{Q^0}}{Q^0} \quad (3)$$

여기서 e_i 는 동일한 조건에서 i 번째 유량측정의 오차, Q_i^0 는 동일한 조건에서의 i 번째 유량측정, $\overline{Q^0}$ 는 동일한 조건에서 유량측정의 평균값이다. 그러나 실제로 동일한 조건하에서 유량측정을 여러 번 반복하기에는 어려움이 많다. 따라서 실무에서는 2번 정도 측정해보고 정해진 오차 범위 안에 있으면 유량측정을 완료하고, 오차범위 밖이면 다시 측정을 시도하고 있다. 수문관측 매뉴얼(건설교통부, 2003)에서는 기존의 수위-유량 관계곡선도에 유량치를 나타내고 곡선에서 멀리 떨어진 값(10% 정도를 기준으로 함)을 조사하여, 멀리 떨어진 값이라면 그 원인을 규명하도록 되어 있다. 미국 USGS(Tillery 등, 2001)에서는 유량측정의 잠재오차(potential errors)를 다음 표와 같이 구분하고 있다. 아래의 표 3에서 간접방법(Indirect methods)은 경사면적법(slope-area method), slope-conveyance method, 위어(weir)에 의한 측정, Culvert에 의한 측정 등이 있다.

표 3. 측정 형태에 따른 잠재오차

Rating	Potential errors, in percent	Rating	Potential errors, in percent
Current-meter method		Indirect methods	
Good	≤ 5	Good	±10
Fair	≤ 8	Fair	±15
Poor	> 8	Poor	±25

출처 : Tillery 등, 2001.

3. 수위-유량곡선 Shift 조정 기법

이우석 등(2008)은 유량측정 자료의 오차 분포 등을 고려하여 수위-유량곡선식을 구하는 방법을 개발하였다. 우리나라는 최근 들어 유량측정의 신뢰도를 확인하고 재측정하는 과정을 도입하고 있으며 매번의 홍수 후 마다 수위-유량곡선을 개발하려는 시도를 하고 있지만 이는 유량측정의 정밀도를 수반하여야 하므로 대부분의 지점에서는 수위-유량곡선식 개발을 아직까지 연단위로 하고 있다. 이 연구의 핵심은 동일한 수위 또는 유사수위에서 홍수량의 차이가 크게 되면 그 유량측정에 대해서는 오차의 분산이 높게 나와 가중치는 훨씬 작아지게 된다. 그러한 결과로 회귀모형에 기여하는 정도가 낮게 되어 전체적으로 가중치를 고려한 매개변수 추정정이 이루어지게 된다.

미국 USGS는 이러한 표준절차에 따라 수위-유량곡선을 개발할 때 측정자료의 신뢰도를 먼저 검증하고 있으며 하상변동에 의해 수위-유량곡선이 바뀌었다고 판단되면 비록 한 번의 홍수가 지나갔다 할지라도 수위-유량곡선의 이동(shift)을 통해 정밀한 곡선을 다시 유도하고 있다(Kennedy, 1983). 하천유량이 특정단면의 지배하에 있다는 것은 바위, 댐, 위어, 플름 등의 단면지배와 하도의 경사나 바닥의 마찰력에 의해 지배받는 하도지배를 의미한다. 이러한 지배가 영구적인 시설물이라면 변하지 않을 수 있지만, 보통의 자연하천에서는 모래, 자갈하상으로 이루어져 홍수 또는 수생식물의 성장, 하천부유물 등에 의해 수위-유량 관계가 바뀔 수 있다. 이러한 변화를 수위-유량곡선에 반영하기 위해서는 각각의 변화에 따라 새로운 곡선을 그려야 한다. 미국 USGS에서는 각각의 변화에 대한 새로운 곡선을 그리는 대신, shifting-control method를 보정 방법으로 사용하고 있어(Kennedy, 1983), 이러한 방법을 정리하여 기술하였다.

유량측정은 25개 측선에서 기기오차와 샘플링오

차로 약 4%(1점법), 2.5%(2점법)을 나타낸다고 한다. 그 외 부수적인 오차(현장조건 및 관측원의 숙련도)을 감안하면 오차범위는 5%라고 볼 수 있다. shift 조정을 하기 전에 실제 차이 백분율을 계산하여야 한다. shifting-control method는 5% 이내의 범위에서는 사용치 않는다. 실제로 모든 측정자료가 5%이내에 있으면 shift 조정은 불필요하다. 그러나 한쪽에 몰려있다면 이는 조정대상이다. 책임 있는 수문기술자가 shift가 필요한지, 과거의 곡선을 그대로 써야할지 결정하여야 한다. 차이백분율은 수위-유량곡선의 계산된 유량과 관측유량의 차이를 계산유량으로 나누어 100을 곱하면 된다.

저수위 지배는 침식, 퇴적, 수중생물의 성장, 배수위 영향 등으로 저수위에서 shift가 가장 크고 고수위로 갈수록 줄어든다. 이를 stage-variable shift라 한다. 만약, 충적하천에서 하상이 유사에 의해 하강하거나 상승한다면 수위에 따른 shift 변화는 시간에 따른 shift의 변화에 비해 무척 작다. 대부분의 하천은 수위에 따라 shift가 변하며, 이러한 stage 변동은 시간에 따라 변한다. 그림 1에서 수위 이동(stage shift)가 수위-유량 곡선에 끼치는 영향을 여러 가지 경우에 대해 설명하고 있다. 동일한 stage에서 shift가 마이너스(-)이면 수위-유량곡선은 그 만큼 위로 이동하게 된다. 이러한 stage shift 조정은 자동으로 이루어지든지(Automatic Data Process, ADP), 수작업으로 이루어지게 된다. 그림 2에서는 실제 수위-유량 측정 자료를 가지고 수위-이동-곡선변동 diagram을 만드는 과정을 설명하고 있다. 그림 2의 45번(7월 7일 측정값)을 살펴보면 수위 1.7 ft에서 9.7 cfs를 나타내고 있어 기존 유량측정 값보다 적게 나왔음을 알 수 있다. 기존 곡선(base curve)에서 9.7 cfs의 유량은 1.48 ft에서 발생하였으므로 수위 이동은 -0.22 ft가 일어났다고 해석된다. 좀 더 정교하게 보정한다면 이러한 수위 이동이 시간에 따라 변동된다고 가정하여 그림 3과 같이 시간에 따른 수위-이동-관계곡선 diagram을 개발하는 것이다.

이는 수위-유량 곡선의 불안정성이 매우 큰 지점에 사용가능하다. 적용가능하고, 더욱 정밀한 유량측정이 수반될 때

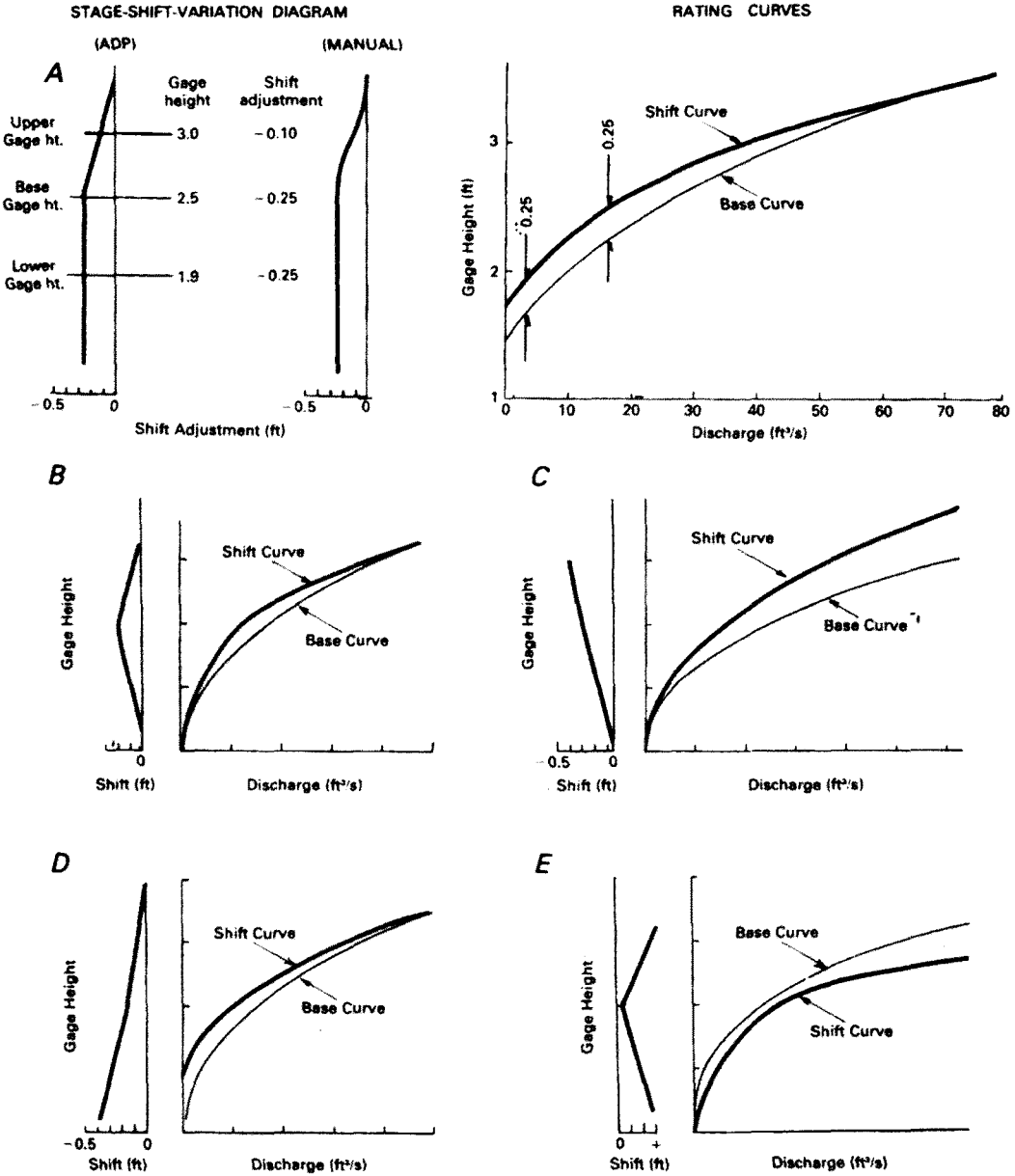
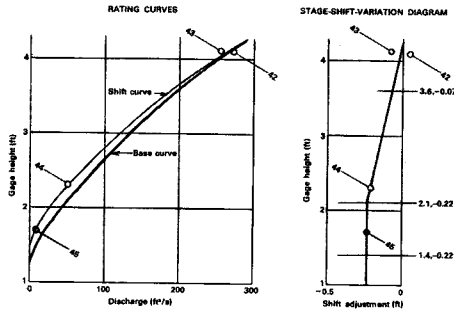


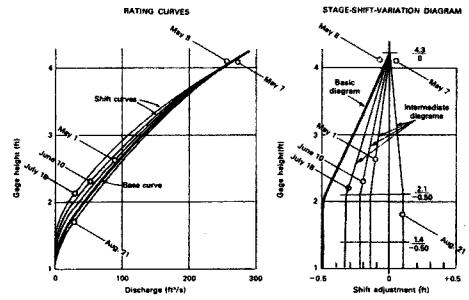
그림 1. Stage-shift-diagram이 수위유량곡선에 미치는 효과 (Kennedy, 1983)



COMPUTATIONS

No.	Date	Gage height	Discharge	Shift adjustment computed from		% diff.
				Mean	W. diag.	
42	May 7	4.08	273	+0.06	-0.02	+4.2
43	May 8	4.10	267	-0.07	-0.02	-3.8
44	June 10	2.30	63.2	-0.20	-0.20	---
45	July 7	1.70	8.7	-0.22	-0.22	---

그림 2. Stage-shift-variation diagram 개발 과정 (Kennedy, 1983)



COMPUTATIONS

No.	Date	Gage height	Discharge	Shift adjustment computed from		% diff.
				Mean	W. diag.	
41	May 1	2.63	30.0	-0.10	-0.10	---
42	May 7	4.08	273	+0.06	-0.02	+4.2
43	May 8	4.10	267	-0.07	-0.02	-3.8
44	June 10	2.30	63.2	-0.20	-0.20	---
45	July 18	2.13	29.6	-0.30	-0.30	---
46	Aug. 21	1.70	30.1	+0.12	+0.12	---

그림 3. Time-shift-variation diagram 개발 과정 (Kennedy, 1983)

4. 결론

하도의 불안정성을 고려하기 위해 우리나라에서는 홍수기 전후로 유량측정을 실시하여 새로운 수위-유량 관계곡선을 만들고 있다. 그러나 실제 적용되는 수위-유량 곡선은 수년(water year)이 아닌 일 년 단위로 이루어지고 있어 측정과 적용의 불일치가 발생되고 있다. 수위-유량곡선의 적용 시기는 회계 연도의 1년 단위가 아니라 홍수기 이후부터 다음 홍수기 이전까지를 명시함이 바람직하다고 생각된다(예 : '08. 8. ~ '09.7). 또한 홍수기 이후부터

라도 계절적 변화로 인해 수위-유량곡선의 shift가 발생할 수 있으며 정기적인 측정을 통해 이를 수위-유량곡선을 보정할 필요가 있다. 홍수 후 마다 수위-유량곡선의 변동을 파악하여 새롭게 수위-유량곡선식을 개발할 경우 신뢰성 있는 충분한 관측 자료 숫자가 확보되어야 하며, 숫자가 적을 경우에는 곡선식의 신뢰도가 저하될 우려가 있다. 특히 수위-유량 곡선은 수문관측에서 중요한 요소이므로, 미국 USGS의 수위-유량곡선 보정기법 등을 참고하여 우리나라에서도 정확한 곡선식의 추정과 보정에 대한 기준을 정립함이 필요하다고 판단된다. ☞

참고문헌

1. 건설교통부 (2004), 수문관측 매뉴얼.
2. 이우석, 김상욱, 정은성, 이길성 (2008), “의사우도추정법에 의한 분산함수를 고려한 수위-유량 관계 곡선 산정법 개선”, 한국수자원학회 논문집 제41권 제8호, 한국수자원학회.
3. Herschy, R. W. (1985). Streamflow Measurement, Elsevier Applied Science Publishers, M.O.
4. Kennedy, E. J. (1983). Computation of Continuous Records of Streamflow, U.S. Department of the Interior.
5. Tillery, A. C., Phillips, J. V., and Capesius, J. P. (2001). Potential Errors Associated with Stage-Discharge Relations for Selected Streamflow-Gaging Stations, Maricopa County, Arizona, Water-Resources Investigations Report 00-4224, USGS.