

수치모형을 이용한 고리형 수위-유량 관계 분석

Analysis on Looped Stage-Discharge Relation and
Its Simulation using the Numerical Model

김지성* · 김 원** · 김동구*** · 김치영****

Kim, Ji Sung · Kim, Won · Kim, Dong Gu · Kim, Chi Young

Abstract

This study is focused on the analysis of loop characteristics of stage-discharge relation which is widely used for the production of discharge data and the simulation of loop stage-discharge relation using the numerical model. Analysis of consecutive stage and discharge data at 3 points revealed that loop of stage-discharge relationship is very strong. This means that the existing single stage-discharge relation may include large amount of error. Various flood events are simulated in main-stream of Han river with one-dimensional numerical model. The calculated stage data are compared with measured data. Especially continuous field-flow measurements concurrently collected with an Acoustic Doppler Velocity Meter (ADV) on Hangang bridge in the case of 2007 flood event are used to verify the model applicability of estimating flows in open channels. This comparison shows that numerical model is an accurate and reliable alternative for making the real stage-discharge relation. Simulation of stage-discharge relation by a numerical model at Paldang and Hangang bridge showed good agreements with measured one, so it may be possible to generate real loop stage-discharge relation with properly calibrated and verified numerical model. It can be concluded that results of this study can contribute to error analysis of conventional single stage-discharge relation and development of loop stage-discharge relation with numerical model.

Keywords : stage-discharge relation, loop, numerical model, hysteresis

요 지

본 연구에서는 일반적으로 유량 자료의 생산을 위해 널리 사용되는 수위-유량관계의 고리형 특성 분석과 수치모형에 의해 이를 재현하는 것을 목적으로 하고 있다. 팔당대교 등 3개 지점의 연속적인 수위와 유량자료를 분석한 결과 여러 사상에서 매우 강한 고리형 특성이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 기존 단일 수위-유량관계가 많은 오차를 포함할 수 있다는 것을 나타낸다고 할 수 있다. 한강 본류부에 설치된 수치모형을 이용하여 다양한 홍수사상에 적용하고, 그 결과를 실측 수위와 비교하여 검증하였다. 특히 2007년 홍수사상의 경우, 한강대교에 설치된 ADV를 이용한 연속적인 유량측정 자료와 비교하여 수치모형에 의한 간접유량 산정의 적용성을 검증하였다. 검증된 수치해석 결과로부터 주요지점의 수위-유량관계를 작성한 결과 실측치와 유사한 형태를 구할 수 있었는데, 적절히 보정되고 검증된 수치모형을 이용하면 고리형 특성이 매우 강한 수위-유량관계의 재현이 가능함을 분석하였다. 본 연구 결과는 기존 단일 수위-유량관계의 오차 분석과 수치모형을 이용한 고리형 수위-유량관계 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수위-유량관계, 고리형, 수치모형, 이력현상

1. 서 론

수위-유량관계는 하천의 유량 자료 생산을 위해 가장 중요하게 사용되는 것으로서 일반적으로 자동으로 측정되는 수위와 간헐적으로 측정된 유량의 관계를 분석하여 작성한다. 이와 같은 방법은 하천 유량의 자동측정이 곤란한 상황에서 연속적으로 하천의 유량을 생산하기 위한 간접적인 방법이다. 이 방법에는 하천에서 수위와 유량이 항상 일대일의 관

계를 유지한다는 기본 가정을 전제하고 있다. 그러나 이론상 단일 수위-유량관계는 정상류에서만 발생하며, 부정류일 경우 이 관계는 성립하지 않고 고리형 수위-유량관계로 나타나게 된다. 그럼에도 불구하고 단일 수위-유량관계는 정상류, 부정류 등의 흐름의 형태에 관계없이 모든 경우에 사용되고 있다.

이와 같이 일반적으로 단일 수위-유량관계가 사용되고 있지만 실제 단일 수위-유량관계가 포함하고 있는 오차가 얼마

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천해양연구실 박사후연구원 (E-mail : jjsungk@kict.re.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 하천해양연구실 책임연구원 (E-mail : wonkim@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 하천해양연구실 연구원 (E-mail : kimdg@kict.re.kr)

****유량조사사업단 연구개발실 선임연구원 (E-mail : cy_kim@kict.re.kr)

인지를 분석하기는 쉽지 않다. 정확하게 연속적으로 측정된 유량과 수위 자료가 있어야만 실제로 발생하는 수위-유량관계의 고리형 특성을 분석할 수 있는데 이와 같은 자료가 없으므로 인해 고리형 특성이 크지 않을 것이라는 막연한 추측 아래 단일 수위-유량관계만을 사용하고 있는 실정이다. 그러나 수위-유량관계의 오차로 인해 발생하는 유량오차의 파급성이 수자원 전분야에 매우 큰 것을 감안한다면 수위-유량관계의 고리형 특성 분석과 이의 해결을 위한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

소련 레닌그라드 주립 수문연구소에서는 수위-유량관계에 영향을 미치는 인지를 분석하기 위해 많은 수치실험을 실시하였는데(Cunge 등, 1980) 그 결과에 의하면 주요 인자는 시간에 따른 유량의 변화, 하상경사, 조도계수 등이다. 또한 미국 기상청(Fread, 1976)에서는 고리형 수위-유량관계와 그 영향 인자들간의 관계를 분석하고 실측 유량과 비교한 바 있다. Schmidt(2002)는 부정류 흐름에서 생성되는 수위-유량관계에 대해서 분석하고 자연하도에 적용가능한 수위-유량관계를 이론적으로 개발하기 위한 가능성을 검토한 바 있다. 일본의 경우(吉谷純一과 寺川陽, 1997) 수면경사를 이용하여 고리형 수위-유량관계 보정하는 방법을 사용한 바 있다. ISO의 경우(ISO, 1986) 고리형 수위-유량관계의 보정을 위해 보조관측소를 사용하거나 유속지표를 이용하여 보완하는 방법을 제안한 바 있다.

국내에서는 수위-유량관계의 고리형 특성에 대한 연구는 많지 않은 편이다. 김원(1995)은 홍수시 흐름특성에 따른 수위-유량관계 곡선의 변화와 그 요인에 대하여 문헌조사와 실제 현상을 통해 분석한 바 있다. 이상호(2001)와 이상호와 강신욱(2001)은 수치모형을 이용하여 유량을 계산하는 방법을 연구한 바 있는데 상하류의 수위자료를 이용하여 중간지점의 유량을 조도계수에 대한 자동보정을 통하여 계산하고 이를 바탕으로 수위-유량관계를 개발한 바 있다.

국내 하천의 경우 지금까지 수위-유량관계의 고리형 특성에 대하여 구체적으로 분석한 사례는 많지 않다. 한국수자원공사(1999)는 낙동강 하구둑의 방류량 산정을 위해 Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP) 등을 이용한 유량측정을 실시하여 하구부 수위-유량관계의 고리형 특성을 조사하고, 수치모형에 의한 유량자료를 사용하여 상하류의 수위차를 감안한 수위-유량관계를 제시한 바 있다. 한국수자원공사 소양강댐관리단(2000)에서는 내린천, 복천 지점 등의 홍수유량 측정 자료를 바탕으로 수위-유량관계가 고리형으로 나타나는 것을 제시한 바 있다. 한국수자원공사 안동권관리단(2000)에서도 길안, 영양 등의 홍수유량 측정자료를 바탕으로 수위-유량관계가 고리형으로 나타나는 것을 보인바 있다. 그러나 아직까지 실제하천에서 수위-유량관계의 고리형 특성에 대하여 일반화할 수 있는 충분한 연구는 진행되지 못하고 있다. 이는 국내 하천의 지형적 특성과 흐름 특성상 발생할 수 있는 수위-유량관계의 고리형 특성이 상이하기 때문이며, 따라서 기존에 사용되는 단일 수위-유량관계의 오차 및 한계에 대해 제시할 수 없었다. 본 연구에서는 국내 몇 지점에 대한 수위-유량관계의 고리형 특성을 분석하고 수치모형에 의해 고리형 수위-유량관계를 재현하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 댐 방류량 및 실측 Acoustic Doppler

Velocity Meter(ADV) 자료와의 비교로부터 수치모형을 이용한 간접유량 산정의 적용성을 제시하였으며, 본 연구결과는 기존 단일 수위-유량관계의 오차 분석과 고리형 수위-유량관계 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수위-유량관계의 불규칙성

2.1 하천에서의 수위-유량관계

일반적으로 널리 사용되고 있는 하천에서의 수위-유량관계는 일대일의 단일 관계이다. 이와 같은 수위-유량관계는 하천 수위와 유량의 변화가 동일하다는 기본 가정에 기반을 둔 것이나 실제 하천에서의 수위-유량관계는 이 가정을 만족시키지 못하는 경우가 많다. 하천의 흐름을 나타내는 일차원 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성되는 St. Venant 방정식이며, 운동량방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다(김 원, 1995).

$$Q = CA \sqrt{R \left(S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v \partial v}{g \partial x} - \frac{1 \partial v}{g \partial t} \right)}$$

운동파 (kinematic wave)

확산파 (diffusion wave)

동역학과 (dynamic wave)

$$= f \left(h, \frac{\partial y}{\partial x}, \frac{v \partial v}{g \partial x}, \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량, C 는 Chezy 계수, A 는 단면적, R 은 동수반경, S_0 는 하상경사, y 는 수심, x 는 거리, v 는 유속, g 는 중력가속도, t 는 시간이다.

식 (1)에서 $\partial y / \partial x$ 항은 수심에 따른 압력항을 나타내며, $\partial v / \partial x$ 는 대류가속도항, $\partial v / \partial t$ 는 국부가속도항을 나타내고 있다. 식 (1)은 흐름이 부정류일 경우의 식으로, 식에서 보는 바와 같이 유량은 수위와의 일대일 관계로 나타낼 수 없다. 즉 하상경사가 일정하다고 가정하면 유량은 수위만의 함수가 아니라 압력항과 두 개의 가속도항의 함수로 나타나게 된다. 일반적으로 사용되는 일대일 수위-유량관계는 압력항과 두 개의 가속도항이 커지게 될 경우 사용할 수 없는 상태에 도달한다는 것이다.

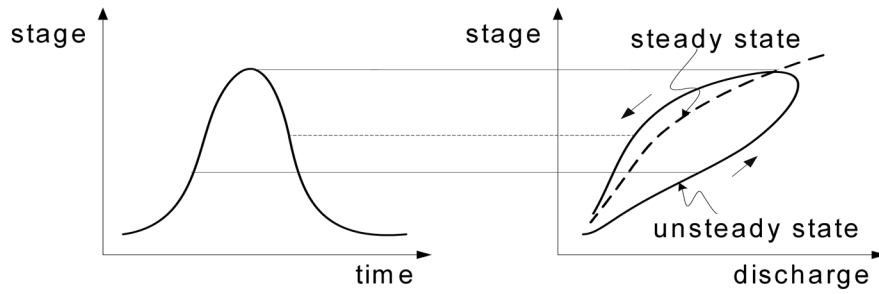
흐름이 정상류일 경우에는 압력항과 두 개의 가속도항이 없어지게 되므로 식 (1)은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$Q = CA \sqrt{RS_0} = f(h) \quad (2)$$

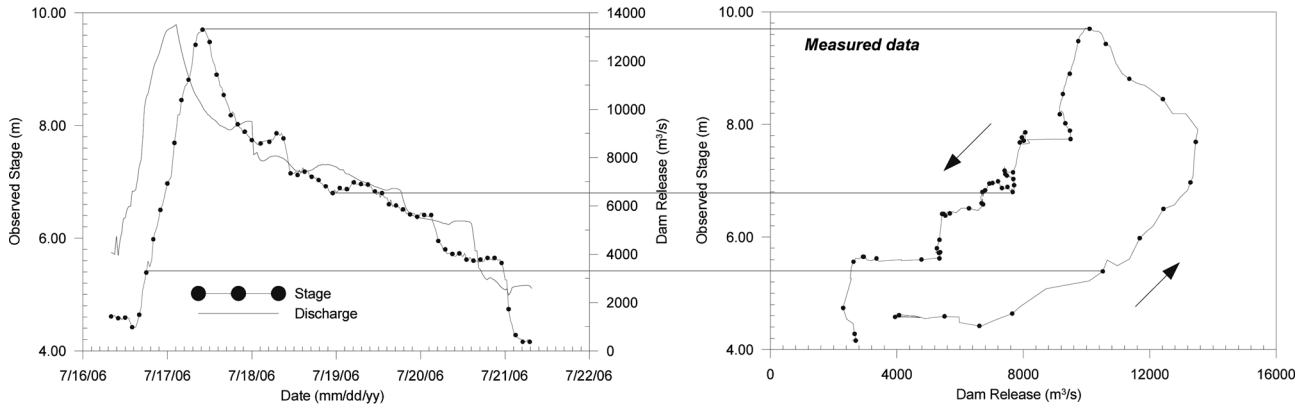
식 (2)에서 보는 바와 같이 정상류의 경우에는 유량과 수위가 일대일의 관계로 나타나게 되는 것이다.

식 (1)과 식 (2)에서 알 수 있듯이 일대일 관계의 수위-유량관계는 정상류상태에서만 성립한다. 그러나 일반적으로 하천에서 발생하는 흐름은 정상류 상태로 나타나지 않으며 다양한 크기의 부정류 항을 포함하게 되므로 일대일 수위-유량관계에는 많은 오차가 포함된다. 지금까지는 대부분 이와 같은 부정류 항이 크지 않을 것으로 가정하고 일대일 관계의 수위-유량관계를 사용해 왔다. Fig. 1은 흐름 형태에 따라 달라지는 수위-유량관계를 나타낸 것으로, 2006년 7월 충주조정지점 하류 약 5.0 km 지점에 위치한 목계교의 수위자료와 댐 방류량으로부터 고리형 수위-유량관계를 확인할 수 있다.

소련 레닌그라드 주립 수문연구소(Stage Hydrologic Institute of Leningrad, USSR)에서는 수위-유량관계에 영향



(a) Looped stage-discharge relation (Cunge et al., 1980)



(b) Measured stage-discharge relation at Mokgae station (2006.07)

Fig. 1 Unsteady flow stage-discharge relationship

을 미치는 인자를 분석하기 위해 많은 수치실험을 실시하였는데(Cunge 등, 1980) 그 결과에 의하면 주요 인자는 시간에 따른 유량의 변화, 하상경사, 조도계수 등이다. 즉, 시간에 따른 유량의 변화가 클수록 수위-유량관계의 고리형 특성이 증가하며, 하상경사가 클수록 고리형 특성이 작아지고, 조도계수가 클수록 고리형 특성이 증가한다는 것이다. 이와 같은 결과는 이을래와 김원(2002)의 수치실험에서도 재현된 바 있다.

지금까지의 선행연구에서 살펴본 바와 같이 수위-유량관계의 고리형 특성은 특정 요소에 의해서 발생하는 것은 아니다. Cunge 등(1980)이 기술한 바와 같이 수위-유량관계의 고리형 특성은 크게 두가지 요소, 즉, 지형인자(하상경사, 조도계수 등)와 흐름요소(시간에 따른 유량의 변화)가 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 있다. 또한 식 (1)에서 나타난 바와 같이 부정류에서 나타나는 고리형 특성은 특정 항에 의해서 형성되기보다는 여러 항의 복합적인 영향으로 나타나게 된다. Cunge 등(1980)이나 이을래와 김원(2002)에서도 수치실험에 의해 지형인자와 흐름요소가 고리형 특성에 어떤 영향을 미치는지 검토한 바 있다. 이와 같이 수위-유량관계의 고리형 특성은 특정 지형인자나 흐름 인자에 의해서 발생하는 것이 아니기 때문에 실제 하천에서 발생하는 고리형 특성을 예측하거나 계산하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 감안하여 실제 발생하는 수위-유량관계의 고리형 특성을 살펴보고, 수치모형에 의해 고리형 수위-유량관계를 모의하였다.

2.2 실측 자료에 의한 수위-유량관계 분석

본 연구에서는 실제 하천에서 홍수시 발생하는 수위-유량

관계의 고리형 특성을 분석하였다. 이를 위해서는 실측된 수위-유량관계 자료가 필요하나 홍수시 연속적으로 측정된 유량자료가 거의 없는 상황이기 때문에 실측된 수위-유량관계를 얻는 것은 불가능하다. 실측된 수위-유량관계의 분석을 위해 본 연구에서는 댐방류량을 이용하였는데 댐 방류량의 경우 수리모형실험 등의 방법에 의해 검증되었기 때문에 상대적으로 정확한 유량으로 볼 수 있기 때문이다. 본 연구에서 선정한 댐 지점은 팔당댐, 충주조정지댐, 괴산댐 등 3개 댐이다. 팔당댐 지점의 경우 팔당댐과 팔당대교의 거리가 약 3.9 km로 비교적 짧고 중간에 유량에 변화를 줄 수 있는 지류나 취수장이 없기 때문에 홍수시 팔당댐과 팔당대교의 유량이 동일한 것으로 볼 수 있다. 이를 바탕으로 팔당댐 방류량과 팔당대교의 수위를 이용하여 팔당대교 지점의 실측 수위-유량관계를 산출하였다. 충주조정지댐의 경우에는 댐 하류 약 5.0 km 지점에 위치한 목계교의 수위자료와 댐방류량을 사용하였다. 충주조정지댐과 목계교 사이에는 대전천과 영덕천이 유입되지만 각각 유역면적이 20.55 km², 95.27 km²인 지방2급 하천으로 4000 m³/sec 정도의 댐 방류시 본류의 유량에 미치는 영향은 미비할 것으로 판단하였고, 침두홍수량 약 13,000 m³/sec인 사상의 자료로부터 실측 수위-유량관계를 산출하였다. 또한 괴산댐 지점의 경우 괴산댐 지점과 괴산 수위관측소간의 거리가 약 0.7 km로 짧고 중간에 유량에 변화를 줄 수 있는 지류나 취수장이 없기 때문에 괴산댐의 방류량과 괴산 수위관측소의 수위를 이용하여 괴산 수위관측소의 실측 수위-유량관계를 산출하였다.

Fig. 2~4는 침두홍수량이 유사한 각 2개의 홍수사상에 대한 팔당대교 지점의 관측 수위-유량(댐 방류량) 관계를 나타낸 것으로 이 지점의 수위-유량관계가 매우 강한 고리형 특

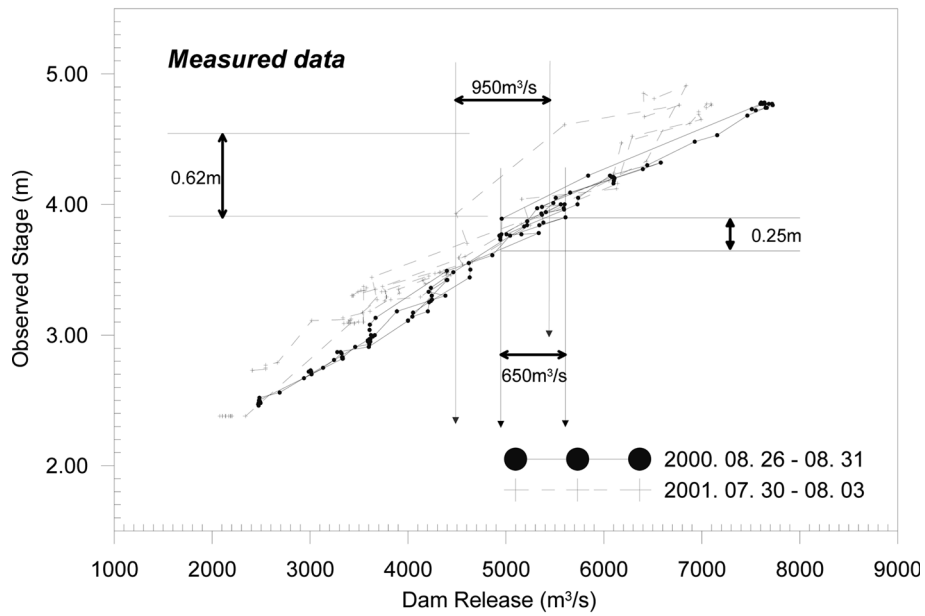


Fig. 2 Measured stage-discharge relation at Paldang Bridge in 2000, 2001

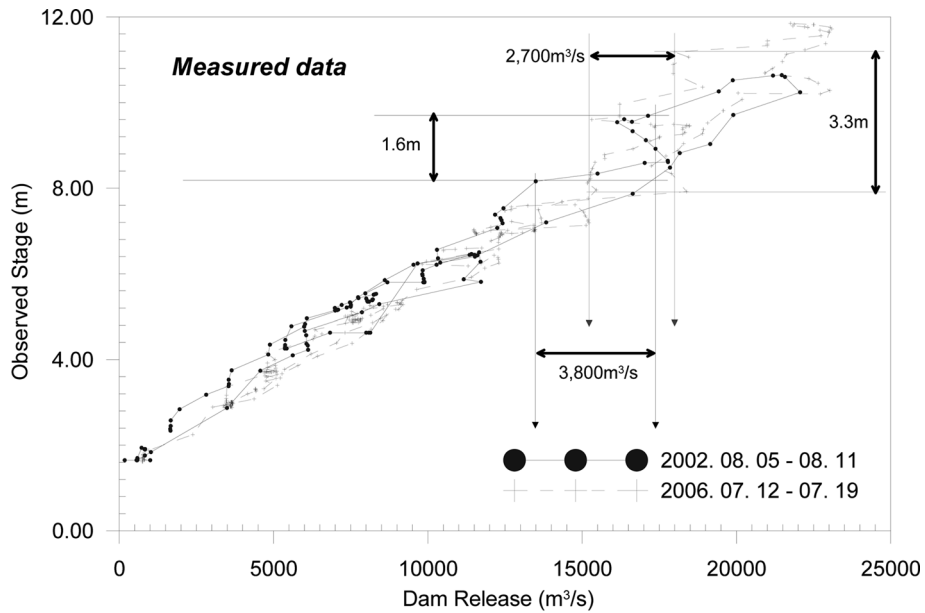


Fig. 3 Measured stage-discharge relation at Paldang Bridge in 2002, 2006

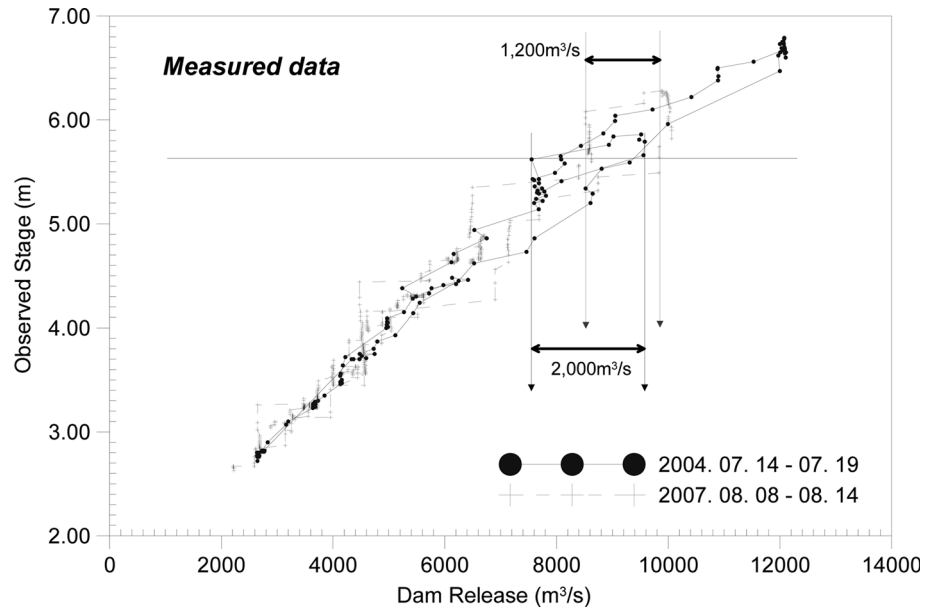


Fig. 4 Measured stage-discharge relation at Paldang Bridge in 2004, 2007

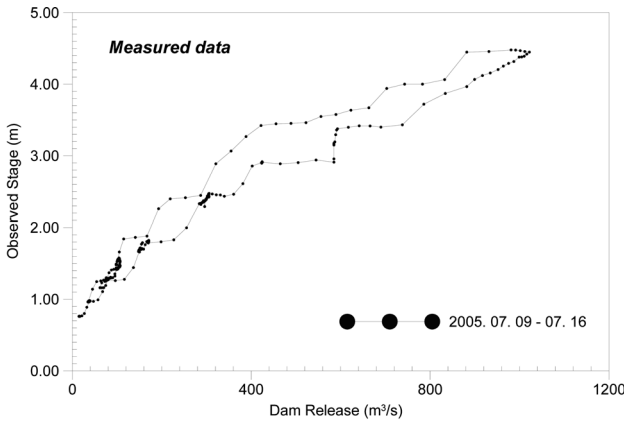


Fig. 5 Measured stage-discharge relation at Goesan station

성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 3의 2002년과 2006년 홍수의 경우 최대홍수량은 약 22,000 m³/sec, 23,000 m³/sec로 매우 큰 경우인데, 동일 수위에서 약 3,800 m³/sec, 2,700 m³/sec의 유량이 차이가 나며, 동일 유량에서 약 1.6 m, 3.3 m의 수위가 차이가 나타나고 있어 수위-유량 관계의 고리형 특성으로 인해 나타나는 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 이러한 분석결과가 비록 댐 방류시점과 같은 시점의 수위자료를 사용함에 의한 댐 방류량의 도달시간 및 방류 초기의 감쇠효과가 무시된 것에 기인하는 것이라 하더라도 매우 강한 고리형 특성이 나타나고 있으며, 이러한 특성은 각 홍수사상마다 모두 상이한 결과를 나타내고 있다. Fig. 5는 괴산 수위관측소 지점의 실측 수위-유량관계를 나타내고 있는데, Fig. 1에 제시된 목계교 지점의 고리형 수위-유량관계와 Fig. 2~4의 팔당대교 지점에서 분석된 결과처럼 강한 고리형 특성을 나타내고 있다.

본 연구에서 대상 지점으로 선정된 팔당대교, 충주조정지댐, 괴산 수위관측소의 경우 각 지점마다 하상이나 하폭, 흐름특성이 많이 다르다. 그럼에도 불구하고 각 지점의 수위-유량관계는 매우 강한 고리형 특성을 보여주고 있어 홍수시 가속도항이 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이로 인해 일반적으로 사용되는 단일 관계의 수위-유량관계와는 완전히 다른 형태를 나타내고 있는 것이다. 즉 지금까지 가속도 항 등 부정류 항들이 흐름에서 큰 비중을 차지하지 않으며 그로 인해 일대일의 단일 수위-유량관계를 사용하는 데에 많은 오차가 발생하지 않을 것으로 가정했는데, 본 연구에서 분석한 세 개 지점 모두에서는 매우 강한 고리형 수위-유량 관계가 형성되었으며 기존에 고려하지 않았던 부정류 항이 매우 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 하상 특성, 흐름 특성 등을 고려하여 많은 지점에서 수위-유량관계의 고리형 특성에 대한 더 많은 분석이 필요함을 제기함과 동시에 지금까지 일반적으로 사용되고 있는 단일 수위-유량관계에 많은 오차가 포함될 수 있음을 나타낸다고 할 수 있다.

3. 수치모형에 의한 수위-유량관계 계산

수위-유량관계의 강한 고리형 특성은 흐름의 부정류 특성으로 인해서 발생하며, 그 항은 구체적으로 압력항, 대류가속도항, 국부가속도항의 크기에 크게 좌우될 수 있다. 지금

까지 사용되고 있는 일반적인 유량측정 방법에 의해서 이와 같은 고리형 수위-유량관계를 개발하는 것은 불가능하다. 또한 일반적인 단일 수위-유량관계는 지점 특성에 따라 많은 오차를 내포할 수 있다. 이와 같은 상황에서 고리형 수위-유량관계를 분석하는데 사용할 수 있는 유용한 방법이 수치모형을 이용하는 것이다. 본 연구에서는 1차원 수치모형을 이용하여 고리형 수위-유량관계를 재현하기 위하여 김원 등 (2005a, 2005b)이 개발한 모형을 사용하였다.

3.1 1차원 수치모형

1차원 하천흐름의 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S = 0 \quad (3)$$

여기서

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} Q \\ Q^2/A + gI_1 \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} -q \\ -gI_2 - gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 A=단면적, Q=유량, g=중력가속도이며, I₁은 단면에 작용하는 정수압력을 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

$$I_1 = \int_0^{h(x,t)} [h(x,t) - \zeta] \alpha(x, \zeta) d\zeta \quad (5)$$

여기서 h는 수심이며, σ는 수심 ζ에서의 수면폭으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha(x, \zeta) = \frac{\partial A(x, t)}{\partial \zeta} \quad (6)$$

식 (4)에서 q는 지류 횡유입량을 나타내며, I₂는 하도 단면의 축소 또는 확대에 의해 발생하는 힘을 나타내는 것으로 다음 식으로 정의된다.

$$I_2 = \int_0^{h(x,t)} (h(x,t) - \zeta) \left[\frac{\partial \alpha(x, \zeta)}{\partial x} \right]_{h=h_0} d\zeta \quad (7)$$

또한 S_f는 마찰경사로서 Manning 식에 의해서 정의될 수 있다.

김원 등(2005a, 2005b)은 음해 상류이송기법을 이용하여 하천의 불규칙한 단면을 정확하게 고려하여 흐름을 모의할 수 있는 모형을 개발한 바 있다. 이 모형은 하천단면에 대한 보정없이 모든 하천 단면을 그대로 반영할 수 있으며, 보 등으로 인해 발생하는 불연속 흐름을 해석할 수 있는 장점이 있다. 또한 생성항에 대한 효율적인 처리를 통해 하상이나 하폭의 변화로 인해 발생하는 흐름의 변화를 정확하게 해석할 수 특징이 있다.

3.2 수위-유량관계의 계산

본 연구에서는 일차원 수치모형을 팔당댐-전류 수위관측소 구간에 적용하였다. 이 구간의 흐름을 계산하기 위해 2002년에 측량된 214개의 횡단측량 자료를 모두 사용하였으며 잠실수중보와 신곡수중보의 설계단면을 반영하는 88개의 횡단자료를 추가하여 모두 302개 지점으로 구성하였다. 이에 따라 단면간 거리간격은 수중보 지점에서는 최소 0.5 m, 그 외의 구간에서는 최대 878.0 m로 결정되었다. 대상구간의 경우 하폭의 수심방향의 변화가 심하기 때문에 이를 반영하기 위해 모든 지점에서 16개의 표고별 하폭 관계로 단면을 구성하였다. 상류단 경계조건으로 팔당댐 방류량, 하류단 경

Table 1. Summary of flood events

Number	Duration	Peak discharge of the Paldang dam (m ³ /s)	Peak stage of downstream boundary (m)
1	2001/08/26-2001/08/31	7,099	4.66 (Jeonryu)
2	2006/07/12-2006/07/19	23,084	8.49 (Haengju)
3	2007/08/08-2007/08/14	10,060	5.42 (Jeonryu)

계조건으로 전류 수위관측소의 관측수위를 사용하였으며 실측수위에 대한 검증과정을 거쳐 구간별 유량별로 0.02와 0.05 사이의 Manning 조도계수 값을 산정하였다. 이와 같이 구성된 모형은 김원 등(2005a)에서 실측자료를 이용하여 검증된 바 있다.

본 연구에서 사용한 일차원 수리학적 모형의 장점은 동역학적 모형이기 때문에 연속방정식과 운동량방정식으로 구성되는 흐름의 지배방정식을 그대로 반영한다는 것이다. 따라서 횡단면 측정 자료가 있는 지점에서는 식 (1)과 같이 나타나는 수위-유량관계를 완전하게 반영할 수 있다. 또한 수치모형에서는 각 지점에서 계산된 수위와 유량을 알 수 있기 때문에 각 지점마다 모형에서 계산된 수위-유량관계를 계산할 수 있다.

수치모형을 이용한 수위-유량관계를 계산하기 위하여 적용된 홍수사상은 침투홍수량을 참고하여 Table 1과 같다. 2006년 홍수사상의 경우 전류수위표의 결측으로 인하여 행주대교 수위자료를 하류단 경계로 사용하였다. 2007년 홍수사상의 경우, 연속적으로 실측된 유량 자료의 부족으로 실측수위에 대하여 검증하는 지금까지의 방법뿐만 아니라 한강대교에서 ADVM으로 실측된 연속적인 유량자료에 대한 검증과정을 추가하였다. 한강대교에 설치된 ADVM의 구성 및 운영, 유량 산정 절차 그리고 측정결과는 김창완 등(2007)과 건설교통부(2007)를 참고하였다.

Fig. 6은 팔당대교 지점에서 실측된 수위와 수치모형에서 계산된 수위를 나타낸 것인데 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 팔당대교 지점에서 계산된 유량과 팔당댐 방류량을 각 홍수사상에서 비교한 것으로, 각 사상의 기간 중 1시간 단위의 평균 방류량과 식 (8), (9)와 같은 통계치 분석 결과를 함께 나타내었다. 3가지 홍수사상 모두에서 평균 댐 방류량에 비하여 RMSE, MAE가 매우 적게 나타나고 있으므로 댐 방류량과 팔당대교 지점의 계산 유량은 매우 잘 일치한다는 것을 보여준다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_c(i) - Q_o(i)]^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_c(i) - Q_o(i)| \quad (9)$$

Fig. 8(a)는 한강대교 지점에서 2007년 홍수사상 시기에 수집된 ADVM 자료와 계산된 유량, 그리고 동시기에 부자법 또는 유속계를 이용하여 직접 측정된 유량을 비교한 것이고, Fig. 8(b)는 실측 수위와 계산수위를 비교한 것이다. 분석결과 수위 뿐만 아니라 수치모형으로 계산된 유량이 ADVM 측정유량과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 반면 침투홍수량 시점의 부자법을 이용한 직접 측정결과는

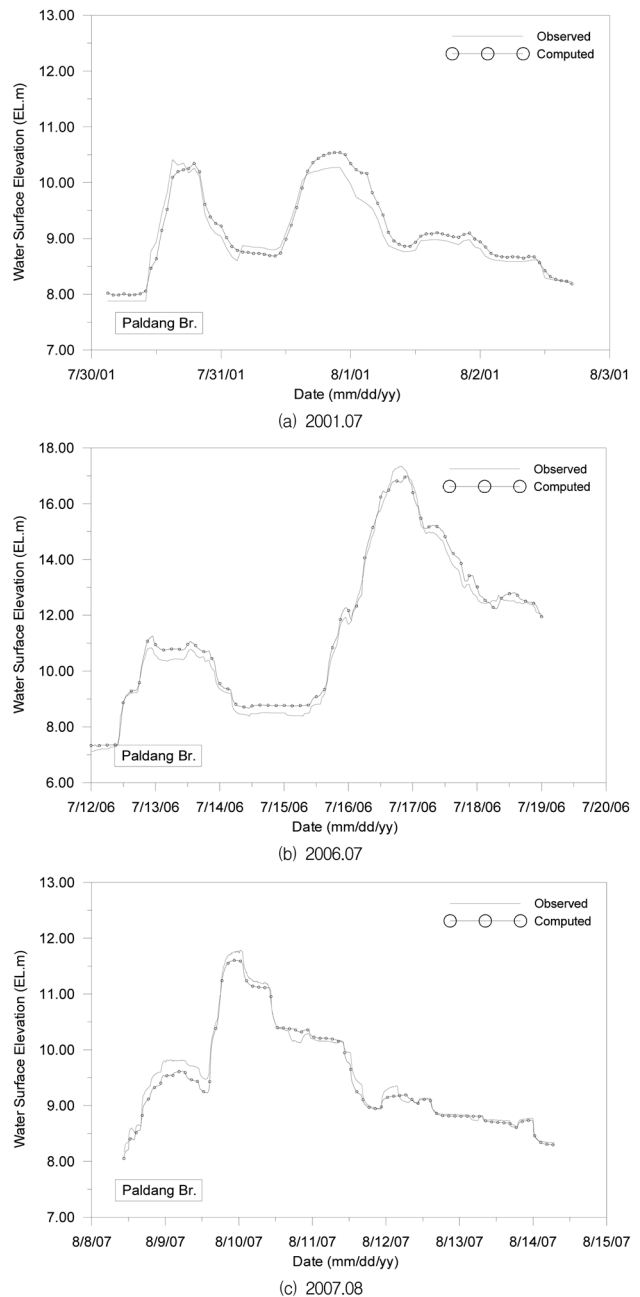


Fig. 6 Comparison of computed with observed stage

ADVM 및 수치해석에 의한 유량에 비하여 약 2,000 m³/s 큰 유량을 나타내고 있다. 이는 침투홍수량의 20%를 초과한 값이며, 홍수기 부자법에 의한 유량 측정의 오차가 매우 클 수 있음을 의미한다. 2007년 홍수사상의 경우 팔당댐에서 방류된 침투홍수량은 10,060 m³/s 이었다. 그러나 한강대교 지점에서 계산된 침투홍수량은 유하 중 하도 저류, 지체 등으로 인하여 9,814 m³/s로 약 250 m³/s가 감소됨을 알 수 있으며, 이러한 부정류 흐름특성을 수치모형이 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9에서는 계산 유량과 ADVM

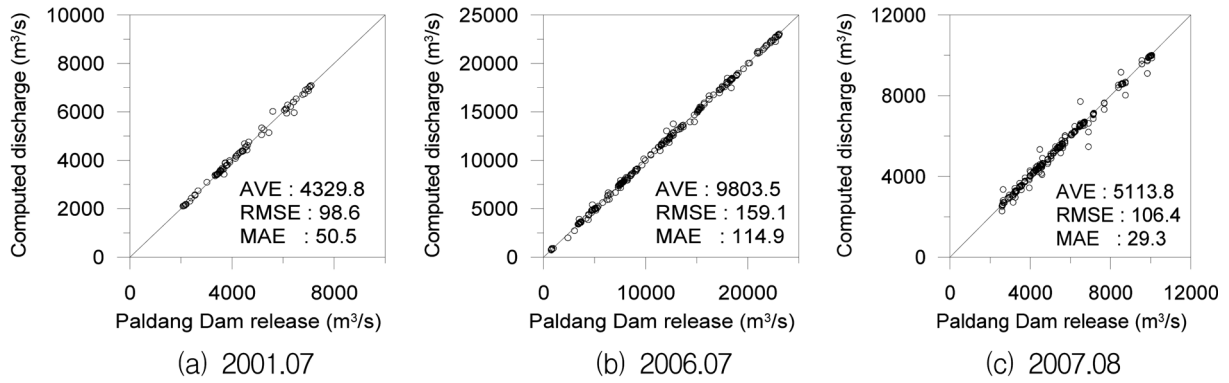


Fig. 7 Comparison of computed with dam release discharge

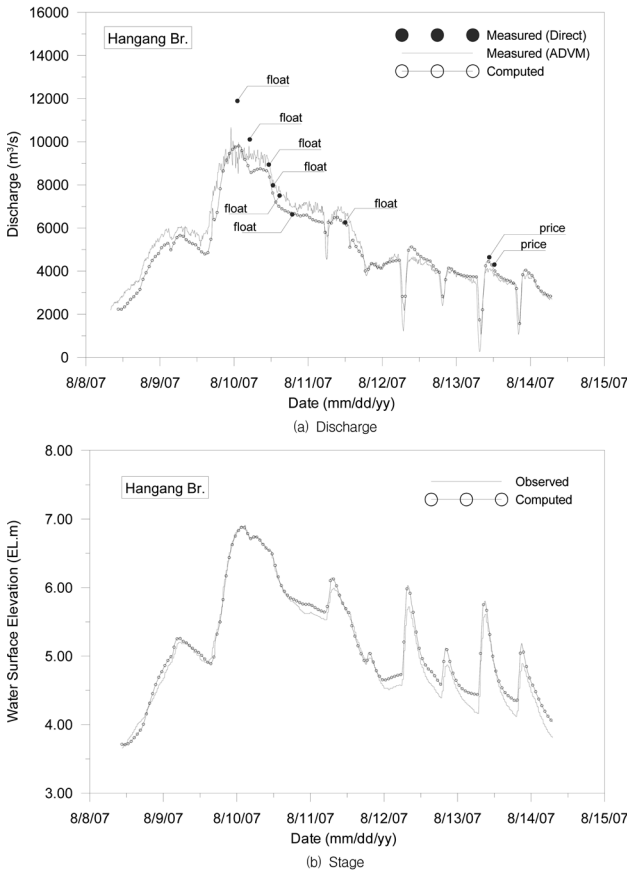


Fig. 8 Comparison of computed with measured data at Hangang station

자료를 정량적으로 비교하여 나타내었다.

Fig. 6~9로부터 팔당대교 및 한강대교에서 실측된 유량, 수위 값이 수치모형에서 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. 다시 말해서 적절한 보정을 통해 검증된 수치모형은 실제 수위뿐만 아니라 유량을 재현할 수 있으므로 수위-유량관계의 개발에 있어 충분히 간접적인 대안이 될 수 있음을 보여 준다. 침투홍수량이 약 23,000 m³/s인 2006년 홍수사상에 대하여 팔당대교에서 실측된 수위-유량관계와 본 연구에서 계산된 수위-유량관계, 그리고 2000년 한강홍수통제소에서 개발된 팔당대교 단일 수위-유량관계(www.wamis.go.kr)를 Fig. 10에 비교하였다.

비교결과 실측된 수위-유량관계의 고리형 특성을 수치모형이 잘 재현하고 있음을 알 수 있으며, 동일 수위에서 유량이 큰 값이 수문곡선 상승부이며 작은 값이 수문곡선 하강 부인데 수치모형에서도 동일한 경향을 보이고 있다. 비록 수

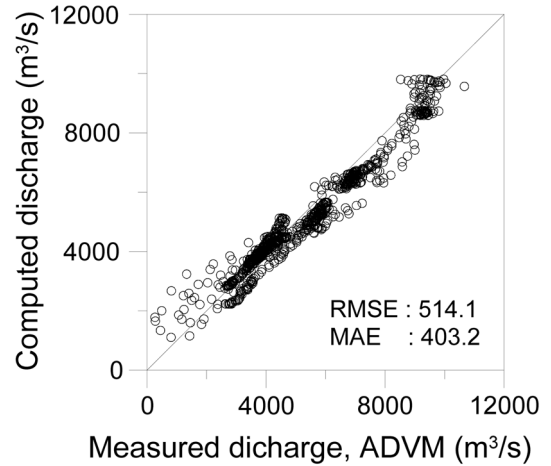


Fig. 9 Comparison of computed with ADVM discharge

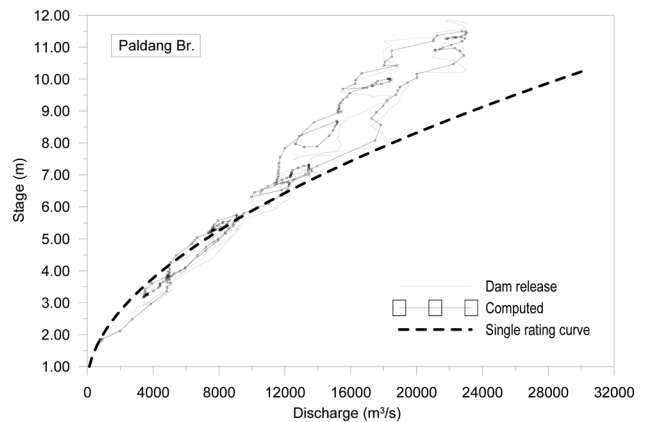


Fig. 10 Real stage-discharge relationship and single rating curve at Paldang bridge

치모형에서 계산된 수위-유량관계와 실측된 수위-유량관계가 완벽하게 일치하지는 않으나 고리형 특성의 형상, 크기 등이 거의 일치하고 있어 수치모형으로 고리형 수위-유량관계를 계산할 수 있음을 검증하고 있다. 단일 수위-유량관계의 경우, 약 6.5 m 관측수위(약 12,000 m³/s) 이상에서 과대한 유량 추정 결과를 보이고 있는데, 이는 Fig. 9에서 확인한 바와 같이 고유량 시기 부자법이 지닌 한계로 인하여 개발된 단일 수위-유량관계가 왜곡된 것으로 판단된다.

Fig. 11은 2007년 8월 홍수사상에 대하여 조석의 영향을 적게 받는 고유량 시기와 조석의 영향을 크게 받는 저유량 시기의 한강대교 지점에서 ADVM으로 실측되고 수치모형으로 계산된 수위-유량관계와 2006년 수위-구간별 단일 수위-

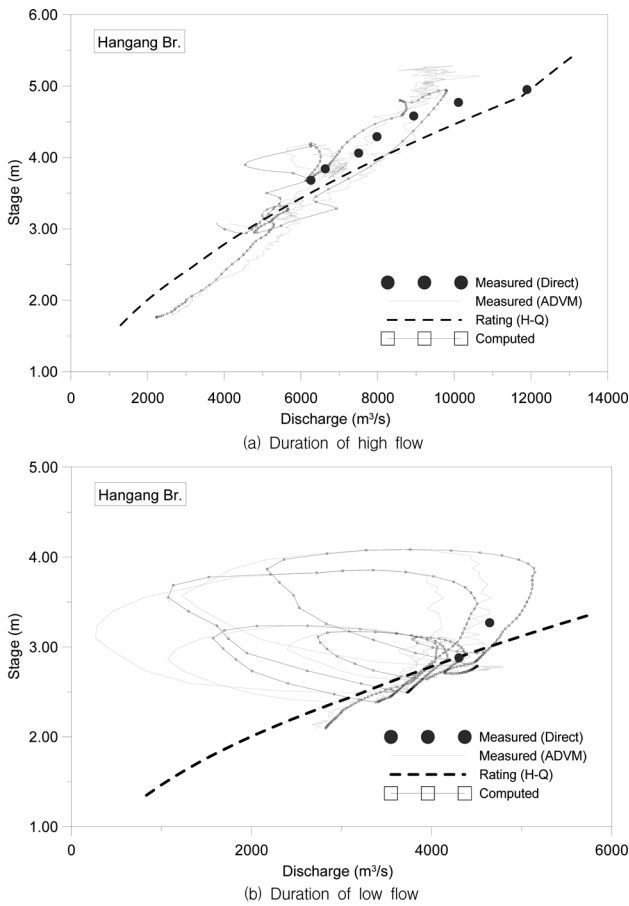


Fig. 11 Real stage-discharge relationship and single rating curve at Hangang bridge

유량관계(건설교통부, 2006)를 비교한 것이다.

비교결과, 작성된 단일 수위-유량관계는 고유량 시기의 부자법에 의한 측정결과에 크게 영향을 받을 수 있어, 첨두기의 유량산정에 큰 오차를 포함할 수 있다. 조석의 영향을 받는 저유량 시기에서는 매우 강하게 고리형 수위-유량관계가 나타나며, 상류의 다른 지점과는 달리 일부 수위에서 흐름이 거의 정지하는 경우가 나타나고 있고, 동일한 수위에서 약 4,000 m³/s 이상의 유량차이를 보이고 있는데, 단일 수위-유량관계로는 이러한 감소하천 특성을 나타낼 수 없음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 서해 조석 변화로 인해 한강대교에서 발생하는 흐름의 변화를 수치모형이 비교적 잘 재현하고 있음을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 수위-유량관계의 고리형 특성을 실측 자료를 이용해서 분석하였으며, 수치모형을 통해 고리형 수위-유량관계의 계산이 가능함을 제시하였는데 주요 결론은 다음과 같다.

1. 팔당대교, 충주조정지댐, 괴산 수위관측소 등 3개 지점의 실측 수위-유량관계를 분석한 결과 세 지점 모두에서 수위-유량관계가 매우 강한 고리형 특성을 지니는 것으로 나타났으며, 이러한 고리형 특성은 동일한 지역에서도 홍수사상에 따라 매우 다르게 나타났다.
2. 단일 수위-유량관계의 기본가정이 성립되지 않는 지점에

서 기존 수위-유량관계는 매우 큰 오차를 내포하게 되며, 따라서 부정류 흐름특성을 고려한 수위-유량관계가 반드시 필요함을 확인하였다.

3. 본 연구에서는 2002년 측량된 단면자료를 사용하였으며 하상의 변화를 고려하지 않았다. 그러나 하천의 중형단을 정확하게 고려할 수 있는 수치모형을 이용하여 팔당대교와 한강대교 지점의 수위-유량관계를 계산한 결과, 실측 수위-유량관계를 잘 재현할 수 있는 것으로 나타났다. 하상의 변동이 매우 심한 충격하천을 제외한다면 수치모형을 이용한 수위-유량관계의 작성은 유량측정의 한계를 고려할 때 매우 신뢰성있는 간접유량 산정의 대안이 될 수 있다.

본 연구에서 수위-유량관계의 고리형 특성에 대해서 분석하고 수치모형으로 계산이 가능함을 제시하였는데, 추후 더 많은 지점의 실측 수위-유량관계에 대한 분석을 통해 우리나라에서 일반적으로 사용되고 있는 단일 수위-유량관계의 한계와 오차에 대해서 추가적인 분석이 필요할 것이다. 본 연구결과는 기존 단일 수위-유량관계의 오차 분석과 고리형 수위-유량관계 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-3-1)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2006) 한국수문조사연보(유량편).
 건설교통부(2007) 자동유량측정시설 구축 및 운영 보고서.
 김원(1995) 홍수시 흐름 특성에 따른 수위-유량관계곡선의 변화와 그 요인, 건설기술정보, 한국건설기술연구원, pp. 6-10.
 김원, 한건연, 우효섭(2005a) 일차원 상류이송모형의 자연하도에 대한 적용, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 333-343.
 김원, 한건연, 우효섭, 최규현(2005b) 상류이송기법에서의 새로운 생성형 처리기법, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제2호, pp. 155-166.
 김창완, 이민호, 노영신, 정상화(2007) 조석의 영향을 받는 하천에서 자동유량측정의 적용성 검토, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 1262-1265.
 이상호(2001) 수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량관계식 작성, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 551-560.
 이상호, 강신욱(2001) 수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 하천유량 간접 추정, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 543-549.
 이을래, 김원(2002) 수리학적 영향인자에 의한 수위-유량관계곡선의 분석, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 175-178.
 한국수자원공사(1999) 낙동강 하구둑 방류량 산정 방법 개선, 수자원연구소, WRRI-WR-99-3.
 한국수자원공사 소양강댐관리단(2000) 2000년 소양강댐 유량측정 등 수문기초조사 보고서.
 한국수자원공사 안동권관리단(2000) 2000년 임하댐 유량측정 보고서.
 Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey A. (1980) *Practical aspects of computational river hydraulics*, Pitman, Boston,

Mass.

- Fread, D.L. (1976) *A dynamic model of stage-discharge relations affected by changing discharge*, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-16, Office of Hydrology, National Weather Service, Washington, D.C.
- Schmidt, A.R. (2002) *Analysis of stage-discharge relations for open-channel flows and their associated uncertainties*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

ISO (1986) *Liquid flow measurements in open channels - Stage-fall-discharge relations*, ISO Technical report 9123, ISO/TR 9123.

吉谷純一, 寺川陽 (1997) 洪水流量算出精度向上のための水位流量曲線式照査の一方法, *土木技術資料* 第39巻 第7號, 財團法人土木研究センタ, pp. 26-31.

(접수일: 2008.3.4/심사일: 2008.4.25/심사완료일: 2008.11.12)