

회원 수위관측소 지점의 고리모양 수위-유량 관계곡선 작성

Development of Looped Rating Curve at Hwawon Station

강 신 욱* / 이 상 호** / 황 만 하***

Kang, Shin Uk / Lee, Sang Ho / Hwang, Man Ha

Abstract

The flood discharge on the rising limb of a hydrograph at Hwawon station greatly differs from the flood discharge on the falling limb for the same stage. When there is such a big hysteresis, there can be a significant amount of errors in the rated discharge obtained from a simple rating curve. To reduce errors in rated discharges, a looped rating curve was established for Hwawon station in the Nakdong River. In order to compute the deviation between real discharges and simply rated discharges, a simple rating curve was established using the stage and discharge data from the results of a hydraulic channel routing. The relationship between the discharge deviation ΔQ and a product of B and $\Delta h/\Delta t$ was analysed, where B is the channel topwidth; Δh is the stage increment; Δt is the time increment. Strong relation between ΔQ and $B\Delta h/\Delta t$ was found. The discharges calculated from the relationship show differences by 10 % or less for the 7 observations out of 11 observations in 1997 whose stages exceeds 7 m. The observed discharges for the stages over 9 m in 1998 also show small difference with the discharges estimated from the loop rating curve. Looped rating curve is recommended, instead of the simple rating curve to reduce the errors of rated discharges for gauging stations like Hwawon, which has relatively large loop width.

keywords : looped rating curve, hysteresis

요 지

회원 지점의 홍수시 유량은 수위가 상승할 때와 하강할 때 동일한 수위에 대해 많은 차이를 나타내고, 이와 같이 이력효과 크기가 클 경우에는 많은 오차가 발생할 수 있다. 유량 환산 오차를 줄이기 위해 낙동강 본류 회원 수위 관측소 지점에 대한 고리모양 수위-유량 관계곡선을 작성하였다. 하천유량과 단순 환산된 유량의 편차를 계산하기 위해 부정류 모의 사례로부터 (수위, 유량) 자료쌍을 획득하여 단순 수위-유량 관계곡선식을 작성하였다. 이 관계에서 이탈하는 유량편차 ΔQ 와 수위변화 따른 하천폭과 시간변화율의 곱인 $B\Delta h/\Delta t$ 와의 관계로부터 고리모양 수위-유량 관계의 유량을 구하였다. ΔQ 와 $B\Delta h/\Delta t$ 는 높은 상관관계를 나타내었다. 이로부터 계산된 유량은 1997년의 수위 7m이상 관측유량 11개 중 7개가 고리모양 수위-유량 환산관계의 유량과 10% 이내의 차이를 보였고, 수위 9m 이상

* 한국수자원공사 수자원연구원 연구원, 공학석사
Researcher, Korea Institute of Water and Environment 462-1, Jeonmin-Dong, Yusung-Gu, Daejeon, 305-730, Korea
(e-mail: sukang@kowaco.or.kr)

** 부경대학교 건설공학부 부교수, 공학박사
Associate Prof., Division of Construction Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea
(e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

*** 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원, 공학박사
Head researcher, Korea Institute of Water and Environment 462-1, Jeonmin-Dong, Yusung-Gu, Daejeon, 305-730, Korea
(e-mail: hwangmh@kowaco.or.kr)

의 1998년 관측유량은 고리모양에 근접하였다. 화원 지점과 같이 고리폭이 큰 지점은 단순 수위-유량 관계보다 고리모양 수위-유량 관계를 적용하는 것이 유량 환산의 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 고리모양 수위-유량 관계곡선, 이력효과

1. 서론

하천의 임의 단면을 흐르고 있는 유량을 직접 연속적으로 측정하는 것은 기술적인 면뿐만 아니라 경제적인 면에서도 대단히 어려운 일이므로 비교적 측정이 용이한 하천수위를 연속적으로 측정하여 이를 수위-유량 관계곡선에 의해 유량으로 환산하여 사용한다. 자연하천에 있어서 수위관측점은 많은 경우 하로통제(河路統制)를 받으므로 분산이 작은 단순관계를 갖지 않고 loop형 수위-유량 관계를 가지게 되어 동일 수위더라도 수위 상승시와 하강시의 유량이 달라진다(윤용남, 2003). 이와 같은 이력(履歷)효과(hysteresis effect)의 원인으로는 배수 및 저하효과, 홍수시 수위의 급상승 및 급강하, 하도내의 식생 등의 효과 등을 들 수 있다. 수위-유량 관계의 이력효과 크기가 작은 경우에는 관측수위를 유량으로 환산하는 것은 일가함수(一價函數) 형태의 수위-유량 관계를 이용할 수 있다. 그렇지만 이력효과 크기가 클 경우 많은 오차가 생길 수 있다. 이러한 현상에도 불구하고 수자원 실무에서 관측수위에 의한 유량환산은 단일함수 형태의 수위-유량 관계를 이용하여 행해지고 있다.

수위를 유량으로 환산하는 유량환산관계의 대부분은 유량을 수위에만 관련시키는 것으로 이를 단순 유량환산관계(simple rating)라 하고, 유량뿐만 아니라 다른 독립변수를 추가로 관련시키는 것을 복합 유량환산관계(complex rating)라 한다. 흔히 사용하는 독립변수로는 시간에 대한 수위변화율 등이 있다. 보통 수위-유량관계 곡선은 수위를 유량에 일대일로 대응시키는 단순한 관계로 나타내며 이들 곡선은 대체로 선형방안지상에 포물선 모양으로 나타난다. 그렇지만 홍수의 수문곡선은 상승시와 하강시에 동일한 수위에 대한 유량이 다를 수 있다. 이런 지점에 대하여 홍수 수문곡선의 (수위, 유량) 자료쌍을 모아 종축을 수위축으로 하여 도시하면 반시계 방향으로 이력효과를 가지는 길쭉한 고리(loop)가 형성된다.

하천에서 홍수파가 진행할 때 수위-유량 관계에서의 이력효과는 Gilcrest(1950)와 Chow et al.(1988)의 문헌에 소개되었다. 최근 Westphal 등의 연구(1999)에서 1993년 미시시피 강 중류부의 유량관측에서 이러한 현

상을 재확인하였다. 이상호(2001)는 자연하천의 짧은 구간에서 세 지점의 연속수위자료와 여러 하천 단면자료를 이용하여 조도계수를 추정하고 수리학적 하도추적에 의하여 유량을 간접 추정하였고, 화원, 고령교, 현풍 수위관측소 지점의 수위-유량 관계에서의 이력효과를 확인하였다.

수위-유량 관계곡선에서 이력효과를 보정하기 위해 USGS에서 단순 수위-유량 관계곡선과 부정류 수위-유량 관계곡선의 편차 ΔQ 를 부정류의 저류로 인한 수정분으로 표현하는 $\Delta Q/J$ 수위-유량 관계, Jones 식에 바탕을 두고 홍수와 전파속도 U 와 에너지 경사 S_c , 수위변화율 J 를 이용하여 보정유량 ΔQ 를 구하는 $1/US_c$ 수위-유량 관계를 사용하고 있다(Kennedy, 1984). Fread (1976)에 의해 개발된 동수역학적 수위-유량 관계는 유량의 변화에 의해 에너지경사가 변할 때 수위와 유량의 관계를 모의하는 수학적 모형이다. 이 방법은 관측수위(유량), 하상경사, 횡단면적, 조도계수가 기지 값일 때 유량(수위)을 수치계산에 의해 구할 수 있다. Tawfik et al.(1997), Jain and Chalisgaonkar(2000)는 이력효과를 반영할 수 있는 수위-유량 관계곡선 모형을 인공신경망(Artificial and Singh(2001)은 고체역학의 탄성(elasticity) 개념을 사용하여 이력효과를 설명하였고 홍수파를 분석하였다.

우리나라의 유량측정 자료는 아직 고리모양 수위-유량 관계를 보일만큼 신뢰적이지 못하다. 따라서 외국과 달리 국내에서는 부정류 수위-유량관계를 분석하거나 사용한 예가 없다. 본 연구에서는 낙동강 본류의 화원 지점에 대한 기존 부정류 모의 사례(이상호, 2001)로부터 관측수위와 계산유량 자료쌍을 획득하였다. 획득된 계산유량 자료를 가지고 단순 수위-유량 관계식을 작성하였다. 홍수의 상승과 하강에 따라 수위와 유량 자료는 단순 수위-유량 관계곡선을 이탈하여 길쭉한 고리를 이룬다. 이렇게 이탈된 편차를 구하여 USGS에서 사용하는 복합 수위-유량 관계인 $\Delta Q/J$ 수위-유량 관계, $1/US_c$ 수위-유량 관계를 적용하였다. $\Delta Q/J$ 수위-유량 관계와 $1/US_c$ 관계는 모두 수위변화율($\Delta h/\Delta t$)을 유량 편차에 연관시킨다. 본 연구에서는 여기서 더 나아가 $B\Delta h/\Delta t$ 를 유량 편차에 연관시키는 새로운 접근 방안을 시도하여 화원지점의 고리모양 수위-유량 관계곡선을 작성하였다.

2. 대상지점의 자료 수집 및 단순 수위-유량 관계곡선식 작성

2.1 대상지점의 자료 수집

고리모양 수위-유량 관계곡선을 작성하기 위해서는 정밀하고 연속적인 유량관측이 필수적이다. 하지만 서론에서 지적한 바와 같이 신뢰할만한 유량자료의 부족으로 수리학적 하도추적에 의한 계산유량을 대신 사용하였다. 수리학적 하도추적을 적절히 수행하는데 중요한 사항은 매개변수인 조도계수를 적절히 추정하는 것이다. 이상호의 연구(2001)에서는 최적화 기법을 적용하여 하도의 조도계수를 추정하였고 계산된 유량도 기존의 유량측정 결과에 근접하였다. 본 연구에서는 이 결과로부터 얻어진 낙동강 본류구간의 화원 지점의 시간별 관측수위 및 계산유량, 하천단면 자료를 사용하여 수위-유량 관계 분석에 사용하였다.

사용된 홍수 사상은 낙동강홍수예경보(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1999; 2000)에 수록된 세 개의 홍수 자료이다(Table 1). 홍수사상 2를 사용하여 고리모양 수위-유량 관계곡선을 유도하는데 사용하였고, 홍수사상 1과 3으로 검증에 사용하였다.

2.2 단순 수위-유량 관계곡선의 작성

단순 수위-유량 관계에 대하여 주로 사용되고 있는 수위-유량 관계식은 지수형과 포물선형이다. 그 중에서도 지수형 식은 하천 수위와 유량의 물리적 개념을 표현해주는 것으로 일반적으로 많이 사용되고 있다. 1999년 9월의 홍수 자료로부터 화원 지점의 단순 수위-유량 관계식을 지수형으로 작성하였으며 Fig. 1에 도시하였다. 저수(低水) 구간의 (수위, 유량) 자료 쌍은 1999년 9월의 홍수이외에 평상시 수위 자료로부터 수리학적 하도추적에 의하여 계산된 유량으로부터 구성된 것이다. 이들을 1999년 9월 홍수의 (수위, 유량) 자료쌍에 합하여 수위-유량 관계 곡선을 작성하는데 사용하였다.

수위-유량 관계식은 저수 영역과 홍수 영역을 구분하여 세 구간으로 작성하였다. 단순 수위-유량 관계곡선은 계산된 (수위, 유량) 자료쌍이 이루는 고리모양의 중앙을 관통하도록 작성되었다. 저수영역의 수위-유량 관계식은 그림에서 따로 도시되었다. 관계곡선 주변에

도시된 (수위, 유량) 자료쌍은 다른 영역과 달리 고리모양을 보이지 않고 산포하고 있다. 이에 반하여 다른 두 영역에서는 수위-유량 자료가 분명하게 고리모양을 이루고 있다.

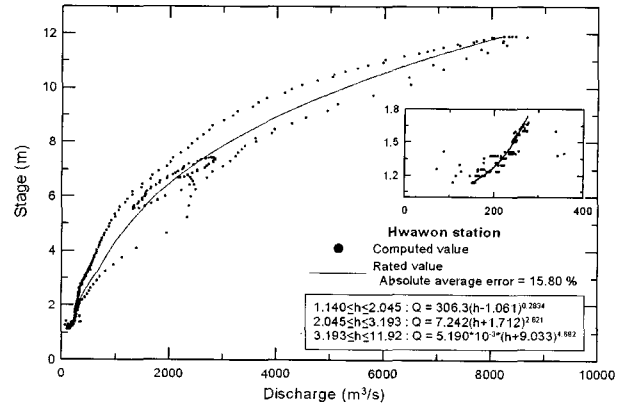


Fig. 1. A simple rating curve at Hwawon stage station

3. 기존 연구에 의한 고리모양 수위-유량 관계곡선

3.1 $\Delta Q/J$ 수위-유량 관계 적용 및 결과분석

$\Delta Q/J$ 형태의 유량환산관계는 수위변화에 의한 저류 현상 때문에 고리모양 수위-유량관계가 생길 것이라고 판단될 때 사용하는 것으로 주요성분은 일정 수위-유량 곡선(constant stage rating, Fig. 2의 가운데 곡선)과 수위에 따른 $\Delta Q/J$ 의 관계를 나타내는 곡선(Fig. 2C)이다. 실제 유량은 일정 수위-유량곡선으로 산출된 유량에 저류로 인한 수정분을 추가하여 얻는다. 여기서 저류로 인한 수정분이란 수위에 상응하는 $\Delta Q/J$ 곡선의 값에 수위변화율을 곱한 것이다. 위의 관계를 다음 식과 같이 쓸 수 있다(Kennedy, 1984).

$$Q_m = Q_r + \left(\frac{\Delta Q}{J} (h) \right) \cdot J(t) \quad (1)$$

여기서 Q_m 은 관측유량, Q_r 은 일정 수위-유량곡선으로 구한 유량, ΔQ 는 저류로 인한 수정분, $J(t)$ 는 시간당 수위변화율이다.

Table 1. The flood events used for hydraulic channel routing

Flood	Period	Peak stage (m)		
		Hwawon	Goryeonggyo	Hyeonpung
1	99.8. 2 0 hr ~ 8. 7 23 hr	8.03	7.37	8.97
2	99.9.19 0 hr ~ 9.28 23 hr	11.79	11.03	12.44
3	00.9.12 0 hr ~ 9.22 23 hr	10.95	10.08	11.22

RATING LOOPS FROM STORAGE

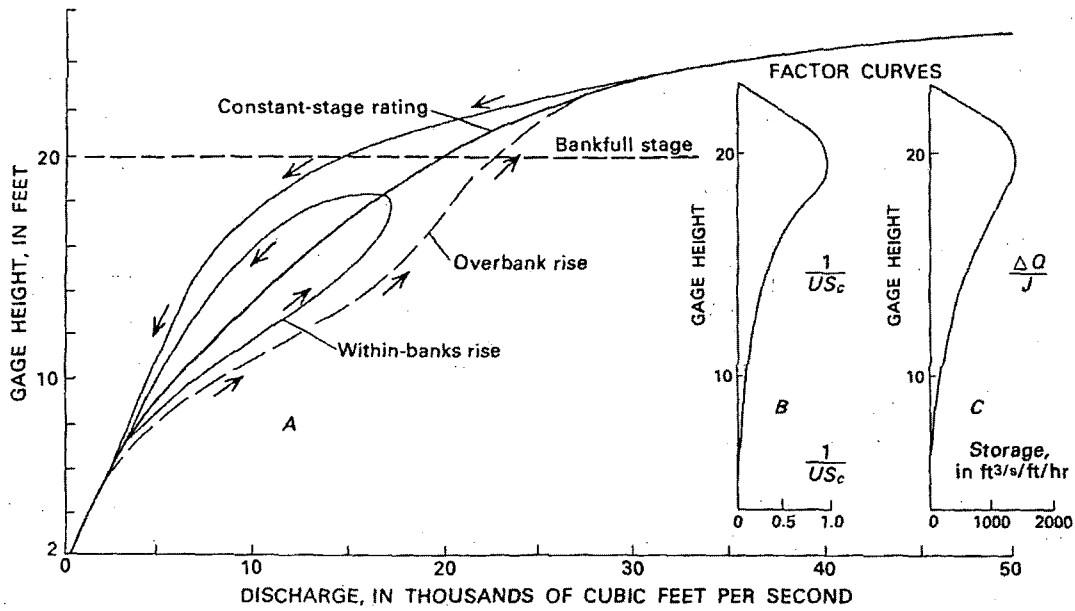


Fig. 2. Typical shapes of single-storm loop ratings and factor curves (Kennedy, 1984)

· 화원 지점의 부정류 수위-유량 환산관계를 위의 방법으로 분석하였다. 일반적으로 $\Delta Q/J$ 곡선은 수위에 따라 $\Delta Q/J$ 값이 t-분포와 같이 왜곡된 종모양을 나타내며, 한국수자원공사에서 사용 중인 HYMOS의 경우 2차 포물형 곡선으로 근사하고 있다. 이와 같은 분석을 위해 화원 지점의 1999년 9월 홍수의 시간단위 수위 자료를 이용하여 시간당 수위변화를 J 를 계산하였다. 수집한 시간별 유량, 수위변화율, 일정 수위-유량 관계를 이용하여 수위에 따른 $\Delta Q/J$ 값을 구하여 Fig. 3에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전 수위구간에 걸쳐 산포되어 있었으며, 2차 곡선으로 근사하려고 하였으나 수위에 따른 일정 관계를 구할 수 없었다.

3.2 $1/US_c$ 수위-유량 관계 적용 및 결과분석

$1/US_c$ 환산관계는 Boyer 방법(Kennedy, 1984)이라고 하는데, 대개는 수위변동의 영향을 단순저류에 관련시킬 수 없을 때 사용한다. $1/US_c$ 항 전체를 하나의 변수로 취급하고 급격하게 수위가 변할 때, 이 항과 수위의 관계를 정한다. 주요성분은 일정 수위-유량곡선 (Fig. 2A의 가운데 곡선)과 수위와 $1/US_c$ 의 관계를 나타내는 곡선(Fig. 2B)이다. 이 방법은 다음과 같은 Jones 공식에 바탕을 두고 있으며 Jones 공식의 유도는 다음과 같다.

먼저 하천 흐름에 관한 1차원 운동량식을 변형하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$Q = K \sqrt{S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}} \quad (2)$$

여기서 Q 는 유량이고 K 는 통수능, S_0 는 바닥경사, y 는 수심, x 는 거리, V 는 유속, g 는 중력가속도, t 는 시간이다. 만일 가속도 항들이 비교적 작으면 바닥경사 S_0 와 수심경사 $\partial y/\partial x$ 로 표현된 다음 식으로 근사된다.

$$\frac{Q}{Q_0} = \sqrt{1 - \frac{1}{S_0} \frac{\partial y}{\partial x}} \quad (3)$$

그리고 다음과 같은 운동파(kinematic wave) 식을 사용하면 Jones 식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = - \frac{1}{U} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{Q_m}{Q_r} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{US_c} \right) J} \quad (5)$$

여기서 U 는 홍수파의 전파속도(m/s), S_c 는 에너지경사이다.

부정류 수위-유량환산관계를 홍수파 속도와 일정한 유량에 대한 수면경사와 관련시키는 $1/US_c$ 수위-유량 관계를 화원 지점에 대해 적용하여 분석 시도 하였다. $\Delta Q/J$ 수위-유량관계의 인자곡선과 마찬가지로 2차 곡선

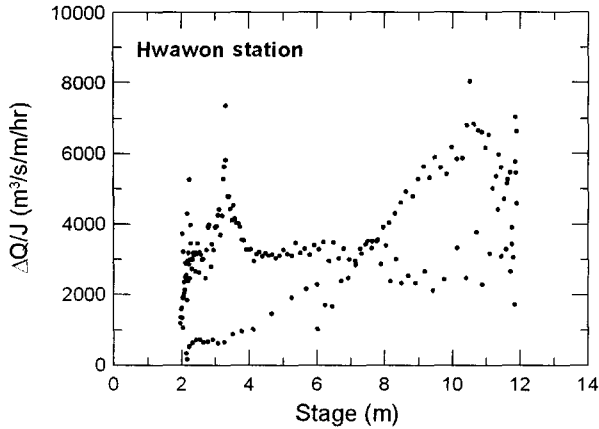


Fig. 3. The relation between $\Delta Q/J$ and stage at Hwawon station

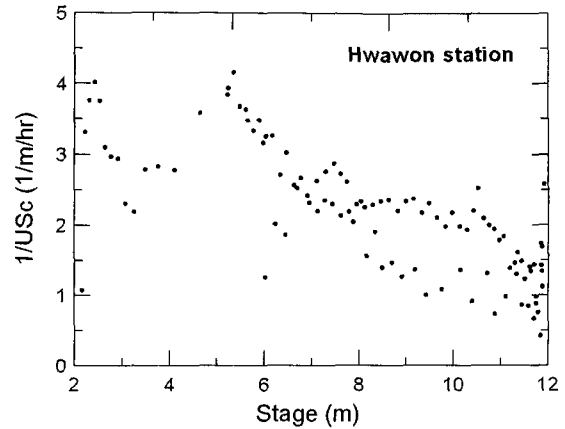


Fig. 4. The relation between $1/US_c$ and stage for Hwawon station

으로 근사하려 하였으나 역시 $1/US_c$ 와 수위의 관계를 밝힐 수가 없었다(Fig. 4).

4. 화원 지점의 고리모양 수위-유량 관계곡선 작성

4.1 고리모양 수위-유량 관계 유도방안 제언

화원 지점에 대하여 수위변화를 때문에 고리모양 수위-유량 관계가 생길 때 사용하는 $\Delta Q/J$ 수위-유량관계, 운동과 근사에 의해 고리모양 수위-유량 관계를 분석하는 $1/US_c$ 환산관계를 적용해 보았지만 모두가 적절하지 못하였다. 그래서 새로운 접근 방법으로서 $\Delta Q/J$ 수위-유량관계 수립 절차와 비슷하게 일정 수위-유량곡선을 작성한 후 일정 수위-유량 관계곡선식으로부터 이탈된 유량편차 ΔQ 를 $B(\Delta h/\Delta t)$ 와의 관계로부터 얻어내는 부정류 수위-유량 관계분석을 시도하였다. 여기서 B는 수위별 수면폭(m), $\Delta h/\Delta t$ 는 시간당 수위변화율(m/hr)이다.

실제유량은 일정 수위-유량식에 의한 환산유량과 다음 식의 관계를 갖는다고 가정하였다.

$$Q_a = Q_0 + \Delta Q \quad (6)$$

$$\Delta Q = f\left(B \frac{\Delta h}{\Delta t}\right) \quad (7)$$

여기서 Q_a 는 실제유량, Q_0 는 일정 수위-유량곡선식에 의한 환산유량이다. ΔQ 는 부정류 효과에 의한 유량편차이며 수위-유량관계가 고리를 형성할 경우 상승시 ΔQ 의 값은 양의 값, 하강시는 음의 값을 갖는다.

$B \partial h/\partial t$ ($\approx B \Delta h/\Delta t$)가 갖는 의미는 다음과 같다.

측방유입량을 무시한 연속방정식은 Eq. (8a)로 표현된다. 수면폭 $B(h)$ 가 수심 $h(x, t)$ 의 함수인 하천단면에서 수심 변화량 Δh 에 대한 단면적 변화량 ΔA 는 $B \Delta h$ 로 근사될 수 있다. Δh 를 '0'으로 보내는 극한을 취하면 $\Delta A/\Delta h$ 는 B 가 된다(Chaudhry, 1993). 그러므로 단면적의 시간변화율은 $\partial A/\partial t = B \cdot \partial h/\partial t$ 라 할 수 있고, 연속방정식은 Eq. (8b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (8a)$$

$$B \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (8b)$$

또한 보존형 운동량방정식의 공간가속도(convective acceleration) 항을 전개하여 식을 다시 쓰면 다음과 같다. 식의 좌변은 차례로 이류가속도 항, 전개한 공간가속도 두 항, 압력 항이고 우변은 마찰력 항이다. 수식 밑에는 특정 시각(120시간)에서 각 항의 크기를 나타냈다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} \\ & - 0.01 \times 10^{-5} \quad - 4.41 \times 10^{-5} \\ & + \frac{\partial h}{\partial x} = - S_f \\ & - 0.42 \times 10^{-5} \quad - 4.95 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (9)$$

$B \partial h/\partial t$ 는 연속방정식에서 $\partial Q/\partial x$ 와 균형을 이루는 항이고, $\partial Q/\partial x$ 는 운동량 식에서 좌변의 두 번째 항에도 나타나 있다. 홍수위가 커졌을 때 $\partial Q/\partial x$ 를 포함한

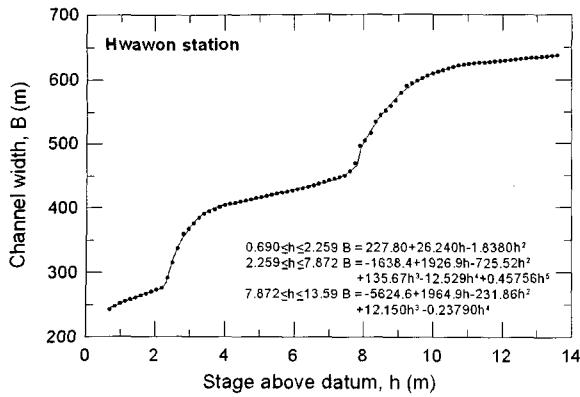


Fig. 5. The regression equation of a stage and channel width at Hwawon

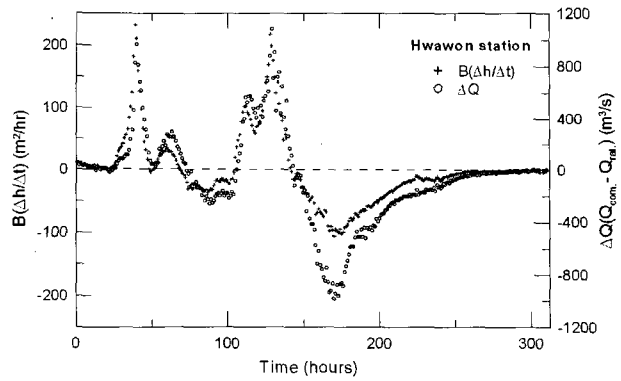


Fig. 6. Time series of the $B(\Delta h/\Delta t)$ and the ΔQ for Hwawon station

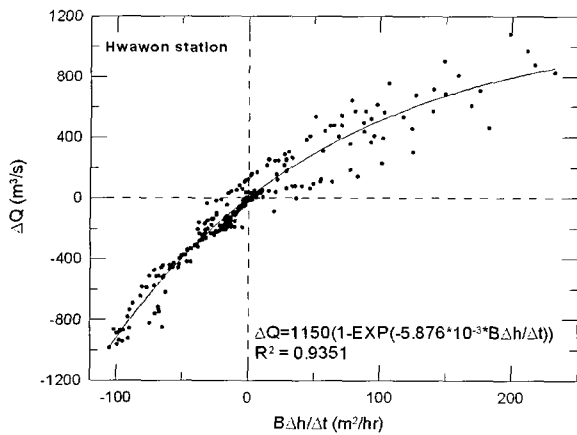


Fig. 7. Correlation of the storage correction ΔQ and the $B(\Delta h/\Delta t)$ for Hwawon station

항이 $\partial h/\partial x$ 를 포함한 항과 함께 지배적임을 Eq. (9)의 아래 숫자에서 확인할 수 있다. 즉 $B\partial h/\partial t$ 항은 운동량 식에서 지배적인 항 중 하나의 변화를 설명할 수 있고 연속방정식의 한 항을 이루고 있다.

4.2 화원 지점의 고리모양 수위-유량 관계곡선 작성

수리학적 하도추적 결과로부터 얻어진 수위-수면폭 (h - B) 자료를 화원 지점에 대해 Fig. 5와 같이 세 개의 회귀식으로 근사하였다. 이로부터 임의의 수위 h 가 주어질 경우에 B 를 구할 수 있도록 하였다. 그리고 1999년 9월 홍수의 계산유량 자료에 대하여 유량 편차 ΔQ 와 $B(\Delta h/\Delta t)$ 를 시간에 따라 도시하였으며(Fig. 6), 화원의 경우에 $B(\Delta h/\Delta t)$ 와 ΔQ 는 대체로 상승과 하강이 비슷한 위상으로 이루어지며 증감의 경향도 유사하였다.

화원의 경우는 이러한 증감 경향으로부터 ΔQ 와 $B(\Delta h/\Delta t)$ 의 상관성을 도시한 결과(Fig. 7) 강한 상관 관계를 발견하였으며, 이로부터 $B(\Delta h/\Delta t)$ 에 대한 유

량편차의 회귀곡선을 작성하였다.

$$\Delta Q = 1150 \left(1 - \frac{1}{\text{EXP}(5.876 \times 10^{-3} \times B\Delta h/\Delta t)} \right) \quad (10)$$

즉 실제 홍수의 수위 자료만 알면 h - $B(h)$ 관계에서 수면폭 B 를 구하고 다시 $B(\Delta h/\Delta t)$ 를 구할 수 있으며 Eq. (10)의 회귀식으로 부터 유량편차 ΔQ 를 구할 수 있도록 하였다. 이를 단순 수위-유량 관계식의 유량값에 더하면 고리모양 수위-유량 관계의 유량을 구할 수 있다.

이상과 같이 작성한 일정 수위-유량곡선, 수위-수면폭 회귀식, $B(\Delta h/\Delta t)$ 와 ΔQ 의 회귀식을 사용하여 화원 지점 1999년 9월 홍수에 대해 고리모양 수위-유량 관계를 분석하였다. 먼저 관측수위로 일정 수위-유량 관계식에 의해 환산유량을 계산하고, 시간당 수위변화를 $\Delta h/\Delta t$ 를 구하여 수위별 수면폭 B 를 곱하였다. 그리고 Eq. (2)를 사용하여 구한 유량편차를 일정 수위-유량 관계식에 의한 환산유량에 더하여 최종 유량을 계산하였다. 이로부터 수리학적 하도추적에 의해 계산된 유량과 고리모양 수위-유량 관계에 의한 환산유량을 Fig. 8에 나타내었다. 고리모양 수위-유량 관계에 의한 환산유량은 수리학적 하도추적에 의해 계산된 유량과 매우 근접하였고 평균 절대편차는 약 5.2%였다. 또한 1997년의 수위 7m 이상 관측유량(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1997) 11개 중에서 7개가 고리모양 수위-유량 관계의 환산유량과 10%이내의 차이를 보인다. 수위 9m이상의 1998년 관측유량(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1998)은 고리모양의 상승부에 매우 근접하였다.

1998년의 유량측정 결과 중에서 수위 6 ~ 9m 사이의 측정값은 고리모양 수위-유량 관계의 환산 유량과 매우 큰 차이를 보인다. 이것은 1999년의 홍수수문곡선

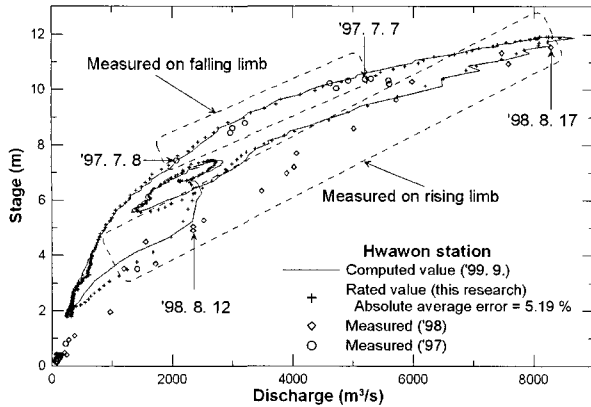


Fig. 8. A loop rating for Hwawon station and measured past discharges

의 상승부 모양과 1998년 홍수수문곡선의 상승부 모양이 다르기 때문에 나타날 수 있는 차이로 보인다.

결론적으로 화원 지점은 수위 3m 이상의 유량측정 결과와 고리모양 수위-유량 관계의 환산유량 또는 수리학적 하도추적에 의한 계산유량이 비교적 근접하다고 볼 수 있다. 즉, 유량측정이나 수리학적 하도추적에 의한 유량 계산이 모두 적절하였음을 알 수 있다. 그리고 화원 지점의 수위-유량 관계는 매우 큰 고리 폭을 가졌으며 본 연구에서 제안한 고리모양 수위-유량 관계가 적절히 적용될 수 있었다.

위의 그림에서 1997년의 7m 이상 수위에 대한 홍수 유량 측정치는 수문곡선의 하강부에서 이루어졌다. 그리

고 1998년의 수위 3m 이상 수위에 대한 홍수 유량 측정치는 수문곡선의 상승부에서 이루어졌다. 특히 1998년의 수위 4.8 ~ 11.54m에 대한 유량측정은 8월 12일 ~ 8월 17일 사이의 단일 홍수에 대한 상승부에서 이루어졌다. 상승부와 하강부의 유량은 매우 차이가 크게 나고 있다. 이렇게 고리 폭이 큰 지점은 1998년과 1997년의 유량측정 자료로 각각 단순 수위-유량 관계 곡선을 유도하는 경우 두 가지 결과가 매우 차이가 남을 짐작할 수 있다. 따라서 이런 지점의 유량측정 및 수위-유량 관계 수립은 기존의 방식대로 계속하기 곤란하다고 판단된다.

5. 화원 지점 고리모양 수위-유량 관계곡선의 평가

Fig. 9와 Fig. 10은 앞서 수립된 고리모양 수위-유량 관계식을 다른 홍수에 적용한 결과이다. 비교 대상은 해당 홍수에 대한 수리학적 하도추적 결과이다. 사용한 홍수 사상은 1999년 8월 홍수와 2000년 9월 홍수이다. 화원 지점은 여전히 고리 폭이 컸으며 수리학적 하도추적 결과와의 차이는 약 8%이하였다.

화원은 일정 수위-유량 관계를 사용하는 경우에 매우 오차가 커진다(Table 2). 일관된 사실이지만 화원 지점은 고리의 폭이 매우 크므로 일정 수위-유량 관계를 사용할 때 당연히 오차가 커지게 된다.

Table 2. Comparison of absolute average error rated from simple and loop ratings

Station	Flood	Absolute average error (%)	
		Simple rating	Loop rating
Hwawon	Aug., 1999	24.1	7.9
	Sep., 2000	16.9	7.0

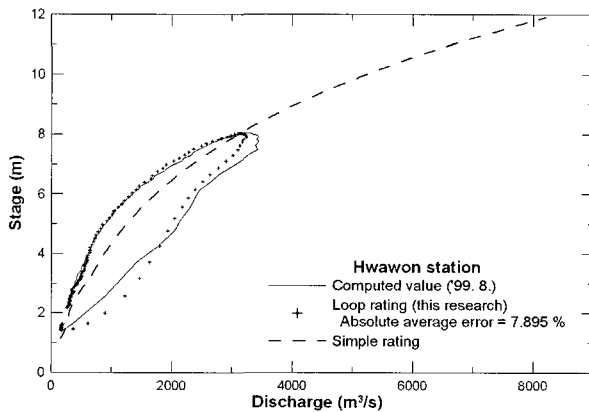


Fig. 9. A validation of the loop rating for Hwawon station with the flood in August, 1999

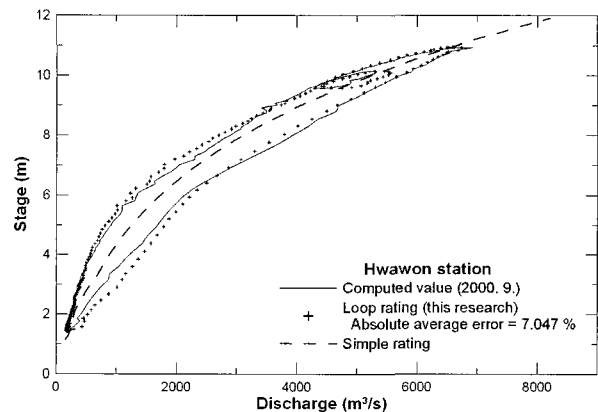


Fig. 10. A validation of the loop rating for Hwawon station with the flood in September, 2000

6. 고리모양 수위-유량 관계곡선의 한계

본 연구에서 개발한 고리모양 수위-유량 관계는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 첫째, 이미 서론에서 기술한 바와 같이 정밀하고 연속적인 실측유량 자료를 사용한 것이 아니고 조도계수가 잘 추정된 부정류 모의 사례로부터 관측수위와 계산유량 자료쌍을 획득하여 사용하였다는 점이다. 1차적인 검증은 2001년 이상호의 연구에서 수행되었지만, 향후 양질의 상시유량 관측이 필요하다. 둘째는 화원지점과 같이 운동량 방정식의 한, 두개 항에 의해서 지배를 받는 경우가 아니라면 이 방법을 사용하기 어렵다는 점이다.

7. 결 론

고리모양 수위-유량 관계곡선을 작성하기 위해서는 정밀하고 연속적인 유량관측이 필수적이다. 하지만 서론에서 지적한 바와 같이 신뢰할만한 유량자료의 부족으로 수리학적 하도추적에 의한 계산유량을 대신 사용하여 이러한 관계를 분석하였고 대상지점은 화원지점만을 대상으로 하였다. 대상지점에서 수집한 관측수위와 계산유량 자료쌍에 기존의 여러 가지 복합 수위-유량 관계를 적용하였으나 모두 적절하지 못하였다. 여기에 사용된 방법은 USGS에서 사용하고 있는 $\Delta Q/J, 1/US_c$

수위-유량 관계이다. 화원 지점에 대해 두 가지 방법을 적용해 보았으나 적절한 결과를 얻을 수가 없었다. 이에 따라 $B\Delta h/\Delta t$ 를 유량편차 ΔQ 에 연관시키는 새로운 시도를 하였다. 이를 적용한 고리 모양 수위-유량 관계의 분석 결과는 화원 지점의 경우에 특히 유용하게 나타났다. 화원 지점과 같이 고리 폭이 큰 지점은 단순 수위-유량 관계보다 고리 모양 수위-유량 관계를 적용하는 것이 유량 환산의 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

화원과 같이 이력효과가 큰 지점은 홍수량 측정에 의한 수위-유량 관계식 작성이 어려운 지점이다. 즉 수문곡선의 상승부와 하강부 유량이 크게 차이가 나므로 홍수량 측정도 양쪽 모두에 대하여 수행하여야 하고 이를 가지고 수위-유량 관계곡선식이 작성되어야 한다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1997). 낙동강수계 홍수량측정조사 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1998). 낙동강수계 홍수량측정조사 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1999). 낙동강홍수예경보 보고서.
- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (2001). 낙동강홍수예경보 보고서.
- 윤용남 (2003). 공업수문학. 청문각, p. 227.
- 이상호 (2001). "수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성." 한국수자원학회논문집, 제 34권, 제5호, pp. 551-560.
- Chaudhry, M.H. (1993). *Open-channel flow*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., p. 280.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Fread, D.L. (1976). "A Dynamic Model of Stage-discharge Relations Affected by Changing Discharge." *NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO 16*, Silver Spring, Md.
- Gilcrest, B. R. (1950). "Flood routing." *Engineering hydraulics*, Chap. X, H. Rouse, ed., Wiley, New York.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan Pub. Co., New York.
- Jain, S. K., and Chalisgaonkar, D. (2000). "Setting up stage-discharge relations using ANN." *J. Hydrologic Eng.*, Vol. 5, No. 4, pp. 428-433.
- Kennedy, E.J. (1984). *Discharge Ratings at Gaging Stations*. U.S. Geological Survey.
- Mishra, S.K., and Singh, V.P. (2001). "Hysteresis-based flood-wave analysis using the concept of strain." *Hydrol. Process*. Vol. 15, pp. 1635-1651.
- Westphal, J.A., Thompson, D.B., Stevens, G.T., Jr., and Straucer, C.N. (1999). "Stage-discharge relations on the middle Mississippi River." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, Vol. 125, No. 1, pp. 48-53.

(논문번호:05-120/접수:2005.08.26/심사완료:2006.04.26)