

# 역산조도계수 방법을 이용한 수리학적 홍수추적

## Hydraulic Flood Routing Using Inverse Roughness Coefficient Method

윤선권\*, 김종석\*\*, 문영일\*\*\*, 안재현\*\*\*\*

Sun-Kwon Yoon, Jong-Suk Kim, Young-Il Moon, Jae-Hyun Ahn

### 요 지

하천에서는 최적 하도계획의 수립과 하천관리를 위하여 유량관측소가 설치·운영되고 있으며, 통상 자기기록계에 의해 수위를 계속적으로 기록하고 있다. 또한 하천의 흐름 해석시 부등류 및 부정류 해석을 통하여 수위를 계산하게 되는데 이때 조도계수는 매우 중요한 매개변수이다. 이러한 조도계수는 대상하도의 복합적 요소에 의하여 결정되어지며 특히 유량에 대한 가변성이 크다. 본 연구에서는 도시하천인 우이천 유역을 대상으로 과거 수위 및 유량관측 자료를 토대로 유속 및 경심을 산정한 후 Manning의 평균유속 공식에 의해 역산하여 조도계수를 산정하였다. 또한 고정조도계수모형과 멱함수형태의 역산조도계수모형의 결과를 실측 홍수위와 비교·분석하였다. 실제로 관측 수위에 대한 검증결과 유량에 따른 조도계수의 가변적 특징을 확인할 수 있었으며, 역산 조도계수 방법에 의한 흐름해석의 결과가 관측홍수위에 민감하게 반응함을 확인하였다.

**핵심용어** : 역산조도계수, 멱함수조도계수, 수리학적 홍수추적, Manning 조도계수

### 1. 서 론

수치해석의 정확성 외에 계산모형의 적절성을 좌우하는 중요한 요소는 모형의 매개변수로서, 수리학적 계산모형의 경우에는 조도계수가 지배적인 매개변수가 된다. 따라서 모형의 적용대상 하도에 대한 관측자료를 이용한 조도계수의 추정이 요구된다. 수리학적 계산모형은 물리적인 현상에 기초한 모형이고 매개변수도 많지 않아서, 여타 수문 및 수공모형에 비하여 매개변수 추정에 관한 연구는 상대적으로 적은 편이다. 외국의 경우 Fread와 Smith(1978)는 수정 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하여 오차의 합을 영에 가장 근사하게 하는 조도계수 값을 최적치로 추정하였으며, 조도계수가 유량에 따라 부분적 선형으로 변화한다고 가정하고 각 유량규모별 조도계수를 추정하였다. Wormleaton과 Karmegam(1984)은 하도의 단면형상을 사다리꼴로 가정하고, 단면형과 조도에 따라 오차를 최소화하는 최적 목적함수를 찾았다. 국내의 경우 김상호와 김원(2002), 이정규와 이창현(2004)이 FLDWAVE 모형을 이용하여 Fread와 Smith(1978)의 매개변수 추정기법을 한강 하류부에 적용하여 구간별, 유량규모별로 조도계수의 추정을 수행하였으며, 황경준과 전경수(1997)는 계단함수형의 가변매개변수 모형을 이용하여 한강본류 구간에 대하여 구간별 유량규모별 조도계수를 추정한 바 있다. 김한준과 전경수(2004)는 계단함수와 멱함수를 적용하여 남한강 구간에 대하여 최적화에 의한 매개변수를 추정하였다.

본 연구에서는 도시하천인 우이천 유역을 대상으로 과거 수위 및 유량관측 자료를 토대로 유속 및 경심을 산정한 후 Manning의 평균유속 공식에 의해 역산하여 조도계수를 산정하였다. 또한 고정조도계수모형과 역산조도계수 모형의 결과를 관측 값의 RMS error와 오차범위를 정하여 비교·분석하고, 역산조도계수 모형의 적용성을 높이고자 하였다. 실제로 관측 수위에 대한 검증결과 유량에 따른 조도계수의 가변적 특징을 확인할 수 있었으

\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 박사과정·E-mail : skyoon@uos.ac.kr

\*\* 정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 공학박사·E-mail : jongsuk@uos.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 교수·E-mail : ymoon@uos.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 서경대학교 토목공학과 조교수·E-mail : wr@skuniv.ac.kr

며, 역산 조도계수 방법에 의한 흐름해석의 결과가 관측홍수위에 민감하게 반응함을 확인할 수 있었다.

## 2. 역산조도계수 방법과 수리학적 홍수추적

### 2.1 역산조도계수 방법

하천에서 최적 하도계획의 수립과 하천관리 및 수자원 개발을 시행하기 위해서 유량관측소를 설치·운영하고 있다. 유량관측소에서는 통상 자기기록계에 의해 수위를 계속적으로 관측하고 있는데, 수면경사( $S$ ), 경심( $R$ ) 등이 관측되므로 다음 Eqn.1의 Manning의 평균유속 공식에 의해 역산을 통해 조도계수를 산정할 수 있다.

$$n = \frac{A}{Q} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

여기서,  $n$ =Manning의 조도계수,  $A$ =단면적,  $Q$ =유량,  $R$ =경심,  $S$ =경사이다.

또한, 하천의 하류로부터 상류까지 일관하여 조도계수를 구할 경우로서, 특히 그 가운데 조도계수가 일정하다고 생각되는 비교적 긴 구간의 하도가 있을 경우에 표준측차법이나 Euler 방법 등 부등류 계산법에 의하여 조도계수를 역산할 수 있다. 즉, 유량과 하류단의 수위자료나 수위-유량관계 곡선에 의한 자료를 이용하여 조도계수에 따른 상류단의 수위를 계산하고 상류단의 수위자료와 비교를 통하여 조도계수를 산정한다. 비교적 짧은 구간의 조도계수는 수면경사를 에너지 경사로 치환한 Eqn.2로 조도계수를 역산할 수 있다.

$$n^2 = 2 \left[ \left( H_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( H_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \right] / \left[ \left( \frac{V_1^2}{R_1^{4/3}} + \frac{V_2^2}{R_2^{4/3}} \right) \Delta x \right] \quad (2)$$

여기서, 첨자1은 상류단면, 2는 하류단면을 나타내고 있다.

### 2.2 수리학적 홍수추적

다음 두 방정식은 각 단면에서의 미지의 수위를 계산하기 위해서 표준측차계산법(Standard Step Method)에 의해 상류부와 하류부 단면에 대해 반복적으로 계산한다. 다음은 모형의 홍수위 추적계산식 Eqn.3과 에너지손실수두에 대한 방정식 Eqn.4를 나타내었다.

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \quad (3)$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left[ \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right] \quad (4)$$

여기서,  $Z$ 는 기준면(Datum)으로부터 하천바닥까지의 거리이며,  $Y$ 는 구간 단면 수위,  $V$ 는 구간 양단에서의 평균유속,  $\alpha$ 는 구간 양단에서의 에너지 보정계수,  $g$ 는 중력가속도,  $h_e$ 는 에너지 손실수두,  $L$ 은 유량가중 구간거리,  $\bar{S}_f$ 는 구간의 대표 마찰경사,  $C$ 는 단면 확대 및 축소 손실계수이다.

## 3. 멱함수 조도계수

### 3.1 수위-유량 관계곡선 개발

수위-유량관계 곡선의 개발 및 보정은 우선 관측이 용이한 수위를 측정함으로써 유량을 쉽게 산정할 수 있다는데 장점을 가지고 있으며, 강우-유출모형의 입력자료로서 활용되고 있다. 또한 거시적인 수자원 관리 및 계획을 위한 기초자료가 되며, 축적된 자료는 갈수량, 평수량, 홍수량 산정으로 이치수 및 지속적인 하천 운용에도 사용될 수 있다.

본 연구의 적용 대상 하천은 서울시 관내 지방2급 하천인 우이천 유역으로 하천 하류부 장월교 지점에 자기수위 관측기(T/M)가 설치 운영되고 있으며, 『대학 연계용역, 2000~2007년, 서울시』의 일환으로 실측호우가 관측되고 있다. 다음 Fig.1은 역산조도계수 방법의 중요한 관측 Data로 활용된 2000~2007년까지 우이천 장월교지점의 수위-유량관계곡선이며, Fig.2와 Fig.3는 장월교지점 유량측정구간의 횡단측량 단면을 나타내었다.

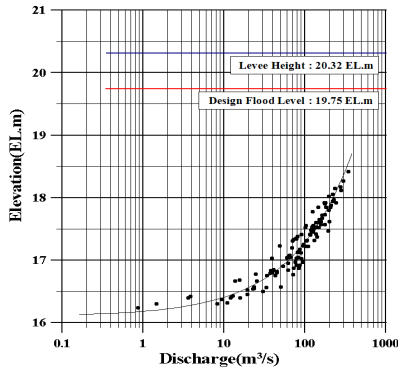


Fig. 1. Rating Curve

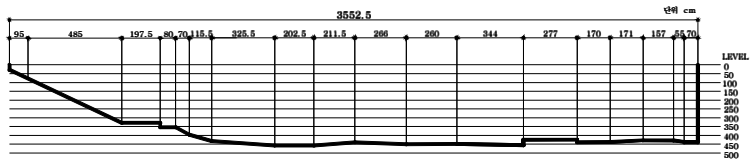


Fig. 2. Cross Section Profile(Sta.No.25)

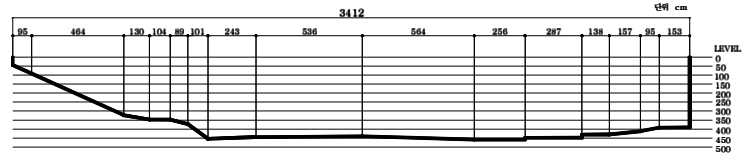


Fig. 3. Cross Section Profile(Sta.No.24)

Table 1. Development of Rating Curve

Observed Date	Rating Curve Eqn.	$R^2$
2000yr ~ 2007yr	$Q = 75.41(H - 16.10312)^{1.696408} (16.24 \leq H \leq 18.42)$	0.959699

### 3.2 멱함수 조도계수모형 개발

조도계수와 유량과의 관계를 멱함수 형태로 정의 하여 멱함수의 상수( $\alpha, \beta$ )를 추정함으로써 조도계수를 산정하는 방법이다. 다음 Eqn. (5)는 멱함수를 적용할 경우 조도계수를 나타낸다.

$$n = \alpha Q^\beta \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 조도계수 추정을 위한 멱함수의 상수 이며,  $Q$ 는 관측유량,  $n$ 은 조도계수 이다.

실제로 상기 제시한 수위-유량곡선의 과거 실측자료를 바탕으로 유량측정 지점의 대표단면을 활용하여 경심과 유역경사, 관측유속 등을 적용함으로써, 위의 Eqn.1을 통하여 관측 유량에 따른 조도계수를 역산해 낼 수 있었다. 또한 조도계수 역산자료를 바탕으로 선형 회귀분석을 실시하여 유량관측 지점의 멱함수 형태의 조도계수모형을 계산해 낼 수 있었으며, 다음 Fig.4는 유량측정지점의 역산조도계수 방법을 통하여 산정한 조도계수 (Inverse n)와 고정조도계수(Constant n), 그리고 멱함수 형태의 조도계수(Power Function n)를 나타내었다.

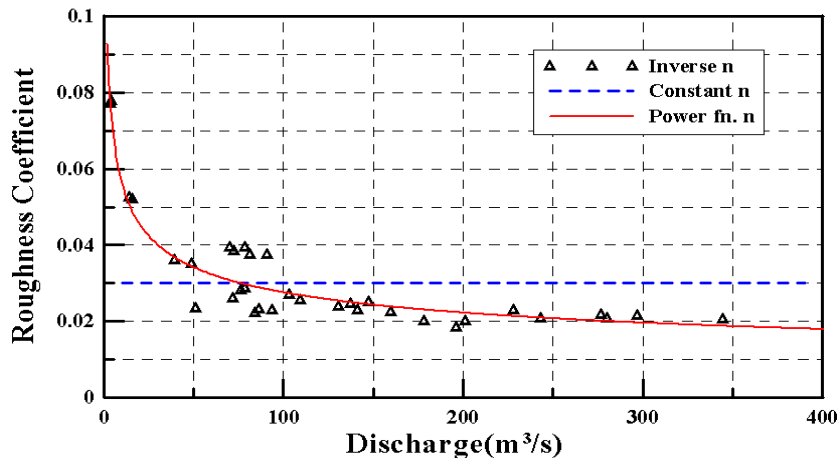


Fig. 4. Derivation of Power Fn. n using Inverse n Method

Table 2. Development of Power Function n Model

Obs. Year	Station No.	Power Function	$R^2$
2000~2007	No.25	$n = 0.115Q^{-0.31}$	0.829

#### 4. 모형의 적용

##### 4.1 매개변수 추정

산정된 조도계수의 타당성을 알아보기 위하여 매개변수의 추정을 위한 목적함수로 과거의 관측된 홍수사상을 적용하여 관측 수위와 유속에 대한 관측치와 계산치간의 오차제곱의 합을 아래의 Eqn.6로 구하여 이 값이 최소화 되는 방향으로 매개변수를 추정한다.

$$RMS\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SC_i - SO_i)^2}{n}} \quad (6)$$

여기서,  $SC_i$ 는 계산수위 및 유속이며,  $SO_i$ 는 관측수위 및 유속,  $n$ 은 자료의 개수이다.

다음 Table 3은 고정조도계수 방법과 멱함수조도계수 방법에 의해 계산된 33개의 홍수사상에 대한 수위(h)와 유속(v)의 관측치와의 평균제곱근오차(RMS error)를 나타낸 것이다.

Table 3. RMS error of Calculated Water Level and Mean Velocity

Division	Constant n		Power Function n	
	h(m)	v(m/s)	h(m)	v(m/s)
RMS error	0.42	0.39	0.18	0.19

##### 4.2 실측홍수사상에 대한 역산 조도계수모형의 검토

실측홍수사상에 대한 장월교 지점의 수위, 유량 관측자료를 바탕으로 주요지점에 대한 홍수량을 산정하였으며, 모형의 상류단 경계조건으로 적용하였다. 또한 장월교 지점의 실측된 수위자료를 하류단 경계조건으로 적용하여 정상부동류 및 부정류 해석을 실시하였다. 그 결과는 다음 Fig.5 ~ Fig.6와 같다. 관측수위에 대한 분석결과 정상부동류 해석결과와 약간 크게 나오며, 실제 홍수사상은 홍수파의 감쇠효과로 인하여 전체적으로 부정류 해석결과와 유사한 양상을 나타내고 있다.

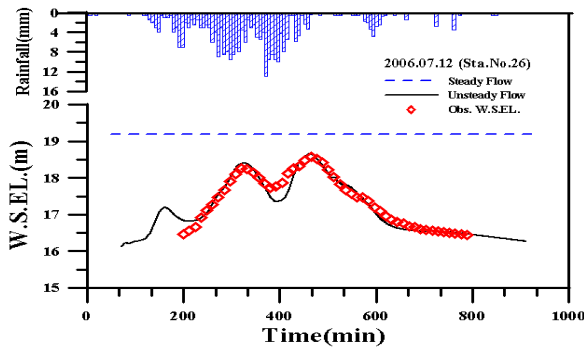


Fig. 5. Calibration of Flood Event(July, 12, 2006)

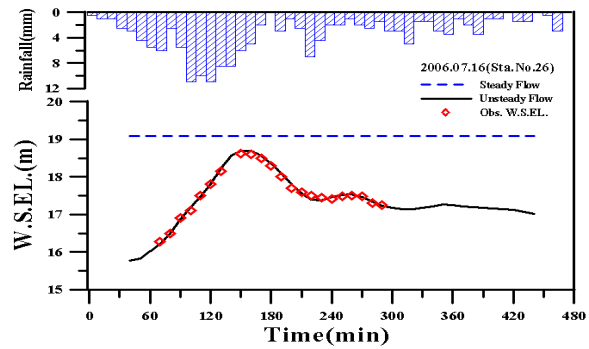


Fig. 6. Calibration of Flood Event(July, 16, 2006)

Table 4. Result on Observed and Simulated Calibration Data

Rainfall Event	Observed Data			Calculated(Steady)		Calculated(Unsteady)		RMS error	
	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_p$ (EL.m)	$V_{mean}$ (m/s)	$H_p$ (EL.m)	$V_{mean}$ (m/s)	$H_p$ (EL.m)	$V_{mean}$ (m/s)	$H_p$ (m)	$V_{mean}$ (m/s)
July, 12, 2006	344.37	18.65	3.27	19.18	3.01	18.62	3.16	0.020	0.012
July, 16, 2006	338.12	18.72	3.02	19.08	2.99	18.70	2.98	0.014	0.002

#### 5. 역산조도계수 모형에 의한 수리학적 홍수추적

상기 제시한 역산조도계수 방법에 의하여 개발된 멱급수조도계수 모형과 기존의 고정조도계수모형을 통한 수리학적 홍수추적에 의하여 계산된 수위(h)와 유속(v)의 값을 수위-유량 관계곡선의 관측값과 비교하여 그

오차를 산정하였다. 실제 수리학적 홍수추적에는 HEC-RAS모형을 이용하였으며, 각 유량에 대해 계산된 값과 관측된 값의 오차는 고정조도계수모형의 경우(h: -0.76 ~ 0.65m, v: -0.05 ~ 0.75)를 보였고, 오차율은 평균(h: -0.81 %, v: 17.54%)로 나타나 대부분 비교적 큰 오차범위를 보였다. 또한 멱함수조도계수모형의 경우 수위와 유속의 계산오차는(h: -0.30 ~ 0.49m, v: -0.36 ~ 0.47)로 오차율은 평균(h: 0.59 %, v: 3.87%)로 나타났으며, 대부분 ±5% 이내의 오차범위를 보였다. 다음 Fig.7은 고정조도계수와 멱함수조도계수모형에 의해 계산된 수위와 유속의 관측값과의 오차범위를 나타내었다.

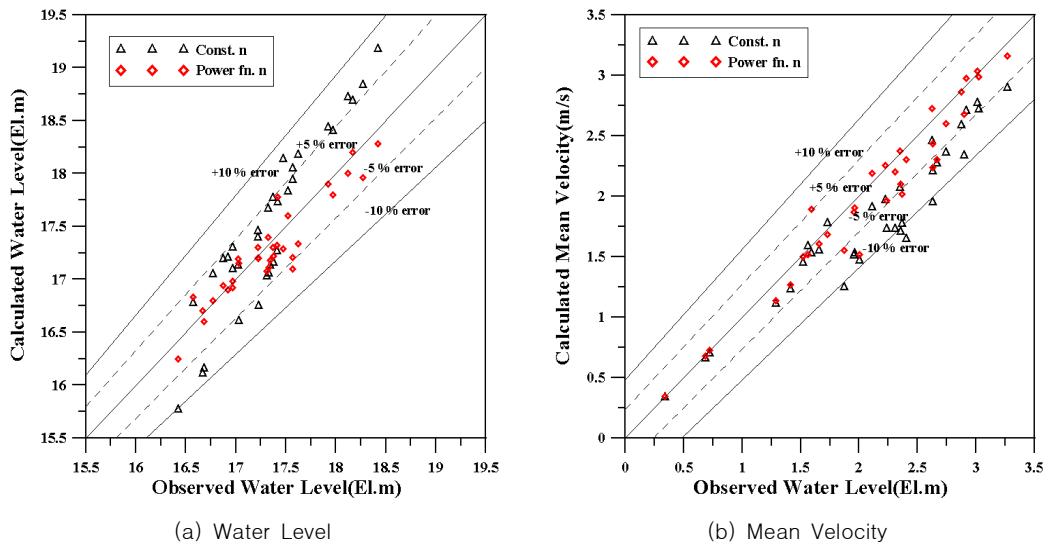


Fig. 7. ±5 % and ±10 % errors of Observed and Calculated data

## 6. 결론

본 연구에서는 도시하천인 우이천 유역을 대상으로 과거 수위 및 유량관측 자료를 토대로 유속 및 경심을 산정한 후 Manning의 평균유속 공식에 의해 조도계수를 역산하여 산정하였고, 선형회귀분석을 통하여 계산된 멱함수 조도계수 모형은  $n=0.115Q^{-0.31}$ 이다. 또한 산정된 조도계수의 타당성을 알아보기 위하여 RMS error를 계산하였으며, 실측호우 사상에 대한 역산조도계수 모형의 검·보정을 실시한 결과 비교적 신뢰할 만한 결과를 얻었다. 마지막으로 역산조도계수 모형에 의한 수리학적 홍수추적을 실시한 결과 멱함수 조도계수 모형이 고정조도계수 모형의 결과보다 수위와 유속의 계산오차범위가 작게 나타났으며, 비교적 고수위의 유량과 유속범위에서 관측값을 잘 반영해 주는 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명 : 사면붕괴 예측 및 대응기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김한준, 전경수, 2006. “가변 조도계수 부정류 계산모형” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제12호 pp.1055-1063.
2. 서울특별시, 2003.12. “우이천 등 4개 하천정비기본계획보고서”, 서울특별시.
3. 이신재, 박상우, 2006. “수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp.985-996.
4. 이정규, 전세호, 2004. “부정류 모형을 이용한 한강의 수리학적 홍수추적에 관한 연구.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 제4B호, pp.301-310.
5. 한국수자원학회, 2006. “제15회 수공학 Workshop교재”, 한국수자원학회.