

감조하천에서 복합 수위-유량관계곡선 개발에 관한 연구

A Study on the Complex Stage-Discharge Rating Curve Development in Tidal River

이신재*, 정성원**, 이진원***, 박상우****

Sin Jae Lee, Sung Won Jung, Jin Won Lee, Sang Woo Park

요 지

본 연구는 감조하천에서 조위의 영향을 크게 받는 저·평수위의 수위-유량관계곡선식 개발의 한계를 극복하기 위해 조위의 영향을 고려한 다변수 복합 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 곡선식 개발은 수위-수면차-수위차-유량의 관계를 통해 지수형 곡선식을 개발하였다. 여기서 수면차는 조위와 수위와의 차이이며, 이때 조석파의 전파시간에 대한 지체시간을 고려하였다. 수위차는 대상 수위관측소의 전 시간과의 수위차이다. 또한 조위에 의해 발생하는 역유량 자료를 이용한 지수형 곡선식을 개발하고자 유량 조정변수를 추가하였다. 개발된 수위-유량관계곡선식을 한강대교에 적용하여 자동유량측정시설에서 측정된 유량자료와 비교 검토한 결과 경향성에서 일치하였으며, (-)유량의 산정도 가능하였다. 분석기간내의 총 유출량 검토 결과 8.3%의 오차를 보여 본 과업에서 제시된 복합 수위-유량관계곡선식의 적정성을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 조위, 복합 수위-유량관계곡선, 유량 조정변수

1. 서 론

일반적으로 자연하천에서 수위-유량관계는 수위의 상승 및 하강에 따라 유량변화가 일정한 경향성을 가지고 변동을 하기 때문에 단일함수 관계로 설명이 가능하다. 하지만 조위의 영향을 받는 감조하천 구간에서는 수위와 유량만의 단일함수 관계가 아닌 조위의 영향에 따라 수위 및 유량이 변동하는 특성을 가지고 있어 일반하천에 비해 수위-유량관계를 규명하는 것이 난해하다. 또한 조위의 영향에 의해 무강우에도 수위의 변동이 심한 특성을 가지고 있어 유량측정 역시 일반하천에서와 달리 신속한 측정이 필요함으로 기존의 유속계에 의한 방법으로는 측정이 어렵다. 그리고 조위의 주기에 따라 역유량(하류에서 상류로의 흐름; (-)유량)이 발생하는 경우도 있기 때문에 측정이 매우 어렵다.

최근에 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 유속계 및 자동유량측정시설이 국내에 도입됨에 따라 감조하천에서 유량측정이 기존의 유속계에 의한 것보다 신속하게 측정할 수 있어 측정에 대한 문제점은 어느 정도 해소할 수 있다. 하지만 측정된 수위-유량자료를 이용하여 수위-유량관계곡선식을 개발하는 것은 아직까지 국내·외를 막론하고 명확히 해결하지 못하는 어려운 문제점으로 남아 있다.

지금까지 국내에서 감조하천에 대해서 제시된 수위-유량관계곡선식은 일반 자연하천에서와 동일하게 수위와 유량만의 함수로 식을 제시하여 이용되고 있다. 이러한 기존식은 조위의 영향을 전혀 고려하지 못하기 때문에 저·평수위에서 실측유량과 많은 편차를 보이며, 동일 수위에 대한 다양한 유량을 중간값 개념으로 수위에 대한 유량을 산정하는 것으로 매 시간마다 수위에 대한 유

* 정회원·유량조사사업단 영산강그룹장·E-mail : lsj@kict.re.kr
** 정회원·유량조사사업단 단장 ·E-mail : swjung@kict.re.kr
*** 정회원·유량조사사업단 유량조사실장·E-mail : jwlee@kict.re.kr
**** 정회원·서남대학교 토목공학과 교수 ·E-mail : psw0232@seonam.ac.kr

량은 큰 편차를 보이게 된다. 또한 고조(High Tide)에서는 유량이 과대 추정되며 저조(Low Tide)에서는 유량이 과소하게 산정된다(이재형과 황만하, 1994). 그리고 감조하천에서는 만조시 역유량이 발생하기도 하는데, 기존의 수위-유량관계식으로는 역유량 즉 (-)유량을 고려하지 못하고 곡선식을 만들었기 때문에 모든 수위에 대해 (+)유량이 계산되어지는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 감조하천에서 조위의 영향을 크게 받는 저·평수위에 대한 수위-유량관계곡선식 개발의 한계를 극복하기 위해 조위의 영향을 고려하고 만조에 의한 역유량을 산정할 수 있도록 다변수를 이용한 복합 수위-유량관계곡선식을 개발하고자 한다. 대상지점으로는 조위의 영향을 받는 한강하류부의 한강대교 지점을 선정하였으며, 이용된 수위-유량자료는 한강대교에 설치되어 운영되고 있는 T/M 수위자료와 자동유량측정시설에 의해 측정된 유량자료를 이용하였다.

2. 적용이론

일반하천의 경우 유량(Q)과 수위(h)의 관계는 식 1과 같이 수위를 독립변수로 하고 유량을 종속변수로 하는 지수형의 회귀식으로 나타낸다.

$$Q = a(h - e)^b \quad (1)$$

여기서 a, b 는 회귀계수이고, e 는 영유량 수위(GZF, Gage of Zero Flow)로서 단면에 따른 특성값이다.

위의 수위-유량관계는 하천 지형이 변하지 않거나 변화가 거의 없는 곳에서 적합한 관계식이며, 하천의 수면경사는 흐름 형태에 관계없이 실제적으로 일정하다고 가정된 것이다. 하지만 조위의 영향을 받는 지점에서는 조위에 의해 하구의 조석파는 상류로 진행하면서 단파(Bore) 등을 형성한다(이재형 등, 1994). 이러한 이유로 수면경사는 실시간으로 변화되고, 동일 수위에서도 조위의 조고에 따라 수면경사는 변하게 된다. 또한 조고가 대상 수위관측소의 수위보다 높게 되면 수면경사는 역경사가 되고, 가속수도 역시 음의 값을 갖기 때문에 역유량이 발생한다. 이와 같은 상황에서는 수위-유량의 관계를 두 변수만의 관계로 규정할 수 없으며 수정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 식 2와 같이 대상 수위관측소의 상·하류간의 수면차 D 와 대상 수위관측소의 수위 변화고 d_h 를 고려하여 수정하였다.

$$Q = f(h, D, d_h) \quad (2)$$

여기서 수면차 D 는 흐름방향을 결정하는 방향벡터의 역할을 하고, 수위 변화고 d_h 는 일정 시간동안의 체적의 변화 즉 유량의 변화를 의미하는 것으로 양을 결정하는 인자가 된다.

일반적으로 유량과 수위의 관계에 있어서는 지수형의 회귀식이 적용성이 높다는 것을 고려한다면 식 2는 식 3과 같은 지수형의 다중회귀식으로 가정할 수 있다.

$$Q = a(h + c_0)^{b_0}(D + c_1)^{b_1}(d_h + c_2)^{b_2} \quad (3)$$

여기서 c_0, c_1, c_2 는 하도 및 단면의 특성에 따른 값을 가지나 실제적으로 조위의 영향을 받는 지점에서는 하도 및 단면의 특성 보다는 조위에 직접적으로 영향을 받기 때문에 회귀분석을 실시할 때 임의로 다수의 값을 선택하여 최적의 값을 찾는 시행착오법으로 구한다.

식 3과 같은 지수형의 식을 개발하기 위해서는 로그변환을 통한 다중선형회귀모형을 만족해야 한다. 하지만 조위의 영향으로 역유량이 발생하는 지점의 경우 역유량, 즉 (-)유량에 대한 로그변환을 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 변수 Q_r 이 도입된 식 4와 같은 수정 지수식을 도입하였다.

$$Q = a(h + c_0)^{b_0}(D + c_1)^{b_1}(d_h + c_2)^{b_2} + Q_r \quad (4)$$

여기서 Q_r 은 유량조정변수로서 측정된 (-)유량을 로그변환 시키기 위한 임의의 변수이다.

3. 복합 수위-유량관계곡선식 개발

3.1 대상지점 및 이용자료

본 연구에서는 복합 수위-유량관계곡선식을 개발하기 위해 한강 하류부에 위치한 한강대교의 수위자료 및 자동유량측정시설(ADVM, Acoustic Doppler Velocity Meter)의 유량자료, 인천 조위 관측소의 조위자료를 이용하였다. 분석기간은 큰 강우가 없었던 2007년 6월 1~25일까지의 30분 자료를 이용하였다. 그림 1은 한강대교의 수위와 ADVM에 의한 유량자료, 인천 조위자료이며, 그림에서 보는 바와 같이 인천 조위에 따라 수위 및 유량이 주기적으로 진동하는 것을 볼 수 있다. 또한 유량자료는 상류에서 하류방향의 (+)유량 뿐만 아니라 조석파에 의해 하류에서 상류방향의 (-)유량도 발생하는 것을 볼 수 있다.

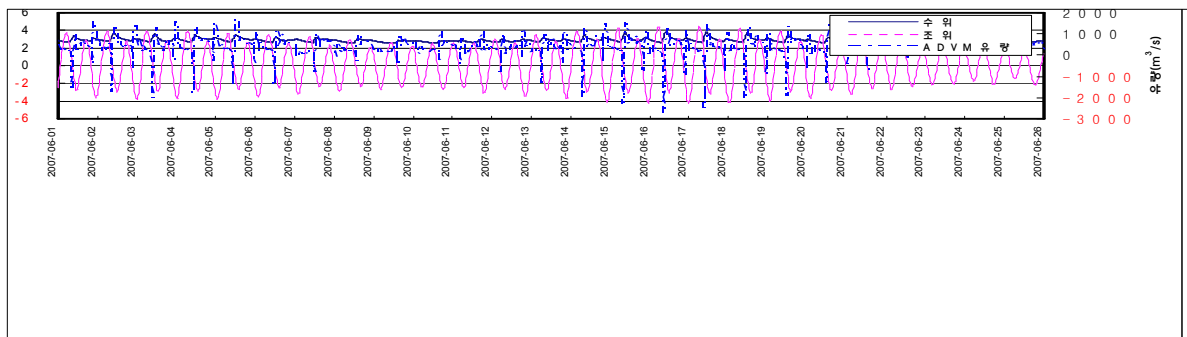


그림 1. 한강대교 수위 및 유량, 인천 조위자료

3.3 복합 수위-유량관계곡선식 개발

한강대교 수위관측소에서의 복합 수위-유량관계곡선은 한강 하류부에 위치한 신곡수중보의 영향과 조위-수위-유량 관계 분석의 결과에서처럼 조석파의 지체시간 등을 고려해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 한강대교의 수위와 인천 조위관측소와의 수면차(수위-조위)는 조위-수위-유량 관계 분석 및 상관분석을 통해 상관계수가 가장 좋은 3시간의 지체시간을 고려하였다.

또한 유량은 간조시와 만조시에 다른 경향을 보이고 있기 때문에 간조와 만조로 구분하여 복합 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 그리고 만조시에 대해 신곡수중보(EL. 2.400m)의 영향을 고려하여 두 개의 곡선식을 개발하였다. 만조시 복합 수위-유량관계곡선식의 분리는 EL. 3.00m를 기준으로 하였다. 이러한 이유는 신곡수중보의 표고가 EL. 2.400m로서 조위가 EL. 2.400m 이하일 경우 한강대교에 조석파의 영향이 없게 된다. 또한 신곡수중보의 표고를 넘는 조위에 대해서도 신

곡수중보와 한강대교의 거리가 약 19.0km로서 조석파가 한강대교에 이르는 시간이 있기 때문에 실제 조위가 EL. 2.400m 이상에서도 어느 조위까지는 영향이 없거나 미비하게 된다. 따라서 본 연구에서는 신곡수중보의 높이인 EL. 2.400m 부터 EL. 3.400m 까지 0.10m 증감시키면서 곡선식을 개발하고, 이 중 가장 상관계수가 가장 높고 표준편차가 가장 작은 만조 최고 조위인 EL. 3.00m 를 결정하였다.

수위 변화고는 상관분석 및 수위 증감검토를 통해 간조시 30분 전 수위와의 차, 만조시는 1시간 전 수위와의 차를 각각 이용하였다.

위의 자료를 이용하여 회귀분석을 통해 복합 수위-유량관계곡선식을 개발한 결과는 표 1과 같다. 표 1의 간조시 변수들 중 유량조정변수 Q_r 의 결정은 분석 자료 중 최대 (-)유량인 -2,696.7 m^3/s 보다 큰 -3,000으로 결정하였다. 한강대교에서 (-)유량은 만조시 조위가 상승하면서 조석파에 의해 발생하지만, 조석파의 지체시간에 의해 실제 (-)유량은 조위 기준으로 간조시 수위가 하강하면서 발생한다. 따라서 유량조정변수 Q_r 은 만조시에는 필요가 없으며, 간조시에만 사용이 된다. 그리고 물리적 의미로 GZF를 의미하는 e 는 조위영향을 받는 지점에서는 큰 의미를 갖지 않기 때문에 시행착오법을 이용하여 최적의 값을 찾았다.

본 연구에서는 표 1의 복합 수위-유량관계곡선식에 대해 다음과 같이 수정 H-Q(1)과 수정 H-Q(2)로 구분하였다. 여기서 만조 H-Q(1)은 만조 전체에 대한 것이며, 만조 H-Q(2)는 EL. 3.00m에서 곡선식을 분리한 것이다.

- 수정 H-Q(1) : 간조 H-Q + 만조 H-Q(1)
- 수정 H-Q(2) : 간조 H-Q + 만조 H-Q(2)

표 1 복합 수위-유량관계곡선식 회귀계수

기본식	$Q = a(h - e)^\alpha (D - e)^\beta (d_h - e)^\gamma + Q_r$			
	간조 H-Q	만조 H-Q		
		만조 H-Q(1)	만조 H-Q(2)	
			EL. 3.00m 미만	EL. 3.00m 이상
a	10108.96	2426.34	1074.40	360.23
α	-0.2240	4.4777	5.1148	3.7133
β	0.1428	-0.0714	0.1732	-0.0005
γ	-3.1277	4.5649	3.9886	1.7013
Q_r	-3,000	0	0	0
e	-1.4	-0.5	-0.5	-0.5
상관계수	0.8304	0.9228	0.9716	0.9018

4. 적용성 검토

본 연구에서 조위의 영향을 고려하여 개발한 복합 수위-유량관계곡선식의 적용성을 검토하기 위해 한강대교의 2007년 6월 ADVm으로 측정된 유량과 복합 수위-유량관계곡선식으로 산정되는 유량과 비교하였다. 또한 2007년에 개발된 수위-유량관계곡선식(그림 및 표 : 2007 H-Q)에 의한 환산유량과도 비교하여 검토하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는 바와 같이 복합 수위-유량관계곡선식에 의해 환산된 유량은 ADVm으로 측정된 유량과 경향성 및 유량이 비교적 잘 일치하고 있다. 또한, 본 연구에서 유량조정변수 Q_r 을 이

용함으로써 (-)유량까지 계산이 가능하였으며, 경향성도 잘 일치하였다. 하지만 수위-유량의 관계로만 개발된 2007년 수위-유량관계곡선식을 적용한 결과 (-)유량에 대해 계산이 불가능했다.

그리고 본 연구에서 복합 수위-유량관계곡선식을 만조 전체(수정 H-Q(1))와 만조시 최고 조위 EL. 3.00m 이상 및 미만으로 구분하여 개발한 식(수정 H-Q(2))을 적용한 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 만조 전체에 의한 것보다 만조시 조위를 EL. 3.00m 이상과 미만으로 구분하여 적용한 결과가 ADVM 유량과 보다 잘 일치하였다. 이러한 이유는 앞에서 언급했듯이 한강 하류부에 신곡수중보(E.L. 2.400m)에 의해 조위의 조고에 따른 영향 정도 및 조석파의 도달시간 등에 의한 것이다.

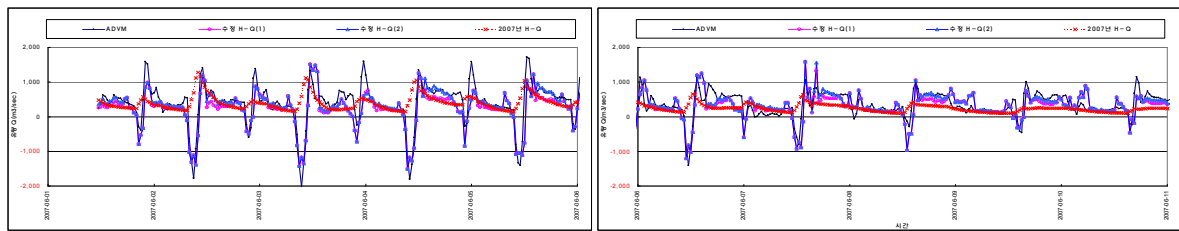


그림 4 시계열 유량비교

또한 복합 수위-유량관계곡선식(수정 H-Q(2))에 의한 유량과 2007년 유량측정을 통해 개발된 수위-유량관계곡선식(2007년 H-Q)에 의한 환산유량을 그림 5에 함께 도시하였다. 그 결과 수정 H-Q(2)에 의한 유량은 ADVM 실측유량과 일부 차이는 있지만 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만 2007년 H-Q에 의한 유량은 수위의 상승에 따라 유량이 일률적으로 증가하는 경향을 보이고 있어 ADVM 유량과 매우 다른 경향을 보이고 있다. 또한 상관분석을 실시한 결과 표 2와 같이 수정 H-Q(2)의 상관계수가 가장 높고, 2007년 H-Q의 상관계수가 가장 낮았다.

ADVM 실측유량에 대한 총량과 각 수위-유량관계곡선식에 의한 환산유량의 총량을 분석기간 동안에 대해 비교하였다. 그 결과 그림 8에서 보는 바와 같이 ADVM 실측유량의 총 유출량과 수정 H-Q(1)은 20.7%, 수정 H-Q(2)는 8.3%, 2007년 H-Q는 7.1%의 편차를 보였다. 총 유출량과 가장 근접한 것은 2007년 H-Q에 의한 유출량이지만, 이는 그림 5에서와 같이 수위에 대해 중간값 개념으로 유량이 환산되기 때문으로 실제 실시간 유량과는 많은 차이가 발생한다. 즉 실시간 유량 및 총량 등을 검토할 때 수정 H-Q(2)가 가장 적합한 것으로 판단할 수 있다.

따라서 위의 결과를 통해 본 연구에서는 최종적으로 한강대교의 저·평수위에 대한 복합 수위-유량관계곡선식으로 다음과 같이 수정 H-Q(2)를 최적식으로 제안하였다.

· 간조시

$$Q = 10108.96(h + 1.4)^{-0.2240} (D + 1.4)^{0.1428} (d_h + 1.4)^{-3.1277} - 3000$$

· 만조 최고 조위 EL. 3m 미만

$$Q = 1074.40(h + 0.5)^{5.1148} (D + 0.5)^{0.1732} (d_h + 0.5)^{3.9886}$$

· 만조 최고 조위 EL. 3m 이상

$$Q = 360.23(h + 0.5)^{3.7133} (D + 0.5)^{-0.0005} (d_h + 0.5)^{1.7013}$$

표 2 상관관계 분석 결과

구분	수정 H-Q(1)	수정 H-Q(2)	2007년 H-Q
상관계수	0.6213	0.8220	0.0137

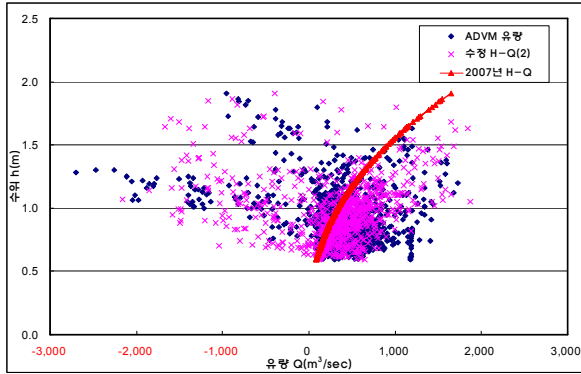


그림 5 유량비교

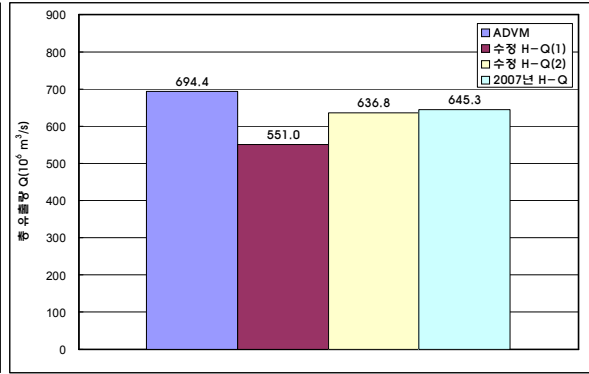


그림 6 총 유출량 비교

5. 결론

본 연구는 감조하천에서 조위의 영향을 크게 받는 저·평수위에서 수위-유량관계곡선식 적용 및 개발의 한계를 극복하기 위해 조위의 영향을 고려한 다변수 복합 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 곡선식 개발은 수위-수면차-수위차-유량의 관계를 통해 지수형 곡선식을 개발하였다. 여기서 수면차는 조위와 수위와의 차이이며, 이때 조석과의 전파시간에 대한 지체시간을 고려하게 된다. 수위차는 대상 수위관측소의 전 시간과의 수위차이다. 또한 조위에 의해 발생하는 (-)유량 자료를 이용한 지수형 곡선식을 개발하고자 유량 조정변수를 추가하였다.

복합 수위-유량관계곡선식은 간조와 만조로 구분하여 개발하였으며, 한강 하류부의 신곡수중보의 영향 및 조석과의 지체시간을 고려하여 만조시에 El. 3.00m를 기준으로 두 개의 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 그 결과 한강대교에 설치된 자동유량측정시설의 유량자료와 잘 일치하였으며, (-)유량에 대한 계산이 가능하였다. 또한 상관분석 및 총량검토에서도 좋은 결과를 보였다.

하지만 본 연구에서 제안한 복합 수위-유량관계곡선식은 조위를 이용한 변수를 사용함으로써 실시간으로 유량을 산정하기 위해서는 실시간 조위자료가 필요하기 때문에 홍수예보시스템에서 적용상의 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 상·하류부에 보조 수위관측소를 설치하고, 조위가 아닌 수위자료를 통한 입력변수를 산정하고 이를 이용할 수 있도록 해야 한다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2007). 2007년 유량조사보고서.
2. 이재형, 황만하 (1994). “섬진강 하류부에서의 수위-유량관계에 관한 연구.” 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권, 제4호, pp. 115~121.
3. 조홍제, 황재호, 문성준 (2000). “태화강 감조부의 저수위 수위-유량관계곡선 개선.” 한국수자원학회논문집, 제33권, 제5호 pp. 635~645.
5. Rantz. S. E, et. al.(1982). "Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of Discharge." U.S. Geol. Survey Water-Supply paper 2175, pp. 390~428.