

신개념의 수위-유량곡선식 개발과 적용 방향

박재영*, 오병동**, 김재복***, 채효석****

Jae young Park, Byoung Dong Oh, Jae Bog Kim, Hyo sok Chae

요 지

본 연구의 목적은 기존 수위-유량곡선식 개발과정에 내재되어 있던 목적함수 문제와 곡선식 개발과정에서 대두된 발산과 처리 불능문제를 해결하기 위해서 새로운 형태의 관계식($Q=p(h-e)^{\beta}-\gamma$)과 비선형 매개변수 추정방법을 이을 제안하고 이러한 신개념의 수위-유량곡선식 산정모형을 개발하는데 있다.

기존 수위-유량곡선식은 기존수위-유량자료를 log변환하여 산정된 목적함수는 저수위에 비하여 고수위 부분에 잘못된 유량 값을 추정하는 문제를 갖고 있다. 기존의 발산 문제는 영유량 수위 매개변수 e 를 찾고 추정된 식의 목적함수를 수렴하는 동안 매개변수 β 가 비정상적으로 커지는 것이다. 이상의 두 가지 문제는 제어변수 γ 를 도입하고, 목적함수 $\min \sum w(i)(Q-\hat{Q})^2$ 를 도입함으로써 개선 할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 물리적 분석과 민감도 분석을 통하여 수위-유량곡선식에서 매개변수 γ 의 영향이 e 의 영향과 같음을 보였다. 또한 개발된 WinCARD 시스템은 기존의 목적함수에 의한 추정오차와 새롭게 제안된 목적함수의 개선사항을 상호 비교할 수 있게 하였다. 본 개발프로그램은 기존 수위-유량곡선식의 적합도를 평가하고, 하천유량 산정을 위한 신개념의 수위-유량곡선식을 개발하는데 활용될 수 있다.

핵심용어 : 수위-유량곡선식, 유량관계식, 하천유량측정

1. 서 론

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

수위-유량관계 기술의 태동은 1800년대 초기로 추정되며, 그 후 약 100년 이상 지속되어 오면서 20세기 전반부에 많은 기술적 발전이 이루어졌다. 유량산정을 위하여 수위-유량곡선식을 이용하는 방법은 지속적이고 정확한 수위계측, 유량측정과 더불어 수문자료 신뢰도제고에 중요한 핵심 요소이다. 현재의 수위-유량곡선식 기술은 미국 USGS(United Stages Geological Survey)에서 많은 연구가 수행되었으며 이러한 연구성과는 USGS 발행 문헌과 웹사이트에서 제공되고 있다 (Rantz 등, 1982). 그러나, 이러한 유구한 세월에도 불구하고 정작 수위-유량곡선식의 형태, 물리적 의미와 기존방법의 문제점에 대한 연구는 많지 않다(박재영, 2004; Schmidt, 2002; 장기환, 이재형, 2005).

기존 수위-유량곡선식을 개발하는 과정에서 기존자료를 log변환을 수행하며 이렇게 변환된 자료로부터 최소자승법을 적용하여 매개변수를 개발하게 되는데 이러한 log변환이 고 유량자료를 극소화 시키므로써 결국 고수위 유량에 적절히 못한 곡선식을 도출하게 되는 결정적 결함을 갖고 있다. 즉 기존 방법은 저수위에 잘 맞고 고수위에서는 유량이 잘 맞지 않으며, log지에는 측정된 자료와 계산치가 일치 하는 것으로 보이나 실제로는 고수위에 많은 오차를 수반하게 되는 문제가 있다.

본 연구에서는 수위-유량곡선식의 수정 지수식 도입을 통하여 물리적 의미와 영유량 수위 조성시 발산 및 불능처리

* 한국수자원공사 조사기획처 과장, 공학박사, E-mail: jyp@kowaco.or.kr

** 한국수자원공사 임진강건설단 과장, 공학박사, E-mail: obdd@kowaco.or.kr

*** 한국수자원공사 조사기획처 부장, 학사, E-mail: kimjb@kowaco.or.kr

**** 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, 공학박사, E-mail: chaehs@kowaco.or.kr

문제를 개선하고, 고수위 유량에 많은 오차를 수반되는 최소자승법의 목적함수를 개선하고, 전역 비선형 매개변수 추정 방법 도입하는 신개념의 수위-유량곡선식 개발에 대하여 논하였다.

2. 기존 수위-유량곡선식 이론

모형화의 원칙은 그 접근방식이 어떠한 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 체어지점에서 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 없다는데 유의해야 한다(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).

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

하천유량에 영향을 미치는 물리적 요인 중에서, 수위-유량곡선식이 일반적으로 어떠한 형식을 취하는 가를 탐지하기 위해서는 수면경사를 일정하다고 가정하고, 또한 횡단면이 수학적으로 표시할 수 있는 규칙적 단면일 경우를 가상하면 단순화할 수 있다(박재영, 2006).

ISO(1998)에서 권고하고 있는 수위-유량곡선식의 경사(승수)가 단면통제의 경우 2이상, 하도통제의 경우 2이하를 권고하고 있는 결과와 잘 일치하는 것을 보여준다.

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).

규칙적인 단면에서의 영유량 수위는 실제 영유량 계측수위와 일치하게 되지만, 대부분의 경우에는 시행착오법으로 그 값을 결정하게 된다(박재영, 1987). 그림 3은 영유량의 개념과 영유량 조정에 따른 대수축상의 변화도를 잘 나타내고 있으며, 그 밖의 영유량 결정방법은 Hershy(1995), 건교부(2004), 이한구(2003)와 박재영(1987, 2004)이 상세하게 소개하고 있다.

3 신개념의 수위-유량곡선식 제안

상기 식 (1)의 각 매개변수에 대한 물리적 의미를 언급하면, 먼저 p 는 하천의 하폭과 규모에 대한 매개변수로써 대하천에서는 큰 값을 소하천에는 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. 실제 적용시에 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.

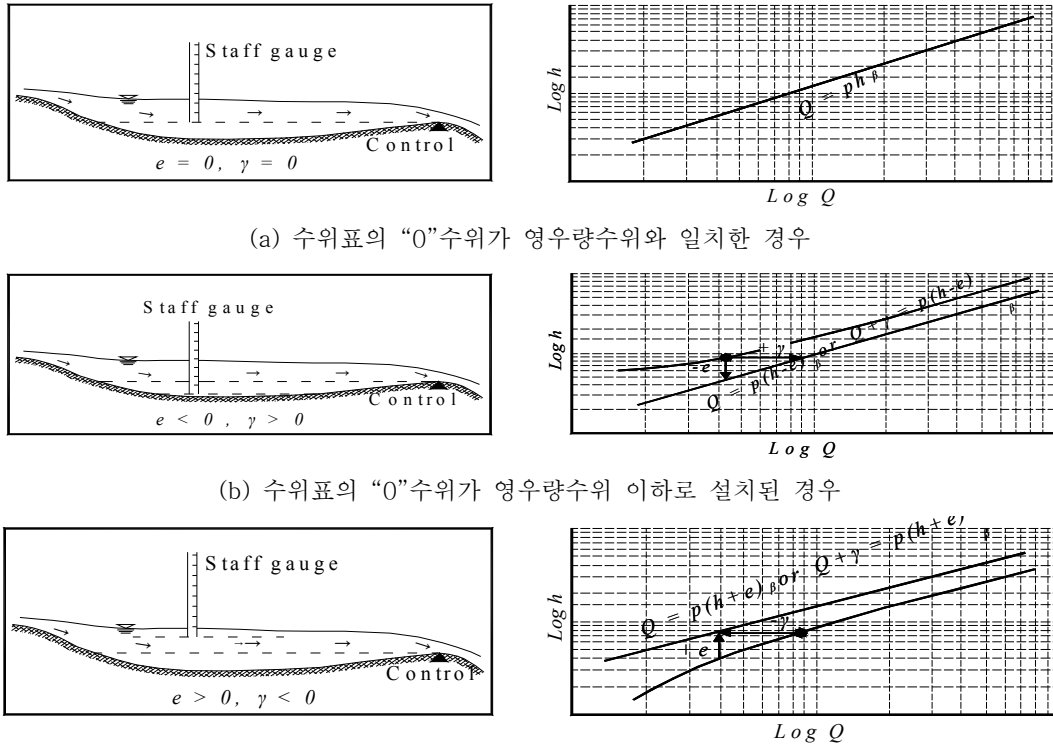
따라서 이러한 문제를 개선하기 위하여 변수 γ 가 도입된 식 (2)와 같은 수정 지수식을 도입하였다.

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

여기서 γ 는 발산 조정변수로서 특정수심 $(h - e)$ 에서 물리적으로는 $-\gamma$ 이상의 작은 유량이 발생하지 않는 절

대 최소유량을 의미한다. 그림 1은 영유량 수위 e 와 발산 조정변수 또는 절대 최소유량 γ 의 대수지상의 변화를 한눈에 보여주고 있다 (박재영, 2006).

수위-유량곡선식의 매개변수에 대한 물리적인 의미, 대수지상의 변화특성 및 제약조건을 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 1. 영유량수위 e 의 의미와 로그지상의 좌표변환 특성

표 1. 수정 지수식의 물리 적특성과 주요 지배인자

구분	물리적 특성	대수지상 특성	주요 지배인자	제약범위
ρ	하천규모를 나타내는 계수	유효수심 ($h - e$)가 1 일 경우의 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

일반적으로 상기(2)식의 매개변수 추정을 위해서 박재영(1987)은 편미분 방정식에 의한 미지수 소거방법을 도입하여 매개변수를 추정하는 방법을 제안하였다. 당시의 매개변수 추정방법은 최소자승법(Least Square method)과 이분법에 의한 매개변수 추정방법을 도입하였다.

기존 log변환된 목적함수의 문제점을 개선하기 위하여 새로운 개념의 목적함수를 다음과 같이 도입하였다.

$$\min \sum w(i) \epsilon^2 = \min \sum w(i) (Q - \hat{Q})^2 = f(h) \quad (3)$$

단, 여기서 $w(i)$ 는 1번째 수위유량자료가 갖고 있는 모집단(수위 또는 유량값)의 출현가중치이다.

상기 (3)식은 출현 가중치를 이용하므로써 기존식이 갖고 있는 왜곡현상을 개선할 수 있다.

(3)식을 이용한 비선형 매개변수 추정은 Duan(1993)의 SCE-UA 전역최적화 모형을 사용하여 매개변수를 활용하였다.

4. 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 손쉬운 ESRI의 MapObject를 이용하였다 (박재영, 2006). 본 논문에서 제시된 수정 지수식에 의한 수위-유량곡선식이 과연 실무에 응용될 수 있는지 등의 Fisher가 제시한 유의성 검증과 신뢰구간 검정을 실시하였다 (박재영, 2006)

그림 2는 각각의 매개변수에 대한 민감도 분석 결과를 나타내고 있으며, p 는 평행이동, e 는 곡선이동, β 는 경사 변화를 나타내고, γ 는 e 와 반대방향의 곡선변화를 나타내고 있다.

표 2는 WinCard은 본 연구에서 제안한 수정지수식에 의한 수위-유량곡선식 산정결과와 수렴도를 보여주고 있다.

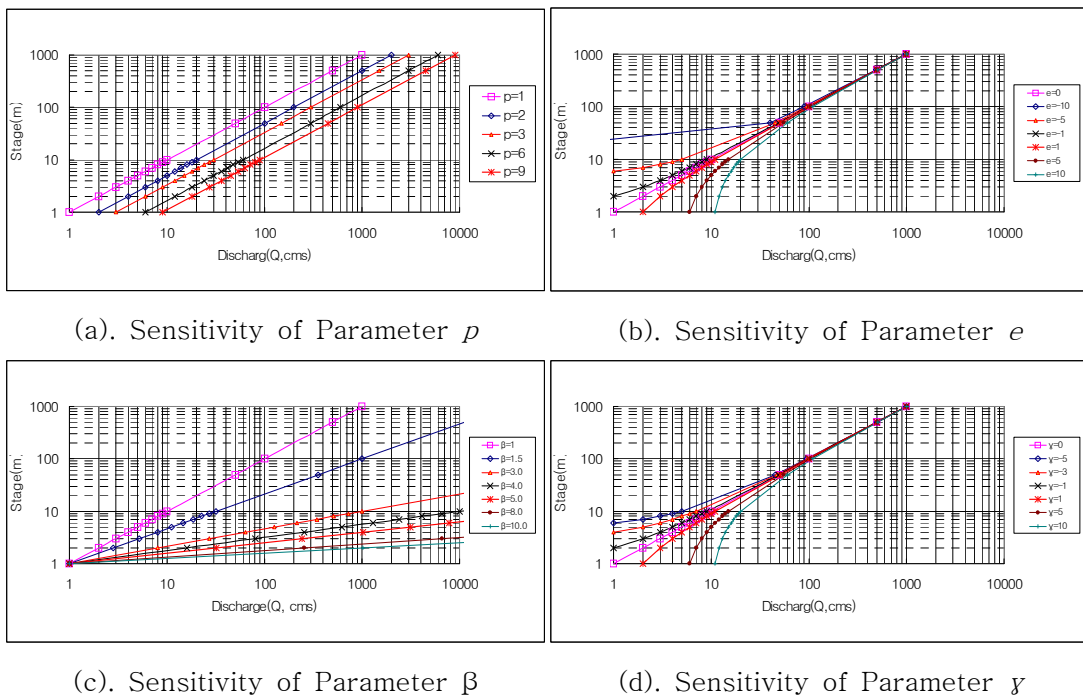


그림 2. 수정지수식 매개변수 민감도분석

표 2 목적함수에 따른 추정오차 및 결정계수 분석결과(안의수위표지점)

Object	p	e	β	γ	$\sum \epsilon$	r^2	$\log r^2$
$\min \sum \log \epsilon^2$	44.513	-0.500	2.461	-1.568	128.3	0.95	0.96
$\min \sum \epsilon^2$	14.084	-0.143	3.507	-1.567	80.6	0.95	0.87
$\min \sum w(i)\epsilon^2$	9.254	-0.033	3.972	-1.568	82.6	0.95	0.87

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 기존 수위유량곡선식이 갖는 홍수시 많은 오차부분을 제거하

는 방법을 제시하였으며 이를 모형으로 발전시켰다.

본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수위-유량곡선식의 매개변수에 대한 물리적 의미를 보다 명쾌하게 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 제안하였으며 그 실용성과 물리적 의미를 분석하였다.
- 3) 매개변수 최적값 도출을 위해 전역매개변수 추정방법인 영유량 수위(e)와 불능처리인자(γ)의 상호 보완적 관계 중 최적 값 도출을 위해서 SCE-UA 전역최적화 모형을 활용하여 비선형 해를 구하였다.
- 4) 매개변수의 물리적 상한과 하한을 지정하여 물리적 범위 안에서 최적의 수위-유량곡선식을 도출하도록 하였다.
- 5) 수위-유량 자료에서 최종 수위-유량곡선식 산정까지의 일련의 단계적 절차를 표준화 하였다.
- 6) 표준화된 절차를 구체화하고 효율을 배가시키기 위하여 WinCard 프로그램을 개발하였으며, 다양한 그림과 분석 결과를 손쉽게 얻을 수 있도록 하였다.
- 7) 지수형태의 수위-유량곡선식으로 표현할 수 없을 경우 다항식 형태로 도입되던 문제를 개선한 수정 지수식으로 일원화 할 수 있는 방법을 제시하였다.
- 8) 새로운 모형개발과 매개변수 p 에 대한 일반적 범위와 설정절차에 대한 좀 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다

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

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2004). 수문관측매뉴얼, 건설교통부 수자원국, pp. 108.
2. 박재영 (1987). “최적수위유량곡선식 산정에 관한 연구”, 제3회 국가중앙소프트웨어경진대회(총무처), 한국수자원공사 조사계획처.
3. 박재영 (2004). “수위-유량관계곡선식의 이해”, 하천수위유량과정, 한국수자원공사 수자원교육원, pp. 129-166.
- 박재영 (2006). “신개념의 수위유량곡선식 개발과 적용방향”, 제1회 수문관측심포지움, 건설교통부 pp181-190.
4. 이한구 (2003). 사용자설명서 수문자료상시평가프로그램/Rating 개발시스템, 한국수자원공사.
5. 장기환, 이재형 (2005), “하천 수위-유량곡선식 개선 및 모형개발,” 한국수자원학회논문집, 제38권4호, pp.271-280.
6. 한국수자원공사 (2002). 기존수위유량곡선식에 대한 평가(1998-2001), 한국수자원공사 조사기획처(내부자료).
7. Duan, Q., Gupta, V.K. and Sorooshian,(1993). "A Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization" Journal of Optimization Theory and its Applications, Vol 76(3), pp 501-521, 1993.
8. Herschy, R. W. (1995). *Streamflow Measurement, Second Edition*, E & FN Spon, London, UK, pp. 524.
9. ISO (1998). *Measurement of liquid flow in open channels- Part 2: Determination of the stage-discharge relation*, ISO1100-2: 1998(E), pp. 25.
10. 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.
11. 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.