

하천 수위-유량곡선식 개선 및 모형개발 Stage-Discharge Rating Curve Model Development and Modification

장기환* / 이재형**

Chang, Ki Hwan / Lee, Jae Hyung

Abstract

The goal of this study is to recommend a new type of stage-discharge rating curve ($Q=p(h-e)^\beta-\gamma$) useful for satisfying divergence, and one other seemingly irresolvable problem related to existed rating curves, while also extending this rating curve model.

The problem of divergence is that during the finding of the CZF (cease-to-zero flow) parameter e and while minimizing the sum of total errors of the estimated curve, the exponential parameter β become an abnormally large value. The insoluble problem is that when the value e is greater than the recorded minimum at the gauged stage, it is impossible to have a negative logarithm value ($h-e$). The two problems above can be satisfied by adapting the control value γ , which affects the reduction of β and gives us the possibility of controlling ($h-e$) over zero.

The study results show that the effects of parameter γ are very similar to that of e when conducting physical and sensitivity analyses. This system can be used towards developing a new stage-discharge rating curve for river discharge, for use in evaluating the acceptability of existing stage-discharge rating curves generated by using hydrologic analyses at all stations.

keywords : stage-discharge rating curve, rating curve, river flow measurement

요 지

본 연구의 목적은 기존 수위-유량곡선식에 내재되어 있던 발산과 처리 불능문제를 해결하기 위한 새로운 형태의 관계식($Q=p(h-e)^\beta-\gamma$)을 제안하고 그러한 수위-유량곡선식 산정모형을 개발하였다.

발산 문제는 영유량 수위 매개변수 e 를 찾고 추정된 식의 총오차 값을 최소화하는 동안 승수 매개변수 β 가 비정상적으로 커지는 것이다. 불능 문제는 e 값이 계측 최소수위 이상의 값일 때 ($h-e$)값이 음수가 되어 로그값을 취하는 것이 불가능하다는 것이다. 이상의 두 가지 문제는 제어변수 γ 를 도입함으로써, β 를 감소시키는 효과와 "0" 이상으로 ($h-e$)를 제어할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 물리적 분석과 민감도 분석을 통하여 수위-유량곡선식에서 매개변수 γ 의 영향이 e 의 영향과 거의 같음을 보였다. 또한 개발된 WinCARD 시스템은 모든 수위국의 수문분석에 사용되는 기존 수위-유량곡선식의 적합도를 평가하고, 하천유량 산정을 위한 신규 수위-유량곡선식을 작성하는데 활용될 수 있다.

핵심용어 : 수위-유량곡선식, 유량관계식, 하천유량측정

* 한국수자원공사 금강북부권지역본부 본부장
Director, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea
(e-mail: khchang@kowaco.or.kr)

** 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof. Dept. of Civil Eng., Chonbuk National Univ., Jeonju 361-763, Korea
(e-mail: hyoung@chonbuk.ac.kr)

1. 서론

하천 유량에 대한 정확한 정보는 모든 수자원 분석의 기본조건이며 댐운영, 수리 및 수문모형의 개발, 수리권과 물분쟁의 소송을 위한 기록, 하천 및 수리구조물 설계, 유역의 유사량과 오염총량제 실시를 위한 기초자료로 이용된다.

하천의 유량을 알기 위해서는 유량을 직접 계측하는 방법이 있으나, 이는 한 지점의 하나의 유량을 구하는 것으로서 대체로 많은 비용이 필요하며, 특히 홍수시에는 계측자체가 불가능한 경우도 있어 이를 연속적으로 계측하는 것은 어렵다. 이러한 유량측정 방법을 개선하기 위하여 유량측정을 실시하고 그 때의 계측수위와 측정유량을 도시하여 수위-유량곡선식(Stage-Discharge Rating Curve 또는 Rating Curve)을 유도하고, 지속적으로 계측된 하천수위를 수위-유량곡선식에 대입하여 그 수위에 대한 하천유량을 얻는다(ISO, 1998; 건설교통부, 2004, 참고 그림 1).

수위-유량관계 기술의 태동은 1800년대 초기로 추정되며, 그 후 약 100년 이상 지속되어 오면서 20세기 전 반부에 많은 기술적 발전이 이루어졌다. 유량산정을 위하여 수위-유량곡선식을 이용하는 방법은 지속적이고 정확한 수위계측, 유량측정과 더불어 수문자료 신뢰도 제고에 중요한 핵심 요소이다. 현재의 수위-유량곡선식 기술은 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 많은 연구가 수행되었으며 이러한 연구성과는 USGS 발행 문헌과 웹사이트에서 제공되고 있다 (Corbett 등, 1943; Kennedy, 1984; Rantz 등, 1982). 그러나, 이러한 유구한 세월에도 불구하고 정작 수위-유량곡선식의 형태, 물리적 의미와 기존방법의 문제점에

대한 연구는 많지 않다(박재영, 2004; Schmidt, 2002).

현재 지수형태의 수위-유량곡선식은 가장 널리 알려져 있고 이용되고 있다. 하나의 지수식으로 특정지점의 유량을 분석할 수 없을 경우에는 수위를 여러 구간으로 구분하여 각각의 구간에 각기 다른 지수식을 적용하고 있다(ISO, 1998). 이러한 지수식의 매개변수를 산정하는 방법에 대해서 Hershy (1995)와 ISO (1998)는 수리적방법, 수학적방법, 도해적방법 및 수치적방법을 제시하고 있다. Dickinson (1967)과 박재영(1987)은 편미분에 의한 영유량 수위를 찾는 방법을 제시하였고, 이한구(2003)는 결정계수를 최대화하는 방법으로 solver를 이용하는 방법을 제시하였다. 이렇게 산정된 수위-유량곡선식은 그림으로 도시하여 측정성과와 비교하도록 권고되고 있으며(ISO, 1998), 이러한 부분을 개선하기 위해서 다양한 그래픽 기법과 신뢰도를 나타낼 수 있는 CARD 프로그램(박재영, 1987)이 개발되어 약 15년이상 사용되어 왔고, 최근에는 이한구(2003)에 의해 HydroToolKit이 개발되어 엑셀과 윈도우 형태로 발전하여 왔다.

지수형태의 수위-유량곡선식은 수치적 방법으로 작성할 경우 기준수위 이하로 자료를 Fitting할 수 없는 불능처리 문제가 발생하기도 하며, 천이구간 등 기존 지수식으로 해결할 수 없는 경우에는 다항식(2차, 3차)에 의한 수위-유량곡선식의 개발도 제시되었다(Hershy, 1995; ISO 1998; 건교부 2004). 이로 인해 지수형 수위-유량곡선식의 통일된 형태가 변하게 되었으며, 회귀분석에 의한 통계적 처리 중심으로 발전하면서 다양한 형태의 다항식 또는 로그식으로 변하는 경우도 발생하게 되었다(한국수자원공사, 2002). 지수식에서 다항식으로 변화될 경우에는 물리적 기본개념인 기준 영유량 수위의 의미도 상실하게 되었다(박재영, 2004).

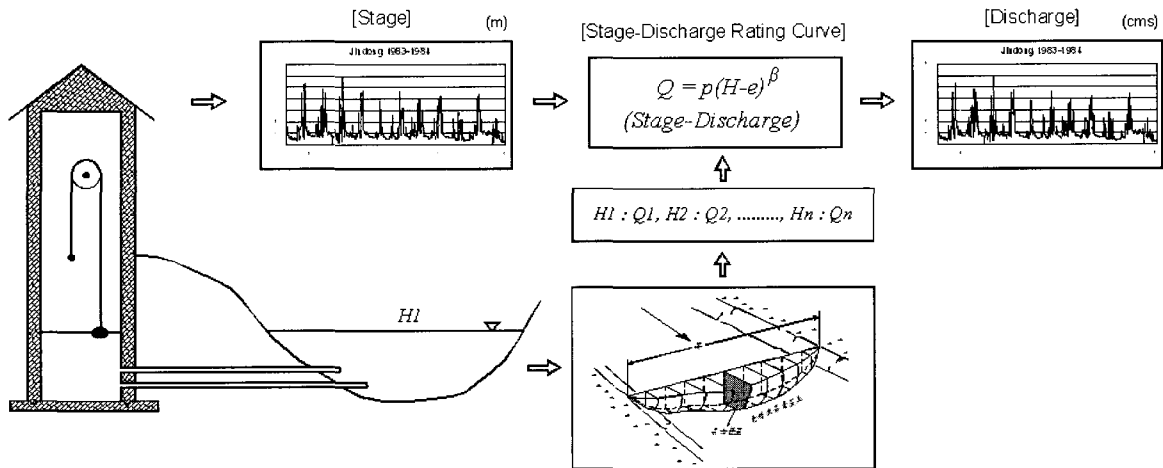


그림 1. 수위관측 및 유량산정 개념도

본 연구에서는 수위-유량곡선식의 수정 지수식 도입을 통하여 물리적 의미와 영유량 수위 조성시 발산 및 불능처리 문제를 개선하고, 처리과정의 일관성을 기하기 위해 그래픽 처리와 자료구축 과정을 해결하기 위한 모형개발과 검증에 논하였다.

2. 수위-유량곡선식 이론 및 개선 방향

자연현상에 대한 접근 방법은 물리적인 현상을 규명하여 이에 따른 원리로부터 이후에 대한 예측을 수행할 수 있도록 하는 근원적인 접근방법과 현상자체에 치중하는 통계적 또는 추계적인 접근방법으로 구분할 수 있다. 일반적으로 이러한 구분을 결정론적 접근방법과 확률론적/추계학적 접근방법으로 표현하기도 한다. 자연현상을 명확히 규명한다는 것은 거의 불가능하지만 자연현상에 근접하도록 도전해 나가는 과정을 모형화(Modeling)과정이라고 표현하며, 이러한 모형화는 자연현상에 어떻게 하면 보다 근접하도록 할 것인가가 영원한 명제(Thesis)라고 할 수 있다.

다시 말해 모형화의 원칙은 그 접근방식이 어떻든 간에 가장 자연현상에 근접할 수 있도록 구성되어야 하며, 이러한 접근 원칙은 자연현상에 대한 물리적 의미 부여의 과정을 통하여 구현되어질 수 있다. 따라서 현재 ISO (1998)에서 제시하고 있는 가장 일반적인 지수형태의 수위-유량곡선식도 하천 수리학적 입장에서 식 (1)을 통하여 물리적 의미를 분석하는 것이라 할 수 있다.

$$Q = p(h - e)^\beta \quad (1)$$

여기서, $(h - e)$ 는 제어지점에서 유효수심, h 는 계측수심, e 는 유량이 "0" 되는 유효계측 수심(영유량 수위), β 는 대수축상의 수위에 대한 유량경사, p 는 유효수심 $(h - e)$ 가 1일경우의 유량값으로 상수이다.

하천의 수위-유량 관계의 기본 특성을 살펴보면, 하나의 수위-유량곡선식을 영구적으로 사용할 수 없다는 데 유의해야한다(가변성, Variability). 즉, 수위-유량 곡선은 수시로 유량을 측정하여 해당 단면(혹은 지점)의 경년적(經年的) 변동양상을 반영시킬 수 있어야 한다(ISO, 1998).

본 연구에서는 하천유량의 주요 물리인자에 대한 검토와 이를 통한 문제점에 대하여 논하며, 이를 근거로 좀 더 개선된 이론을 전개하고자 한다.

2.1 하천형상 인자

하천의 가변성으로 인해 하천유량은 경년적으로 변

화하기도 하지만, 하도통제의 경년적 변화는 매우 작으므로 수위가 높을 경우에는 수위-유량의 관계가 잘 정의될 수 있다. 그러나 중·하류부, 하구부에서 모래 등으로 구성된 침식이 쉬운 하상(河床)에서는 세굴과 퇴적, 하도 형태의 변동 때문에 측정유량의 분산이 커지고 또한, 수위-유량 곡선은 시간에 따라 계속적으로 변화하며, 때로는 수위-유량 관계가 들변하는 경우도 있다. 하천의 유량흐름을 지배하는 물리인자는 인공구조물, 하상재료, 하도의 크기, 모양, 기울기, 조도(粗度), 법선의 형상(alignment), 단면의 확대 또는 축소, 단면형상 등이 포함된다.

하천흐름을 지배하는 수리학적 요인을 통제기능(Control)이라고 하는데, 수위-유량의 관계에서는 크게 단면통제(section control)와 하도통제(channel control)로 구분된다.

단면통제란 자연 하도나, 인공 구조물이 하도를 가로지르는 암반의 돌출부, 여울목의 굽은 자갈, 웨어 등으로서, 이런 단면은 수리학적으로 매우 안정적인 수위-유량의 관계를 유지시켜 주고 주로 저수위일 때만 유효한 경우가 대부분이며, 수위가 높아지면 그 효과는 감소하여 점차 하도통제의 지배를 받게 된다.

하도통제란 일정한 유량에 대하여 수위를 결정해 주는 하도의 모든 물리적 인자로 구성되며, 여기에는 하도의 크기, 모양, 기울기, 조도(粗度), 법선의 형상(alignment), 단면의 확대 또는 축소, 단면형상 등이 포함되며 하도의 폭이 유량의 규모를 결정한다. 하도통제를 받는 경우에는 세굴 또는 퇴적으로 인한 단면변화가 유량의 변화에 주는 영향은 상대적으로 크지 않으며, 대체로 홍수시의 유량을 지배한다.

복합통제(Combination control)란 일부 하천에서 단면과 하도 통제가 복합적으로 나타나는 경우로 수위와 유량의 천이구간(Transition Zone)이 일반적으로 얇은 구간의 단면에서 하도통제로 변화하는 것을 말한다(ISO, 1998; 이한구, 2003; 건설교통부, 2004).

하천유량에 영향을 미치는 물리적 요인 중에서, 수위-유량곡선식이 일반적으로 어떠한 형식을 취하는가를 탐지하기 위해서는 수면경사를 일정하다고 가정하고, 또한 횡단면이 수학적으로 표시할 수 있는 규칙적 단면일 경우를 가상하면 그림 2와 같다.

상기의 단면형상에 따른 여러식을 실제의 유형에 적용하여 보면 지수유량에 대하여는 포물선 단면식, 고수유량에 대하여는 구형 단면식과 제형 단면식이 실제와 잘 부합하며, 산간부에서는 하상의 암반이 삼각형 단면의 수로를 닮은 경우에 한하여 삼각형 단면식이 부합한다. 이것은 ISO (1998)에서 권고하고 있는 수위-유량곡

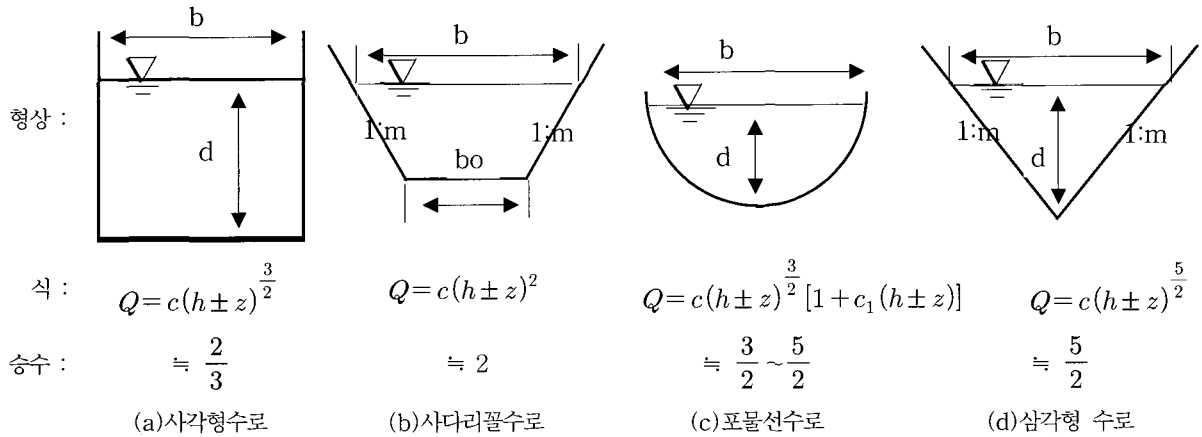


그림 2. 단면형상에 따른 수위유량곡선식의 승수변화도

선식의 경사(승수)가 단면통제의 경우 2이상, 하도통제의 경우 2이하를 권고하고 있는 결과와 잘 일치하는 것을 보여준다.

2.2 영유량(CTF, cease-to-flow, ISO, 1998) 수위

유량이 "0"이 되는 실제 계측수위가 단면통제가 되는 지점에서 가장 낮은 계측수위(GZF, Gage of Zero Flow)이다. 일반하천의 경우 이 값은 현장조사를 통하여 통제단면에서 가장 깊은 곳의 계측수위 값에 속도수두를 감하여 설정할 수 있다(ISO, 1998). 일반적으로 측정단면 하류로서 수면경사의 단절이 발생하는 하천단면을 조사하여 얻을 수 있다.

하도통제 지점에서 영유량 수위를 얻기 위해서는 계측수위로 부터 적정 근사수위를 빼어 대수축에 직선이 되도록 하는 최소 수위이다. 단면통제 구간에서 영유량 수위를 결정하는 가장 적절한 시기는 갈수시 도보로 물을 건너갈 수 있을 때 조사하는 것이 바람직하며, 이를 현장에서 보나 웨어 등과 같은 인공구조물과 여울 등에서 직접 확인할 수 있지만 그렇지 못한 경우가 많다.

유효 영유량 계측수위 ($h-e$)는 계측수위에서 영유량 수위를 감하여 계산할 수 있으며 이를 감안하여 자료를 대수지에 도시할 때는 직선으로 나타난다. 인공구조물에서 유효 영유량 계측수위는 실제 CTF와 거의 같게 나오나, 자연하천에서는 유효 영유량 계측수위가 보다 크게 나온다. 통제단면의 모양이 급격히 변하는 곳에서 또는 단면통제 구간에서 하도통제 구간으로 변하는 수위구간에서는 유효 영유량 수위는 변하게 된다. 이러한 결과는 결국 각 통제조건 마다 몇 개의 구간으로 나누어서 분석해야 함을 의미한다.

규칙적인 단면에서의 영유량 수위는 실제 영유량 계측수위와 일치하게 되지만, 대부분의 경우에는 시행착

오법으로 그 값을 결정하게 된다. 처음에 일정한 값을 가정하고 대수축에 도시하여 모양이 위로 오목이면(U), 너무 큰 값이 가정된 것이고, 모양이 아래로 오목이면(O), 너무 작은 값이 가정된 것이다. 이렇게 몇 번의 시행착오를 거치면서 설정구간에 직선이 되도록 조정하여 결정한다(박재영, 1987; ISO, 1998). 그림 3은 영유량의 개념과 영유량 조정에 따른 대수축상의 변화도를 잘 나타내고 있으며, 그 밖의 영유량 결정방법은 Hershey (1995), 건교부(2004), 이한구(2003)와 박재영(1987, 2004)이 상세하게 소개하고 있다.

2.3 수위-유량곡선식의 물리적 의미와 불능처리 방법

상기 식 (1)의 각 매개변수에 대한 물리적 의미를 언급하면, 먼저 β 는 하천의 하폭과 규모에 대한 매개변수로써 하하천에서는 큰 값을 소하천에서는 작은 값으로 대수지의 유량축 절편을 나타낸다. 매개변수 β 는 하천 단면형상에 따른 계수로 하천의 규모와 하천 경사 등을 반영하고 대수축의 곡선경사에 해당된다. e 는 영유량 수위로 대수지에 자료의 곡선 산포도를 직선화시키기 위한 값이다.

앞에서 언급한 시행착오법에 의해 영유량 수위를 결정하는 경우에 결정된 영유량 수위보다 계측된 수위가 작을 경우 로그를 취하는 과정에서 불능 처리되며, 과도한 값을 더하는 경우 대수축상에서 직선화가 쉽게 되지만, β 값이 ISO의 권고치를 많이 벗어나는 경우가 발생하게 된다(박재영, 1987). 이러한 문제를 개선하기 위해서 ISO (1998)는 다항식(2차 또는 3차)을 권고하고 있으나, 이는 대수지상의 경사를 일정한 값으로 고정하는 결과를 초래하며 물리적 의미를 갖지 못하게 된다.

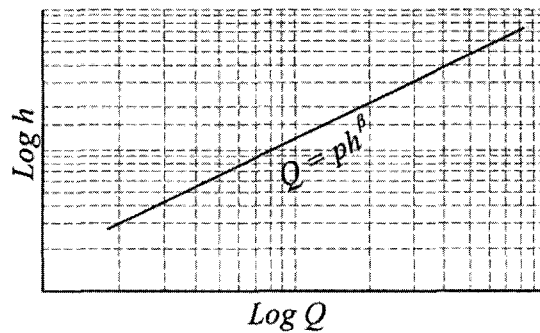
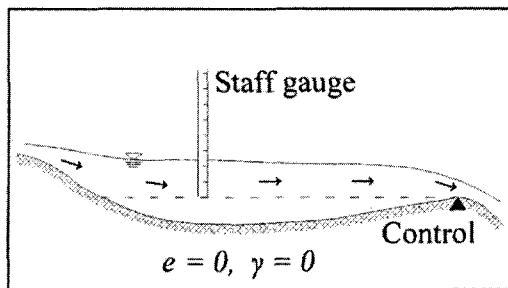
따라서 이러한 문제를 개선하기 위하여 변수 γ 가 도입된 식 (2)와 같은 수정 지수식을 도입하였다.

$$Q = p(h - e)^\beta - \gamma \quad (2)$$

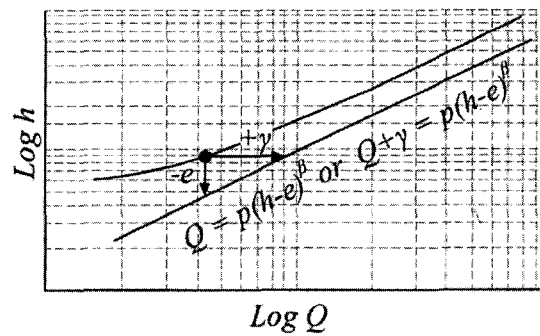
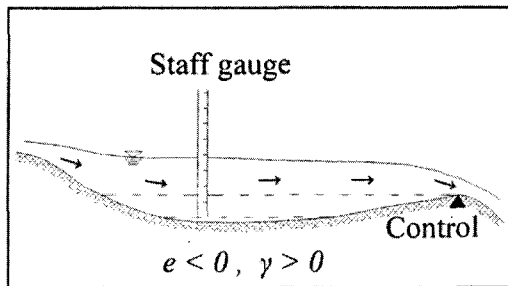
여기서 γ 는 발산 조정변수로서 특정수심 ($h - e$) 에서 물리적으로는 $-\gamma$ 이상의 작은 유량이 발생하지 않는 절대 최소유량을 의미한다. 그림 3은 영유량 수위 e 와 발산 조정변수 또는 절대 최소유량 γ 의 대수지상의 변화를 한눈에 보여주고 있다.

e 와 γ 는 곡선변화를 나타내고 있고 상호보완적 관계를 유지하고 있다. e 와 γ 의 역할에 대하여 좀 더 관찰해 보면 e 와 γ 는 같은 경향을 보이고 있으나, γ 는 좌변으로 이동하여 부호가 반대로 역전됨으로써 e 가

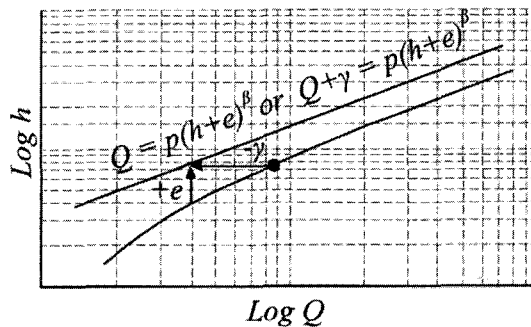
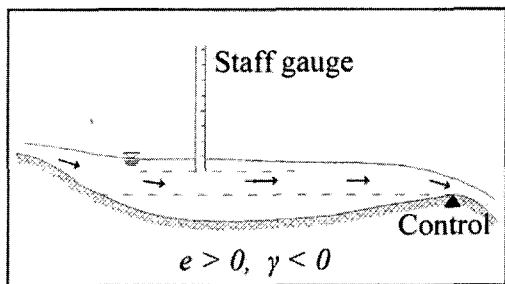
최저수위 이하로 산정 될 때 수위-유량곡선식의 불능치 리 되는 한계점을 극복할 수 있다. 즉, e 가 "-"방향으 로 변화하면 γ 변수가 좌변에서는 "+"항으로 변화하여 불능치리 한계점을 극복할 수 있게 된다. 예를 들어 심 하게 아래로 불록(U)인 자료에서 어느 한계 이상으로 e 를 감하여 자료의 산포도를 직선화하고 최저수위를 감 하여야 할 때에는 반대로 γ 변수를 유량(Q)항에 더해 서 극복할 수 있다. 특히, 영유량 수위인 e 를 현지조사 를 통하여 설정하였을 경우에는 γ 변수를 조정함으로 서 불능치리 문제를 구조적으로 해결할 수 있을 것으로 판단된다(박재영, 1987). 수위-유량곡선식의 매개변수에 대한 물리적인 의미, 대수지상의 변화특성 및 제약조건 을 요약하면 표 1과 같다.



(a) 수위표의 "0"수위가 영유량수위와 일치한 경우



(b) 수위표의 "0"수위가 영유량수위 이하로 설치된 경우



(c) 수위표의 "0"수위가 영유량수위 이상으로 설치된 경우

그림 3. 영유량수위 e 의 의미와 로그지상의 좌표변환 특성

표 1. 수정 지수식의 물리 적특성과 주요 지배인자

구분	물리적 특성	대수지상 특성	주요 지배인자	제약범위
p	하천규모를 나타내는 계수	유효수심 ($h-e$) 가 1일경우의 유량 값	하천폭과 규모, 단면적, 하도경사등	없음
e	단면통제시 영유량 수위(CTZ), 하도통제시 구간 최저수위	곡선보정, γ 와 반대방향	영점표고	최저계측수위이하
β	하천단면형상에 따른 계수	수위에 대한 유량경사	하천단면형상, 에너지경사	단면통제시 2이상 하도통제시 2이하
γ	특정값 이상의 절대 최소유량의 (-)값	곡선보정, e 와 반대방향	최저유량 및 저수부 하상단면	최저계측 유량이상

2.4 매개변수 추정

일반적으로 지수형태의 수위-유량곡선식의 매개변수를 산정하는 방법은 일차적으로 대수지에 자료의 산포도를 그리고, 산포도를 직선화하여 회귀분석으로 관련 매개변수를 산정해야 한다.

본 연구에서는 Dickinson (1967)과 박재영(1987)이 제안한 편미분방법에 γ 를 도입하여 다음과 같은 수정 지수식으로 도입하였다.

$$Q + \gamma = p(h - e)^\beta \quad (3)$$

상기 식의 양변에 Log를 취하여, 최소자승법(Least Square method)을 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum \epsilon^2 &= \sum (\log Q_r - \log \hat{Q})^2 \\ &= \sum \{\log Q_r - \log p - \beta \log H_r\}^2 = f(h) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $H_r = h - e$, $Q_r = Q + \gamma$, \hat{Q} 는 추정유량 이다.

상기 식이 최소가 되기 위해서는 각 매개변수에 대하여 미분 값이 "0"이어야 하므로

$$\frac{\partial f}{\partial p} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \beta} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial e} = 0 \quad (7)$$

상기 식 (5), (6), (7)을 정리하면

$$\sum_1^n \log Q_r - n \log p - \beta \sum_1^n \log H_r = 0 \quad (8)$$

$$\sum_1^n \log Q_r \log H_r - \log p \sum_1^n \log H_r - \beta \sum_1^n (\log H_r)^2 = 0 \quad (9)$$

$$\sum_1^n \frac{\log Q_r}{H_r} - \log p \sum_1^n \frac{1}{H_r} - \beta \sum_1^n \frac{\log H_r}{H_r} = 0 \quad (10)$$

미지수 p, e, β 3개와 3개의 식이 있으므로 수치기법을 이용하여 매개변수 p, e, β 를 구할 수 있다. 식 (8), (9)에서 p 와 β 를 구하면 식 (12)와 식 (13)으로 표현된다.

$$\log p = \frac{\sum_1^n \log Q_r - \beta \sum_1^n \log H_r}{n} \quad (11)$$

$$p = 10^{\frac{\sum_1^n \log Q_r - \beta \sum_1^n \log H_r}{n}} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\sum_1^n \log Q_r \sum_1^n \log H_r - n \sum_1^n (\log Q_r \log H_r)}{\left[\sum_1^n \log H_r \right]^2 - n \sum_1^n (\log H_r)^2} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 식 (10)에 대입하여 정리하면

$$\frac{\sum_1^n \log Q_r \sum_1^n \log H_r - n \sum_1^n \log Q_r \log H_r}{\left[\sum_1^n \log H_r \right]^2 - n \sum_1^n (\log H_r)^2} \quad (14)$$

$$-\frac{\sum_1^n \log Q_r \sum_1^n 1/H_r - n \sum_1^n \log Q_r / H_r}{\sum_1^n \log H_r \cdot \sum_1^n 1/H_r - n \sum_1^n \log H_r / H_r} = 0$$

상기 식 (14)를 만족하는 γ (또는 e)를 구하고 이렇게 구한 값을 식 (12)와 (13)에 대입하여 p 와 β 매개변수를 산정할 수 있다. 현지조사에 의해 영유량 수위 e 의 설정이 어려운 경우에는 γ 를 찾는 대신에 일차적으로 e 를 구하는 방법으로도 활용될 수 있다.

3. 수위-유량곡선식 모형개발

본 연구에서 개발한 시스템은 박재영(1987)이 개발한 DOS 운영체제에서 사용되던 CARD 프로그램과의 연속성을 위하여 WinCard로 명명하였다. WinCard는 Microsoft의 Visual.Net 프로그램을 이용하여 Net Framework 상에 운영될 수 있도록 개발되었다. GIS를 이용한 공간자료 관리는 단일운영 시스템이 순수한 ESRI의 MapObject를 이용하였고, DB sever frame은 Oracle 9i와 MS Access의 MDB를 사용하였으며, 수문시계열 도시 및 수위-유량 자료 Log변환에 의한 좌표 도시는 ChartFX2000 콤포넌트를 이용하였다.

앞에서 제시한 수위-유량곡선식의 매개변수 추정 과정을 개략 설명하면 다음과 같다.

- 1) GIS Layer 상에서 관측소를 선택하고
- 2) 선정관측소의 기존 수문시계열 정보를 Oracle sever에서 받고 다시 MS Access로 저장한다.
- 3) 분석기간과 범위를 입력받아 자료를 조회하며, HydroTool 프로그램을 이용하여 자료를 필터링 한다.
- 4) 현장조사 등을 이용하여 영유량 수위를 입력하고
- 5) 식 (14)에 의해 γ 값을 Newton Raphson 방법으로 비선형 해를 구하며
- 6) 회귀분석의 일화인 식 (12), (13)을 이용하여 관련 매개변수를 구한다.

7) 추정된 식의 유의성 검정을 실시하고 수위에 따른 신뢰구간을 산정한 후 그 결과를 도시하여 채택여부를 결정한다.

그림 4는 WinCard의 수행화면을, 그림 5는 시스템 흐름도를 나타내고 있다.

WinCard는 수문자료 검보정을 총괄적으로 수행할 수 있는 WinHydroTool (개발중)의 한 모듈로 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

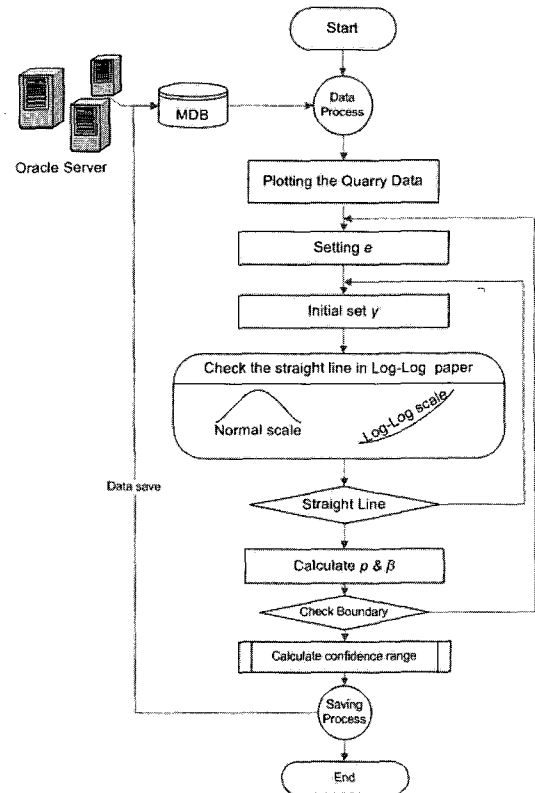


그림 5. WinCard 프로그램 흐름도

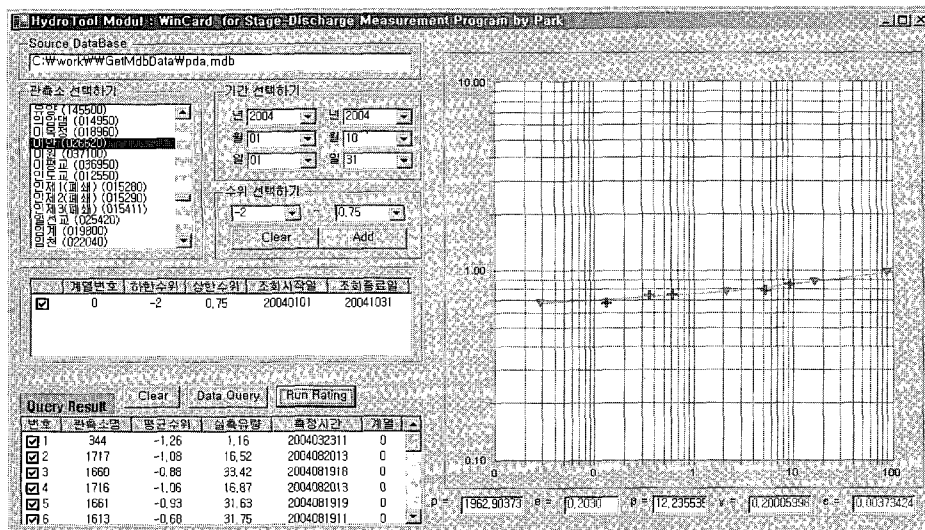


그림 4. HydroTool 모듈 : WinCard GUI

4. 모형 검증 및 적용

본 논문에서 제시된 수정 지수식에 의한 수위-유량 곡선식이 과연 실무에 응용될 수 있는지 등의 유의성 검증이 필요하므로, log 변환수치의 결정계수 R^2 (coefficient of determination) 과 Fisher가 제시한 F-distribution에 의한 유의성 검정 및 Student-t값에 의한 신뢰구간을 고려하였다. Fisher가 제안한 회귀식의 유의성 검정(significance test)은 log 변환된 단순 회귀모형에서 가설 $H_0: c=0$, $H_1: c \neq 0$ 로 세울때 검정 통계량 $F=MSR/MSE$ 의 기각역은 다음과 같이 주어진다.

$$F \geq F(1, n-2; \alpha) \quad (15)$$

본 연구에서는 유의수준 α (confidence Limit)를 입력함에 따라, 근사 계산법에 의한 $F(1, n-2; \alpha)$ 값을 산출하였다. 추정 수위-유량곡선식의 신뢰구간은 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\log \hat{Q} - t_p \cdot SD \leq \log Q \leq \log \hat{Q} + t_p \cdot SD \quad (16)$$

여기서 t_p = student-t value, SD = 표본 표준편차

상기 관계를 일반 scale로 변환시키면 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$10^{(-t \cdot SD)} \cdot \hat{Q} \leq Q \leq 10^{(t \cdot SD)} \cdot \hat{Q} \quad (17)$$

본 연구에서 제안한 수정 지수식에 대한 발산 조정 변수 γ 와 e 의 상호보완적 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석 결과 γ 의 증가 효과는 e 의 감소효과와 같은 경향을 나타내고, γ 의 감소효과는 e 의 증가효과를 나타내 상호 반대 방향으로 영향을 나타냈다. 따라서 최저수위 이하로 e 값이 선정될 때 불능처리 되는 경우는 γ 를 증가시켜 극복할 수 있음을 보여주고 있다.

그림 6은 각각의 매개변수에 대한 민감도 분석 결과를 나타내고 있으며, p 는 평행이동, e 는 곡선이동, β 는 경사변화를 나타내고, γ 는 e 와 반대방향의 곡선변화를 나타내고 있다.

한편, 표 2는 WinCard와 그림 7은 본 연구에서 제안한 수정지수식에 의한 수위-유량곡선식 산정결과와 수렴도를 보여주고 있다.

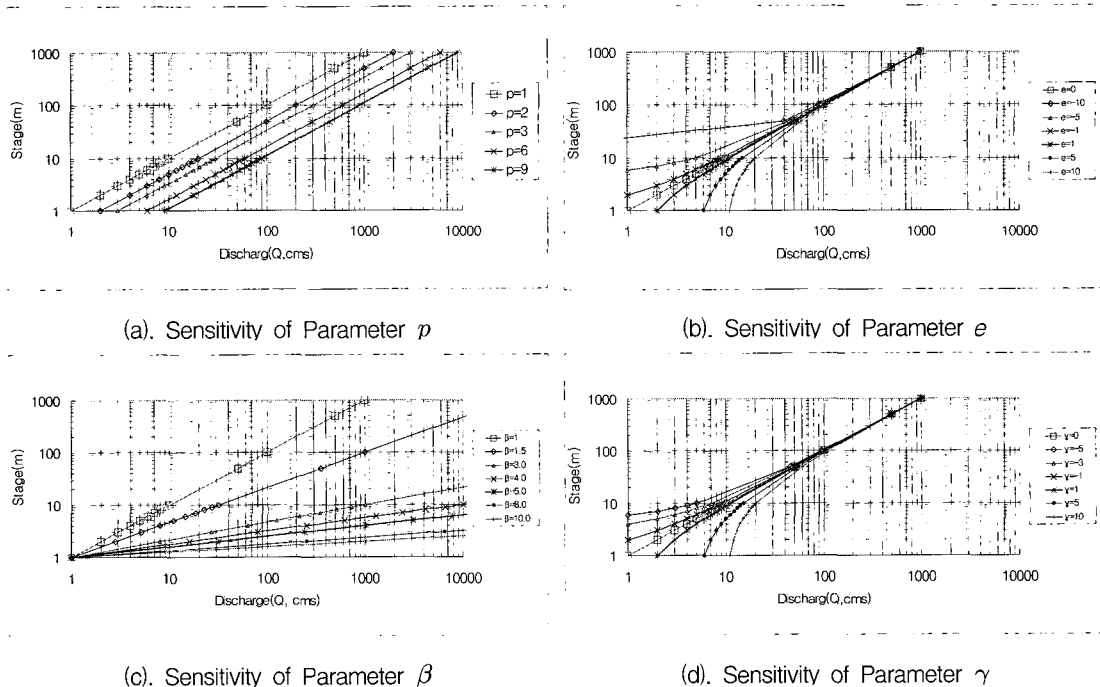
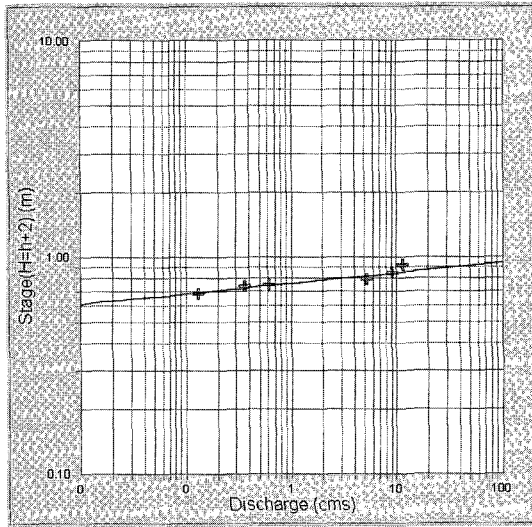


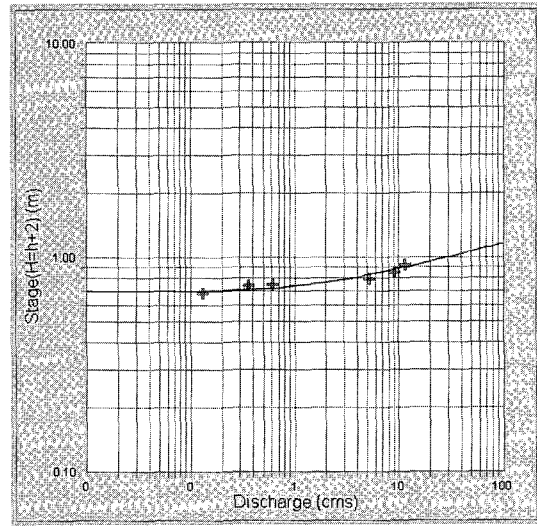
그림 6. 수정지수식 매개변수 민감도분석

표 2. 기존 지수식과 수정지수식의 분석결과(이안수위표지점)

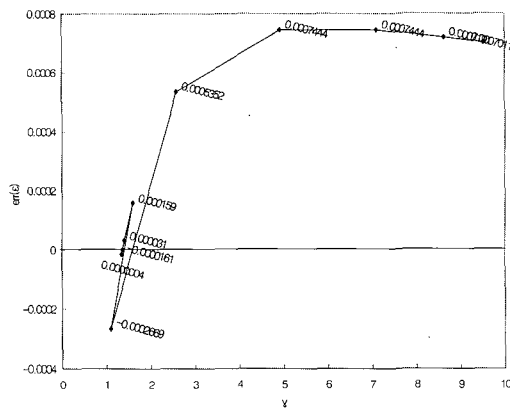
	p	e	β	γ	오차 ϵ	비고
기존(HydroToolKit)	1642.313	0.085	18.657	-	-0.8327384E+00	
본연구(WinCard)	60.524	0.085	7.539532	1.369740	4.00483126E-07	기존 e 활용
본연구(WinCard)	1932.908	0.554	4.697536	0.012050	5.76912770E-06	β 제약시



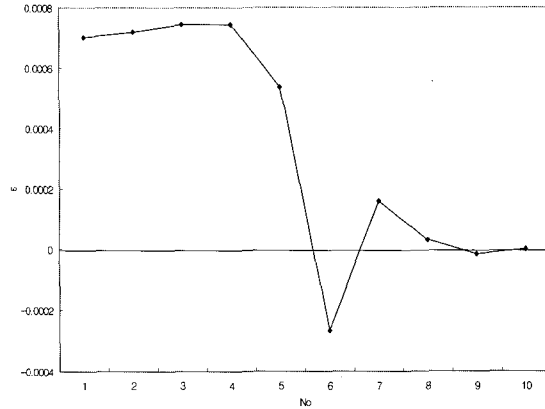
(a) 기존 지수식 추정결과(HydroToolKit)



(b) 본 연구 수정지수식결과(WinCard)



(c) γ 와 오차(ϵ)의 변화도



(d) 수치반복과 오차(ϵ)의 수렴도

그림 7. 기존 지수식과 수정지수식의 결과 비교(이인수위표지점)

5. 결론

살아있는 하천의 흘러가는 유량을 알기 위하여 하천의 수위를 유량으로 변환하는데 통용되고 있는 수위유량관계식 개발에 대한 국내외의 연구동향을 검토하여 현업실무에서 수문량을 분석하는데 가장 기초가 되고 중요한 하천유량산정을 위한 수정지수식 ($Q = p(h-e)^\beta - \gamma$) 을 제안하였고 이를 모형으로 발전시켰다.

본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수위-유량곡선식의 매개변수에 대한 물리적 의미를 보다 명확하게 분석하였고 통계처리상의 변화 특성을 제시하였다.
- 2) 수위-유량곡선식 산정시 영유량 수위 (e)의 물리적 의미와 별개로 회귀분석 결과를 그대로 적용하는 경우를 개선하여 불능처리인자 γ 를 제안하

였으며 그 실용성과 물리적 의미를 분석하였다.

- 3) 수위-유량 자료에서 최종 수위-유량곡선식 산정까지의 일련의 단계적 절차를 표준화 하였다.
- 4) 표준화된 절차를 구체화하고 효율을 배가시키기 위하여 WinCard 프로그램을 개발하였으며, 다양한 그림과 분석결과를 손쉽게 얻을 수 있도록 하였다.
- 5) 지수형태의 수위-유량곡선식으로 표현할 수 없을 경우 다항식 형태로 도입되던 문제를 개선한 수정 지수식으로 일원화 할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구를 통하여 얻은 일반화된 수위-유량곡선식 모형에 수면경사와 Froud수 등 수위-유량곡선식과 관련된 제반 요소를 반영하여 부정류 현상을 반영할 수 있는 새로운 모형개발이 기대된다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2004). 수문관측매뉴얼, 건설교통부 수자원국, pp. 108.
- 박재영 (1987). “최적수위유량곡선식 산정에 관한 연구”, 제3회 국가중앙소프트웨어경진대회(총무처), 한국수자원공사 조사계획처.
- 박재영 (2004). “수위-유량관계곡선식의 이해”, 하천수위유량과정, 한국수자원공사 수자원교육원, pp. 129-166.
- 이한구 (2003). 사용자설명서 수문자료상시평가프로그램/Rating 개발시스템, 한국수자원공사.
- 한국수자원공사 (2002). 기존수위유량곡선식에 대한 평가(1998-2001), 한국수자원공사 조사기획처(내부자료).
- Corbett, D.M., et al. (1943). *Stream-Gaging Procedure: A Manual describing methods and practices of the U. S. Geological Survey*, Water-Supply Paper 888, U. S. Geological Survey, pp. 245.
- Dickinson, W. T. (1967). *Accuracy of Discharge Determinations*, Hydrology Paper No. 20, Department of Civil Engineering, Colorado State University, pp. 54.
- Hersch, R. W. (1995). *Streamflow Measurement, Second Edition*, E & FN Spon, London, UK, pp. 524.
- ISO (1998). *Measurement of liquid flow in open channels- Part 2: Determination of the stage-discharge relation*, ISO1100-2: 1998(E), pp. 25.
- Kennedy, E. J. (1984). "Discharge rating at gaging stations," *Techniques of Water-Resources Investigation*, U. S. Geological Survey, Book 3, Chapter A 10. pp. 58.
- Rantz, S. E. et al. (1982a). *Measurement and Computation of streamflow: Volume1. Measurement of Stage and Discharge*, Water-Supply Paper 2175, U. S. Geological Survey, pp. 284.
- Rantz, S. E. et al. (1982b). *Measurement and Computation of streamflow: Volume2. Computation of Discharge*, Water-Supply Paper 2175, U. S. Geological Survey, pp. 285-631.
- Schmidt, A. R. (2002). *Analysis of Stage-Discharge Relations for Open-Channel Flows and Their Associated uncertainties*, Ph. D dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, U. S.

(논문번호:05-45/접수:2005.03.08/심사완료:2005.03.21)