

## 소유역 및 대유역 홍수유출모형의 적용 Application of Surface Runoff-River Flow Model to Small- and Large-Size Catchment Areas

유 동 훈\*

Yoo, Dong Hoon

---

### Abstract

A numerical model of surface runoff and river flow has been applied to small- and large-size catchment areas in order to investigate the physical characteristics of river flow during flood period. Several refinements are made on the existing model SIRG-RS for the ways of rainfall input through surface runoff, river junction treatment and the computation of river flow on steep slope. For the computation of frictional forces, employed is the power law of friction factor which is a function of Reynolds number and relative roughness height. The empirical equation of friction factor is developed using recent field data as well as laboratory data. The refined model has been applied to small-size catchment area as well as large-size catchment area, and the computation results are found in good agreement with the observations in both cases.

**Keywords** : numerical model, catchment area, surface runoff, river flow, river junction, steep slope mountain channel, power law of friction factor

---

### 요 지

지표면 유출과 하천 유출 등으로 구성된 동일한 홍수유출모형 SIRG-RS를 소유역과 대유역에 적용하였다. 지표면 유출로부터의 유입 방법, 하천 접합부에서의 계산방법, 급경사 산지하천에서의 에너지손실 계산 등에서 개선책을 강구하였다. 마찰력 산정을 위하여 레이놀즈수와 조고비의 함수인 지수형 마찰계수 산정식을 도입하였다. 또한 지수형 마찰계수 산정식은 실험자료 뿐 아니라 최근 입수한 현장 관측자료를 사용하여 개선하였다. 개선된 모형은 대규모의 유역과 아주 작은 크기의 소유역에도 적용하였는데, 두 가지 경우 모두 관측자료와 비교하여 양호한 계산 결과를 얻었다.

**핵심용어** : 수치모형, 유역면적, 지표면 유출, 하천 유출, 하천 접합부, 급경사 산지하천, 지수형 마찰계수 산정식

---

\* 아주대학교 토목설계공학과 교수

Prof., of Environmental and Urban Engrg. Ajou Univ., San 5 Wonchun Dong Paldal-Gu Suwon, Korea 442-749  
(E-mail: dhyoo@madang.ajou.ac.kr)

## 1. 서론

세계는 이상 기후 현상인 엘니뇨와 라니냐로 인해 홍수 및 가뭄 피해가 급증하고 있다. 우리나라 또한 예외 없이 최근 갑작스런 폭우와 극심한 가뭄으로 심각한 인명 및 재산 피해를 입고 있으며 이로 인해 홍수유출 모의시 보다 정확한 산정결과를 요구하고 있다. 주어진 강우사상에 대하여 강우유출사상을 적법하게 모의하려면 지표면 유출, 하천 유출 그리고 지하수 유출 등 세 가지 유출 모의를 동시에 수행하여야 하며, 단기간의 홍수유출사상을 모의할 때도 이상 세 가지 사상 중 적어도 앞의 두 가지 사상은 종합적으로 고려하여 적절하게 연계하여야 한다. 이러한 유출사상을 모의하는 수치모형이 세계적으로 여러 종류 개발되었다. 유동훈과 이정영(2001)이 개발한 SIRG-RS은 세 가지 사상을 모두 모의하기 위하여 개발한 모형인데 유역면적 468km<sup>2</sup>인 중간 규모의 양양 남대천 유역에 적용하여 검증의 일부를 완수하였었다. 본 연구에서는 단기간의 홍수유출사상을 모의하는데 주안점을 두고 이전 적용하였던 유역보다 작은 소규모 유역과 더 큰 유역인 대규모 유역에 적용하여 모형의 일반성과 신뢰성을 증진시키고자 한다.

개수로 흐름의 수리해석시 여러 분야에서 경험계수를 도입해야 하는데, 마찰력 산정에 있어서는 주로 Manning 식을 이용하여 왔다. Manning(1889, 1895) 식은 오래된 역사와 함께 아직까지 거의 모든 수리설계에 광범위하게 이용되고 있는데 정상류이고 등류인 경우 다양한 조건에서의 Manning 계수가 제시되어 있어(Chow, 1982) 실무에서 가장 용이하게 이용되고 있는 실정이다. 그러나 최근 홍수유출모의와 같은 비정상류 해석에 있어 Manning 식은 시간변이에 따라 상당한 오차를 유발하기 때문에 수정하여 사용해 오고 있다(황의준과 전경수, 1997). 주로 Manning 계수를 유량의 함수로 설정하여 유량에 따라 Manning 계수가 감소하도록 조치하여야만 여러 시간대에서 양호한 산정결과를 얻을 수 있었다. 이는 개수로 마찰흐름도 레이놀즈수에 따라 감소하는 완난류(smooth turbulent flow) 특성을 가지고 있음을 보여주는 증거중의 하나라고 판단된다. Manning 식을 차원일치를 기하여 지수형으로 변형하면 Manning 식으로부터 유도된 마찰계수는 조고비만의 함수로 유도된다. 즉, Manning 식은 주로 전난류(rough turbulent flow)의 특징을 대표한다고 할 수 있다. Keulegan(1938)은 Manning이 이용하였던 Bazin(1865)의 관측자료를 사용하여 전난류 특징을 반

영하는 대수형 산정식을 개발하고 Bazin 관측수로 각각의 조고를 추정하여 거의 모든 개수로 흐름을 전난류로 판단하는 근거로 삼았다. 그러나 Bazin의 관측자료를 레이놀즈수의 함수로 취하더라도(본고의 그림 4 참고), 아주 우수한 회귀선을 얻을 수 있으므로 회귀선의 우열만으로 난류 특성을 한정 지을 수는 없을 것으로 판단된다.

한편 Ganguillet-Kutter(1869)식은 조고(조도), 조고비 그리고 수로경사의 함수로 표기되는데 특히 수로경사의 함수가 된다는 것은 완난류 특성을 나타낸 결과일 가능성도 보이며, 조고의 함수라 함은 개수로 완난류에서 조고비와 함께 조도 또는 조고가 흐름의 저항력을 추가로 증강시키는 현상을 나타낸다고 할 수 있다. Bray(1979)는 하저에 주로 자갈이 퇴적되어 있는 산지 소하천의 평균유속을 산정할 때 조고비만의 함수인 전난류 산정식 보다 레이놀즈수와 조고비의 조합형이 약간 더 우수한 산정결과를 보이고 있음을 확인하였으며, 레이놀즈수의 함수로 취하더라도 조고비만의 함수로 취한 회귀선 못지 않게 우수한 회귀선을 도출할 수 있었다. Noori(1984)는 급경사면의 하천수로를 해석할 때 레이놀즈수만의 함수인 완난류 산정식이 아주 양호한 산정결과를 보여주었다. 이러한 연구결과들이 일반 개수로 흐름에서도 완난류가 발생할 가능성을 시사하고 있는데, Warwick(1945)의 실험자료를 살펴보면 완난류 특징을 보이는 자료와 함께 전난류 특징을 분명히 보이는 일군의 관측자료가 발견된다(본고의 그림 4). 그의 전난류 특징을 보이는 관측자료와 완난류 특징을 보이는 관측자료는 모두 공통적으로 조고에 따라 회귀선이 상향으로 평행이동하는 특성을 보이고 있으며, 이러한 평행이동 특성은 수면에서의 혼합특성(surface distortion) 때문인 것으로 파악되고 있다. Bazin의 관측자료는 Warwick의 완난류 자료의 분포 특징과 유사한데, Bazin자료를 전난류로 가정하여도 Keulegan이 분석하였듯이 우수한 해석결과를 얻을 수 있고 완난류로 가정하여도 마찬가지로 우수한 해석 결과를 얻을 수 있다. 그러나 만일 Bazin의 관측자료를 전난류로 한정하고 해석할 경우, Warwick자료에서 전난류 특징을 보이는 일련의 자료를 해석할 방법이 없다.

유동훈과 이종원(1997), 유동훈과 이민호(2000) 등은 주로 Bazin과 Warwick의 실험자료를 이용하여 다양한 흐름조건을 반영한 지수형 마찰계수 산정식을 제안한 바 있다. 마찰계수를 레이놀즈수와 조고비의 함수로 취하고 비례상수를 조고의 함수로 취하여 완난류,

전난류 뿐만 아니라 조고에 따라 마찰계수가 상향으로 평행 이동하는 특성을 반영하였다. 이러한 상향 평행 이동 특성은 Ganguillet-Kutter(1869)식과 Hazen-Williams식(Williams and Hazen, 1938) 등에서도 보여지는데 특히 개수로 흐름인 경우 수표면 혼합특성에 크게 영향을 미치는 표면장력과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정되며, 벽면조고와 수로기울기에 따라 표면장력의 기여도가 변할 것으로 추정된다.

본 연구에서는 개수로 흐름 해석시 마찰력 산정에 일반형 지수형 마찰계수 산정식을 도입하였다. 지수형 마찰계수 산정식의 계수 선정을 위해 최근에 입수한 현장 관측자료(Hicks and Mason, 1998)를 이용하여 현장 조건에 적합한 마찰계수 산정식을 개발하였다. 또한 급회의 연구에서 기존 모형의 적용에서 발견하지 못하였던 새로운 문제점들을 발견하였다. 합류점에서의 지류처리, 지표면 유출의 하천유입, 급경사 산지하천 등에서 수치적인 불안정이 발생하는 문제점이 대두되었는데 이들의 개선책을 강구하였다. 연구 대상구역으로는 경기도 안성천 유역과 경기도 왕숙천의 지류인 금곡천 유역이다. 이천의 대상 유역인 양양 남대천의 유역면적은 468km<sup>2</sup>이며 안성천 유역면적은 1,677km<sup>2</sup>이고 금곡천 유역면적은 8.75km<sup>2</sup>이다. 안성천 유역 내에는 수원, 평택, 안성 등 수 개의 도시 유역과 전답과 수목지가 다양하게 어우러진 유역이며, 금곡천 유역은 주로 수목이 밀집한 산지와 전답이 분포하여 있는 유역이다. 금곡천 유역은 안성천 유역에 비하여 평균 유역경사가 매우 크고 급경사 산지하천을 이루고 있으므로 도달시간이 매우 짧을 것으로 예상된다. 유역 특성이 전혀 다른 두 유역의 홍수유출을 모의함으로써 모형의 일반성을 증진 시키고자 한다.

## 2. 홍수유출모형

연구에 이용된 홍수유출모형 SIRG-RS는 지표면 유출(지표하 유출 포함), 하천 유출 등 두 가지 유출양식을 모두 고려하는 모형이다. 지표면-지표하 유출은 강우수문곡선을 2중삼각형곡선으로 가정하여 강우주상도의 각 시간 강우에 대한 수문곡선을 선형중첩하는 방법으로 모의한다. 질량불변의 법칙에 의하면 어느 특정 유역에 내리는 총강우량은 총직접유출량, 총침투량 그리고 총증발산량의 합과 같다. 즉,

$$\iint IdAdt = \int Qdt + \iint fdAdt + \iint edAdt \quad (1)$$

여기서 I는 강우강도(m/s 또는 mm/hr), Q는 유출량(m<sup>3</sup>/s), f는 침투율(m/s), e는 증발산율(m/s), A는 유역면적이다. 홍수기간 증발산율은 보통 무시될 수 있으며, 이때

$$\iint (I-f)dAdt = \int Qdt \quad (2)$$

보통 유출계수 C<sub>R</sub>를 도입하여 유효강우를 산정한 다. 즉, (I-f) = C<sub>R</sub>I 로 선형식을 사용하는데 침투율 f의 시간변이를 추정하여 비선형효과를 고려한다. 또한 합리식(rational method)에서는 수문곡선을 이등변삼각형으로, 강우지속시간 t<sub>R</sub>이 침투시간 t<sub>P</sub>와 같다고 가정하고 침투유출을 추출하며, 산정식은 다음과 같다.

$$Q_P = C_R I_m A \quad (3)$$

여기서 I<sub>m</sub>은 해당 유역전체의 평균강우강도이다. 유효강우를 산정할 때 유출계수에는 건물이나 나뭇잎 등에 의한 차단효과도 내포되어 있다.

한편 본 연구에서는 미토양보존국(Soil Conservation Services(SCS), 1966)이 제시한 이중삼각형의 수문곡선을 도입하여 침투 효과의 시간 변이를 고려하였으며, 어느 일 점의 강우강도를 평균강우강도로 환산하는 계수 f<sub>A</sub>를 도입한다. 그림 1에 제시된 이중삼각형의 수문곡선을 참조하여 침투유출은 다음과 같이 산정된다.

$$Q_P = f_s f_A C_R I_P A \quad (4)$$

여기서 I<sub>P</sub>는 어느 일 점의 강우강도, f<sub>S</sub>는 수문곡선 형상계수이다. 그림 1에 제시된 이중삼각형 수문곡선을 참조하여 f<sub>S</sub>는 다음과 같이 산정된다.

$$f_s = \frac{2}{1+c(a+b)} \frac{t_R}{t_P} \quad (5)$$

한국건설기술연구원(1988)은 우리나라 전국에 걸친 관측자료를 분석하여 f<sub>A</sub>를 산정하는 경험식을 개발하였다. 건기원 산정식을 단순화하여 Horton(1940)식과 유사한 형태로 다음과 같은 산정식을 제시한다.

$$f_A = \exp[-0.016(A/A_0)^{0.5}] \quad (6)$$

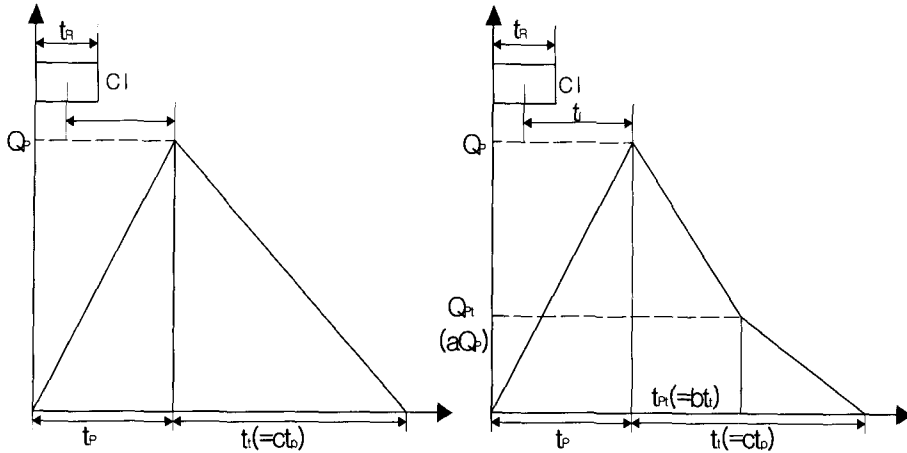


그림 1. 단일삼각형과 이중삼각형의 수문곡선

여기서  $A_0 = 1 \text{ km}^2$ 이다.

우량주상도는 단위시간당의 강우량으로 표기되며, 수문곡선은 각 단위시간당의 강우에 의한 수문곡선의 중첩으로 만들어진다. SCS가 제시한 유량계수  $C_R$ 은 보통 최종 유출결과로부터 구해진 자료로부터 추출된 계수로서 침투의 시간변이를 고려하여 다음과 같이 산정한다.

$$C_R = \eta^\delta C_B \quad (7)$$

여기서  $C_B$ 는 최종 유출계수이고  $\eta$ 는 전체 침투가 능깊이에 대한 침투깊이의 비로서 홍수기간중 시간이 지남에 따라 1로 접근한다.  $\gamma$ 와  $\delta$ 는 경험계수로서 급회의 모의에서  $\gamma = 1.0 - 1.5$ ,  $\delta = 1.0 - 2.0$ 의 수치를 적용하였다.

도달시간의 추정을 위하여는 지표면 유출 흐름을 Sheet Flow로 보고 층류와 완난류 모두를 고려하였는데(Singh, 1976, 유동훈과 전우용, 2000), 조면의 상태에 따라 경험계수를 조정하였다. 층류인 경우 도달시간은 다음과 같이 산정된다.

$$t_c = \left[ \frac{\alpha \nu L}{g S I^2} \right]^{1/3} \quad (8)$$

여기서  $\alpha$ 는 경험계수,  $\nu$ 는 동점성계수,  $g$ 는 중력 가속도,  $S$ 는 유역경사,  $L$ 은 도달거리이다. 완난류인 경우 Blasius지수형 산정식을 도입하면

$$t_c = \left[ \frac{\alpha \nu^{0.25} L^{1.75}}{g S I^{1.25}} \right]^{1/3} \quad (9)$$

여기서  $I$ 는 유역평균강우강도  $I_m$ 을 적용한다.

Yoon과 Wenzel(1971), Shen과 Li(1973)등은 실험관측에 의하여 강우에 의한 수면 혼합(surface distortion)으로 마찰계수 분포가 강우강도에 따라 상향으로 평행이동하는 것을 발견하였으며(즉, 식(8) 또는 (9)의 비례상수  $\alpha$ 의 증가), 수면가까이 유속이 상당히 감소하는 현상을 확인하였다. Yen과 Akan(1999)은 그들 자신의 실험자료와 Shen과 Li의 실험 자료를 이용하여 비례상수  $\alpha$ 를 추정하는 산정식을 개발하였다. 또한 지표면 유출의 Sheet Flow에 관심을 갖고 실시한 Woo와 Brater(1961)은 조도와 지형경사 두 인자 모두 중요한 요인으로 작용함을 밝혔다. 이상의 여러 인자들을 종합적으로 고려한 경험식은 아직 개발되지 않았으며, 더욱이 침투에 의한 지표하 흐름 영향을 고려할 때 비례상수  $\alpha$ 의 정량적 해석에 의한 산정식 도입은 아직 미흡한 것으로 판단된다. 불투수층 사면인 경우 지형경사와 조도, 수면에서의 강우혼입 등을 고려할 경우 층류에서  $\alpha = 3 - 10$ 의 범위이며, 완난류에서는  $\alpha = 0.03 - 0.10$ 이다. 본 모의에서는 층류에서  $\alpha = 10 - 20$ 의 수치를, 완난류 조건에서는  $\alpha = 0.1 - 0.5$ 의 수치를 사용하여야 유사한 유출모의를 득할 수 있었다. 이는 주로 침투와 지표하 흐름에 의한 도달시간의 지연 때문인 것으로 추정된다.

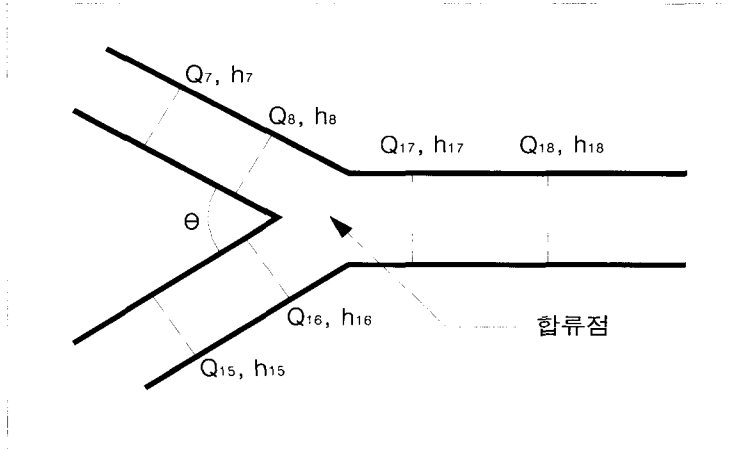


그림 2. 합류점 모식도

모형의 지배방정식 중의 하나인 개수로 비정상류 연속방정식은 검사 체적에서 질량 유입과 질량 유출은 평형을 이룬다는 조건으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_S} \frac{\partial Q}{\partial x} = S_H \quad (10)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $Q$ 는 유량,  $B_S$ 는 개수로 수면의 폭이며,  $S_H$ 는 하천으로의 유출입량으로서 단기간의 홍수유출을 모의하는 당해 조건에서는 강우유출로 인한 지표면 유입량이다.

부등류 운동량 방정식은 검사 체적에서 여러 종류의 힘이 평형을 이룬다는 조건으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA_R \left( \frac{\partial h}{\partial x} - i \right) \\ + \frac{C}{H} |V|Q = \nu_t \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $V$ 는 단면평균유속,  $A_R$ 은 개수로의 통수단면적,  $C$ 는 마찰계수,  $i$ 는 수로저면의 기울기,  $H$ 는 동수반경(hydraulic radius),  $\nu_t$ 는 확산계수이다. 한편 지표면 강우유입이 하천흐름 방향에 직각으로 유입된다고 가정할 경우 유입량이 연속방정식에는 직접적으로 영향을 미치지만 측방유입운동력의 하천흐름방향 성분을 무시할 수 있어 유선을 따라 표기된 운동량방정식에는 영향을 미치지 않는다. 상기 표기에서  $C$ 는 마찰계

수로서 무차원수이며, 차원을 가진 Chezy의 마찰계수와는 다르다. Chezy의 마찰계수를  $CH$ 라 칭할 때  $C_H = \sqrt{g/C}$ 의 관계가 있다.

기존 SIRG-RS 모형을 사용하여 홍수유출모의를 수행한 후 발생했던 문제점을 개선하고 보완, 수정하였다. 합류점에서 운동량방정식의 Vector합성을 고려하였고 하천으로의 지표면 유입 처리방법을 개선하였다. 급경사 산지하천에서 주로 발생하는 에너지의 과대한 감소현상, 자연형 하천의 단면변화 및 사행 특성, 수공구조물의 영향 등을 추가로 고려함으로써 보다 정확하고 수치적으로 안정적인 모의가 가능하도록 조치하였다.

## 2.1 합류점에서의 지류 처리

합류점 해석시(그림 2) 본류의 유선 Vector에 대한 지류부의 유선 Vector를 고려하기 위하여 운동량 방정식의 유한차분식에 있어 지류부의 운동량에 대하여는 교점각 Vector성분인  $\cos\theta$ 를 곱하였다. 따라서 지류가 본류로 유입하는 각이  $90^\circ$ 이라면 지류 유선 Vector에 의한 이송가속 효과는 무시할 수 있다.

교점각의 벡터성분을 고려하여 접합부에서의 운동량에 대한 유한차분식의 해석은 다음과 같이 2단계로 실시한다.

$$\begin{aligned} Q_{17}^* &= (1 + \alpha)^{-1} \\ [Q_{17}^n - g A_{17} \Delta t \left( \frac{h_{18}^{n+\frac{1}{2}} - h_{16}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} - i_{17} \right)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$Q_{17}^{n+1} = Q_{17}^* - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{17}^* V_{17}^* - Q_{16}^* V_{16}^* - \cos \theta Q_8^* V_8^*) \quad (13)$$

여기서 하침자는 격자번호, 상침자는 시간단계를 나타내며,  $\theta$ 는 본류에 유입하는 지류의 유입각도이며,  $\alpha = 1 + \Delta t CV/H$ 이다. 식 (13)에서 x좌표는 본류의 유선방향으로 설정하였기 때문에 지류가 본류로 유입될 때는 유입각을 고려한다. 식 (12)로 표기된 1단계 산정과정에서 에너지경사는 공간과 시간에 관하여 모두 중앙차분으로 해석하였고, 식 (13)으로 표기된 2단계 산정과정에서는 수치적인 안정을 확보하기 위하여 상류차분법(upstream method)에 의한 일방향 차분으로 해석하였다. 식 (11)의 마지막 항으로 표기된 난류확산 효과는 계산에서 제외하였다.

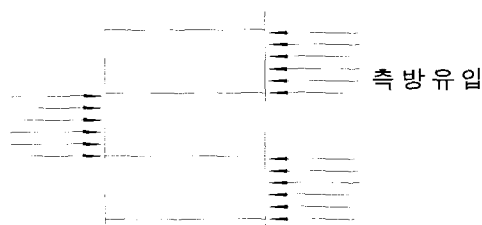
## 2.2 지표면 유출의 하천 유입

분할된 각 소유역에 n개의 하천 격자가 연계되어 있을 경우 유입량  $S_H$ 는 다음과 같이 산정된다.

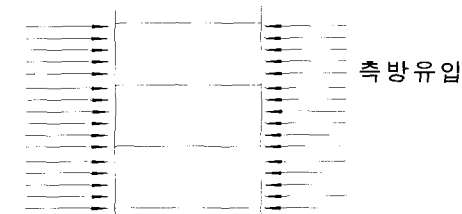
$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = S_H = \frac{Q_S}{nA_S} \quad (14)$$

여기서  $Q_S$ 는 분할된 각 소유역의 지표면 유입량이며,  $A_S$ 는 각 하천격자간의 수면 면적이다. 즉 지표면 유입량이 차분시간  $\Delta t$  동안 지체없이 순간적으로 수면 전체에 골고루 분포하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 약간의 오차를 내포하는데 지표면 유출산정시 고려하는 도달시간 추정오차에 비하면 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

대부분의 하도추적 모형에서는 지표면 유입을 운동량 방정식에 도입하여 어느 한 단면 또는 수 개의 단면에 동시에 또는 연속적으로 유입하는 것으로 가정한다.



(a) 한쪽방향으로 측방유입



(b) 양쪽방향으로 측방유입

그림 3. 측방유입 모식도

이러한 방법은 급격한 유입량이 발생하였을 경우 수치적인 불안정을 가져올 가능성이 높다. SIRG-RS 모형은 연속방정식에 식 (14)로 산정한 미소량을 모든 하천 격자에서 연속적으로 도입하기 때문에 수치적 불안정을 상당히 해소하였다. 한편 기존의 SIRG-RS 모형은 지표면 유출에 의해 발생하는 측방유입이 하천격자의 한쪽 방향으로만 유입하게 구성되어 있어(그림 3(a)) 홍수유출 모의시 여러 격자에서 유량 변화가 급격하게 나타나는 경우가 발생하였다. 지표면 유출에 의한 강우유입을 하천 격자 양쪽으로부터 유입하도록 처리함으로써 하천의 유량과 수위가 급격하게 변하는 지역에서 보다 정확하고 수치적으로 안정적인 산정결과를 얻을 수 있게 되었다(그림 3(b)).

## 2.3 급경사 산지하천

우리나라 대부분의 하천은 상류에서는 급경사면의 산지하천 특성을 갖고 하폭이 좁고 급류를 형성하며, 하류로 내려올수록 경사가 작아지고 하폭이 넓어지며 상대적으로 완만한 흐름 특성을 갖는다. 산지하천의 특성은 주로 급경사면과 직접적으로 연관되어 식생이 별로 발달되지 않으나 상당한 크기의 암석이나 자갈층이 발달되어 있고, 계단식 소류지가 연속된 Step-Pool 시스템이 발달하여 있다.

Jarrett(1983)은 산지하천에서의 흐름 특성을 급경사면과 얇은 수심으로 대표하여 Manning 평균유속산정식의 Manning계수를 경사와 수심에 따라 조정하는 산정식을 추출하였다. 그는 관측결과를 이용하여 Manning계수가 수심 또는 동수반경의 증가에 따라 급격히 감소하며 경사에 따라 증가하는 것으로 추정하였다. Bathurst(1978, 1983), Thorne과 Zevenbergen(1985), Griffiths(1987) 등은 산지하천의 주요 특성 중 하나의 요인을 대형조고(large-scale roughness)로 판단하고 대형조고에서의 압력저항(form drag), 수

면에서의 공기혼입(air pocket entrapment)과 자갈등 대형토사의 이동에너지손실(energy loss due to sediment transport)을 저항력증가의 주요 인자로 파악하였다.

Whittaker와 Jaeggi(1982)는 급경사면을 가진 산지하천의 대부분이 계단식 소류지(step-pool) 시스템을 갖고 있으며, 이러한 시스템에서는 각 소류지에서 역류에 의한 roller eddies, 공기혼입이 동반한 분사류(cascades), 장애물에 의한 압력저항 등이 발달한다고 기술하였다. Whittaker와 Jaeggi는 Step-Pool 시스템을 가진 하천에서의 마찰계수는 동일 조건에서 그렇지 않은 하천의 마찰계수에 비하여 10-20배 가량 증가하는 것으로 추정하였다. Thorne과 Zevenbergen는 Bathurst식, Colorado대학의 산정식 등을 그들의 관측자료에 적용하여 모든 산정식들이 평균유속을 30% 이상 과대산정(마찰계수는 70% 이상 작게 산정)하는 것으로 추정하였다. Tracy와 Lester(1961)는 실험관측으로부터 표면마찰력(skin friction)은 Froude수와 전혀 무관함을 밝혔는데, 반면에 Noori(1984)에 의하면 계단식으로 하저가 형성된 급경사 수로에서는 전마찰력 형성에 Froude수가 중요한 인자가 되는 것으로 추정하였다.

이와같이 최근 여러 연구자들의 공헌으로 산지하천의 흐름 특성에 대한 정성적 해석은 상당한 수준에 이르렀다. 그러나 모든 관련 인자들을 종합적으로 고려한 정량적 해석에는 아직 상당히 미흡하여 어느 연구자의 산정식을 수치모형에 적극적으로 도입할 단계는 아닌 것으로 판단된다. 또한 급경사의 수면기울기가 수표면 혼합특성에 적지 않은 효과를 가져다 주는 것으로 파악되어 급경사 산지하천의 유출 특성을 정량적으로 분석하는데 어려움이 가중될 것으로 보여진다.

한편 본 모형의 적용에서 평균경사가 매우 급한 하천의 상류에서는 마찰계수를 아주 크게 설정하여도 수치적으로 불안정하여 수치해석이 불가능하였다. 저자는 상기 기술된 이해력을 갖기 전에 이의 원인을 다음과 같은 추론으로 급경사 하천의 물리적인 특성을 반영하여 해결하였는데 추론된 가설은 다음과 같다. 하천흐름은 특히 급사면인 경우 유량 확보를 위해 설치한 수중보나 자연적으로 형성된 저류지로 인해 에너지경사가 지형경사나 수면경사 보다 완만하다. 또한 급사면인 경우 하저면에 분포된 암석 등에 부딪혀 수면이 분사하고 다량의 Air Pocket이 수중에 유입되며 상당량의 에너지가 추가적으로 감소한다. 이러한 흐름은 일반적인 난

류(완난류 또는 진난류) 흐름보다 훨씬 격렬하고 에너지 손실이 훨씬 큰 것으로 판단된다. 따라서 이러한 에너지 손실을 감안하여 에너지경사를 수면경사 보다 훨씬 작게 설정할 필요가 있을 것으로 판단하였다. 이와 같은 흐름을 Sporadic Flow(분사류)라 칭하였는데 이는 급경사면을 가진 산지하천 특성의 일부분이라 볼 수도 있다. 본 모의에서는 에너지경사 감소율을 도입하여 산지하천에서의 과도한 에너지손실을 고려하였다. 즉, 운동량 방정식 (11)의 셋째 항에 가중치( $\gamma$ )를 부여하여 다음과 같이 표기한다.

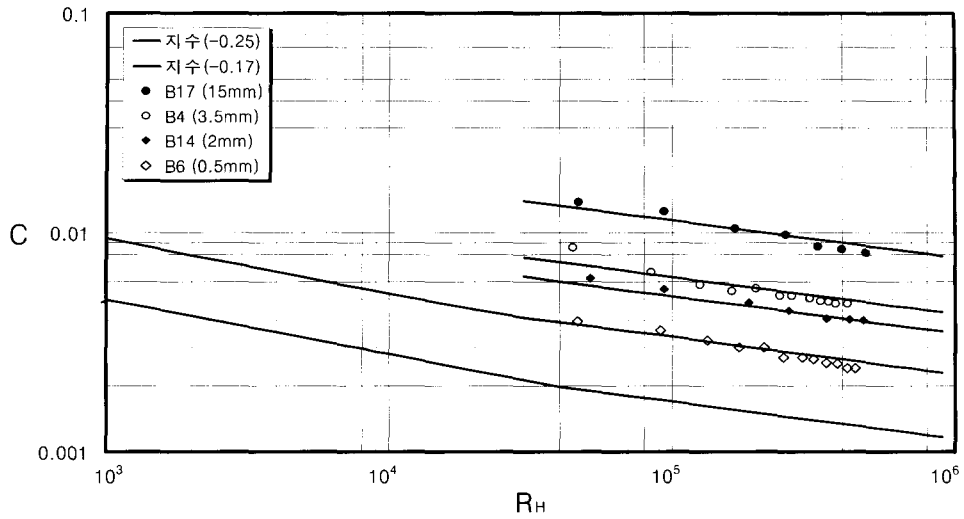
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + \gamma g A_R \left( \frac{\partial h}{\partial x} - i \right) + \frac{C}{H} |V|Q = \nu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (15)$$

여기서  $\gamma$ 는 수면에서의 분사 및 저류효과 등에 의한 에너지 감소율이며 보통  $\gamma < 1$  이고 하천 경사가 크며 하저에 퇴적된 암석이 불규칙하게 분포하여 있고 소류지가 많이 존재할수록 작아진다.

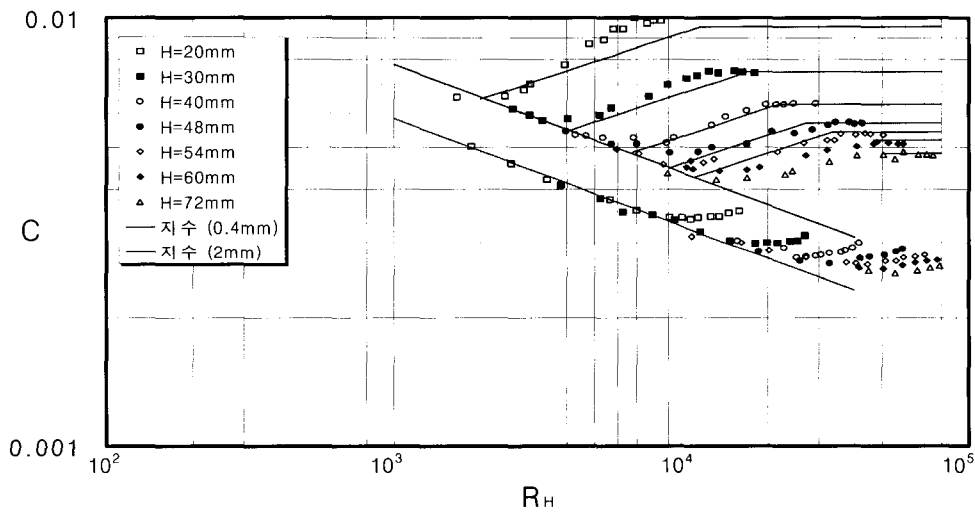
이상의 급경사 산지하천에 대한 수치처리는 조악한 방법이지만 하나 적어도 Jarrett의 연구결과로 나타난 바와 같이 하천경사에 따라 또한 수심이 작아짐에 따라 Manning계수 또는 마찰계수가 증가한다는 사실과 상충하지 않는다. 산지하천에 적용되는 산정식을 적극적으로 이용하려면 종합적이고도 심도 있는 연구가 전제되어야 하며 해당 산지하천의 지형조건을 현장 답사하여 입력조건을 추출하여야 할 것이다. 본 연구의 주요 대상지점이 상대적으로 하류에 위치하여 있으므로 산지하천의 유출 모의는 수치적인 안정을 확보하고 전제 유출 모의의 정밀도를 크게 해치지 않는 범위에 한정하여 식 (15)에 제시된 바와 같이 에너지손실계수  $\gamma$ 를 도입한 간편 방식을 취하였다.

### 3. 개수로 마찰계수

개수로에서의 흐름은 여러 가지 요인들에 의하여 저항을 받으며, Rouse(1965)와 Yen(2002)은 이들 요인을 네 가지로 구분하여 설명하였다. 벽면에서의 표면마찰(skin friction), 수표면에서의 혼합특성(surface distortion), 토사의 이동에 의한 에너지손실(energy loss due to sediment transport), 여러 장애물에 의한 압력저항과 수로의 사행성에 의한 흐름의 다양한 변이특성 등이 그들이 제시한 네 가지 요인들이다. 이중



(a) 사각형수로의 Bazin 실험자료와 지수함수식



(b) 제형수로의 Varwick 실험자료와 지수함수식

그림 4. 개수로 마찰계수에 대하여 지수형 산정식과 관측자료의 비교

표면마찰력은 관로 흐름에서도 뚜렷이 보여지는 요인으로서 Nikuradse(1933)의 실험자료와 Prandtl(1925)의 혼합특성이론에 의하여 잘 설명되고 있다. 반면에 자연하천에서 보여지는 개수로 흐름은 네 가지 요인들이 중복되어 나타나기 때문에 아직도 명확한 해석이 미흡한 실정이다. 한편 실험수조에서 반듯한 수로에 고정된 조면을 구성할 경우 상기 네 가지 요인들 중 벽면마찰과 수면혼합 특성만이 개수로 흐름에 작용한다. 그림

4에 제시된 Bazin(1865)과 Varwick(1945)의 실험은 이러한 조건 하에 이루어진 것이며, 특히 Bazin의 실험자료는 Bazin 그 자신뿐 아니라 Ganguillet과 Kutter(1869), Manning(1889, 1895), Keulegan(1938) 등에 의하여 분석되고 각각의 실험식들이 제시된 바 있다.

평균유속 또는 마찰계수 산정식을 개발하는데 있어 Bazin은 조고비만의 함수로 취하였고, Ganguillet과 Kutter는 조고비뿐만 아니라 조도 또는 조고와 수로경



사를 중요한 인자로 고려하였다. 흔히 Manning 공식이라 일컬어지는 산정식은 Hagen이 최초로 제시한 산정식인데 실제로 Manning이 제시한 산정식은 조고와 동수반경의 함수로 취하였으며, 지금 흔히 일컬어지는 Manning식은 정밀도가 상당히 떨어지는 것으로 확인되었다. 한편 Keulegan은 Prandtl이 제시한 바와 같은 대수분포형 산정식을 도입하여 Bazin자료를 조고비만의 함수로 취하여 우수한 산정결과를 보였으며, 그의 연구결과로 실무에서 간편한 형태의 Manning(Hagen)식을 선호하게 되었다. 그러나 그림 4에 제시된 바와 같이 레이놀즈수의 함수로 취하여도 우수한 회귀분석결과를 얻을 수 있다. 단지 조고에 따라 상향으로 평행이동하는 특성을 보이고 있다. 조고 분포가 다양한 상용관 흐름해석에도 Manning식을 도입하는 경우도 있으며, 이는 Hazen-Williams식의 형태가 Manning식과 유사할 뿐만 아니라 상용관 마찰계수의 분포양식이 개수로 마찰계수의 분포양식과 유사하기 때문이다.

그러나 Manning식과 함께 여전히 주목받고 있으며, 실무에서 자주 인용되어 사용되고 있는 Ganguillet-Kutter식은 분명히 조고비뿐만 아니라 조도 또는 조고와 수로경사가 주요 인자들로 구성되어 있으며, Manning이 선호한 그 자신의 산정식은 동수반경(레이놀즈수에 비해)과 조도 또는 조고가 주요 인자들로 구성되어 있다. 조고비 이외의 이들 추가 요인들은 수표면 혼합특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며, 수표면 혼합특성은 수면상 공기층과 벽면과 흐르는 수피의 수면간에 작용하는 표면장력과 난류혼합의 확산 정도에 따라 결정되는 것으로 판단된다. 벽면의 조고와 수로경사는 수표면 혼합특성에 상당한 영향을 미치는 주요 조건들로서 추정된다. 이러한 수표면 혼합특성은 층류 흐름에서 더욱 뚜렷이 나타나는데 Woo와 Brater(1961)는 거칠은 벽면수로에서 층류와 완난류를 조성한 후 정밀실험을 수행하여 조고와 수로경사가 모두 밀접히 관련되어 마찰계수를 증가시키는 원인으로 작용하여 개수로 마찰계수 분포가 관수로 마찰계수 분포로부터 상향으로 평행이동하는 특성을 보여주었다.

한편 그림 4(b)에 제시된 Varwick의 실험자료는 완난류(smooth turbulent flow), 전난류(rough turbulent flow)와 천이난류(transitional turbulent flow) 등을 모두 보여주는 분포 특성을 보이고 있다. 그는 다른 연구자들과 달리 수로의 기울기와 유량을 조정하여 동일 조고비를 추출하였는데 완난류 뿐만 아니라 전난류에서도 마찰계수 분포가 조고에 따라 상향으로

평행이동하는 특성을 보여주고 있다. 그의 실험자료 중 완난류 구간의 자료를 Keulegan과 같이 조고비의 함수로 취하여도 우수한 회귀분석 결과를 가질 수 있다. 그러나 전난류 구간에 대한 자료는 수표면 혼합특성에 따라 상향으로 평행 이동하는 특성으로 밖에는 설명되어 질 수 없다.

이러한 이유들로 인하여 금번 연구의 홍수유출 모형에 사용된 지수형 마찰계수 산정식은 조고, 수로기울기 등 수표면 혼합특성의 정도에 따라 변이하는 계수  $\alpha$ 와 동수반경 레이놀즈수  $R_H$ 와 조고비  $H_r$ 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$C = \alpha R_H^\beta H_r^\zeta \quad (16)$$

여기서  $R_H = VH_r/\nu$ ,  $H_r = H/k_w$ ,  $k_w$ 는 조고이다. 비례상수  $\alpha$ 는 표면마찰력과 연관된 수치와 부차손실과 연관된 수치의 합으로 나타나며,  $\beta$ 와  $\zeta$ 는 흐름특성 또는 각 변수의 크기에 따라 변이하는 계수이다.

마찰력 또는 저항력의 산정은 흐름해석에 있어서 매우 중요한 요소이며, 유량이나 유속산정에 있어 마찰계수 산정식의 정밀도를 확보할 필요가 있다. 기존의 개수로 마찰계수 산정식은 주로 정형화된 실험실 수로에서 관측된 자료로 만들어진 산정식이기 때문에 자연형 하천에서의 단면변화특성과 사행특성 등과 같은 부차손실의 영향을 고려하는데 미흡하였던 것으로 판단된다. 본 모형에서는 이러한 부차손실의 영향을 고려하기 위하여 다음과 같이 부차손실과 연관된 비례상수  $\alpha_s$ 항을 포함하였다.

$$\alpha = \alpha_f + \alpha_s \quad (17)$$

여기서  $\alpha_f$ 는 순수 표면마찰력을 반영하는 비례상수이며,  $\alpha_s$ 는 부차손실을 반영하는 비례상수이다.

표면마찰력과 연관된 비례상수  $\alpha_f$ 는 Varwick(1945)의 관측자료와 Bazin(1865)의 관측자료를 이용하여 유동훈과 이민호(2000) 등이 지수승  $\beta$ 와  $\zeta$ 와 함께 추정하였는데 표 1에 제시된 바와 같다.

Bazin이나 Woo와 Brater의 관측자료를 보거나 Ganguillet-Kutter식에 내포하였듯이 비례상수  $\alpha_f$ 는 조고와 함께 수면경사의 함수임을 알 수 있다. 관측자료의 미비로 아직 수면경사의 영향을 정확히 파악하고

표 1. 지수형 개수로 마찰계수 산정식의 제 계수

	흐름구분	경 계 조 건	$\alpha_f$	$\beta$	$\zeta$	
사 각 형	총 류	$R_H < 1,000$	$8.25k_w + 1.65$	-1.00	0	
	완난류 I	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$(0.018k_w + 0.025)$	-0.25	0	
	완난류 II	$40,000 \leq R_H < 1,000,000$	$0.0066k_w + 0.010$	-0.17	0	
	완난류 III	$1,000,000 \leq R_H < R_{H-ST}$	$(0.0026k_w + 0.0045)$	-0.11	0	
	천이난류	$R_{H-ST} \leq R_H < R_{H-TR}$	-	0.17	-0.80	
제 형	총 류	$R_H < 1,000$	$(8.0k_w + 2.0)$	-1.00	0	
	완난류 I	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$0.0096k_w + 0.028$	-0.25	0	
	완난류 II	$40,000 \leq R_H < 1,000,000$	$(0.0044k_w + 0.012)$	-0.17	0	
	완난류 III	$1,000,000 \leq R_H < R_{H-ST}$	$(0.0018k_w + 0.0052)$	-0.11	0	
	천이난류	$R_{H-ST} \leq R_H < R_{H-TR}$	$3.0 \times 10^{-3} H_r + 0.0106$	0.18	-0.80	
	전난류 I	$R_{H-TR} \leq R_H$	$H_r < 23$	$(0.0105k_w + 0.0172)$	0	-0.60
	전난류 II		$23 \leq H_r < 40$	$(0.0037k_w + 0.0137)$	0	-0.41

제 관련식에 도입된 등가조고  $k_w$ 의 단위는 mm

제 형 :  $R_{H-ST} = \text{Min}[(10 + 8.5k_w)H_r^{0.75}, 206 + 39k_w]$        $R_{H-TR} = \text{Min}[130H_r^{0.75}, 1320]$

완난류 경계조건 :  $R_{H-ST} = R_r \cdot H_r$

전난류 경계조건 :  $R_{H-TR} = R_r \cdot H_r$

( )에 기록된 산정식들은 관측자료 없이 관련식의 경향으로부터 추정된 관계식

$R_{r-ST} = R_r$  at ST point;  $R_{r-TR} = R_r$  at TR point;  $R_H = VH/\nu$ ,  $R_r = Vk_w/\nu$ ,  $H_r = H/k_w$

ST point: 완난류와 천이난류의 경계점, TR point: 천이난류와 전난류의 경계점

있지 못하며, 1차적으로 조고만의 함수로 비례상수 추정식을 구축하였다. 경사가 완만한 중하류 하천에서의 표면마찰력은 표 1에 제시된 수치만으로도 만족할만하게 해석할 수 있다. 그러나 산지하천에서의 같이 급경사 수로에 대하여는 1차적으로 수면경사의 효과를 반영하여 표면마찰력과 수표면 혼합력을 산정한 후에야 토사 이동손실, 압력항력, 공기혼입, roller eddies 등 다른 2차 효과를 고려할 수 있을 것이다.

표 1에 제시된 수치 중 비례상수  $\alpha_f$ 와 지수치  $\beta$ 와  $\zeta$  모두 관수로 마찰계수 산정식에 이용된 수치에 기초하여 추정된 수치들이다. 특히 제형 수로에 적용된 수치는 조면이 완전히 매끈할 경우 ( $k_w = 0$ ) 관수로 수치와 동일해지며, 사각형 수로의 수치들도 제형 수로의 수치들과 비교하여 크게 다르지 않다. 제시된 수치 중 괄호안으로 표기한 수치는 인근 수치들의 경향으로부터 추정한 수치들이며, 나머지는 직접 Bazin자료와

Varwick자료를 이용하여 구한 것들이다.

유동훈과 이민호(2000)는 지수형 산정식의 산정결과와 관측자료를 비교하였는데 거의 모든 관측범위에서 양호한 결과를 보여주었다. 특히, 관측결과에서 주목할 점은 레이놀즈수가 작을 때 마찰력의 절대치는 작지만 마찰계수는 상대적으로 크다는 점이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 즉, 난류도가 증가함에 따라 마찰력의 절대치는 커지게 되지만 마찰계수는 상대적으로 작아진다. 즉, 유량이 증가하여 유속도 커지고 수심도 커지면 레이놀즈수도 따라서 증가하는데 이때 마찰계수는 상대적으로 작아진다. 한편 Manning식을 지수형 산정식으로 변환하면  $\beta = 0$   $\zeta = -0.33$ 이 된다. 반면에 Varwick 실험자료로부터 추출된 전난류 조건의 수치는  $H_r < 23$ 일 때  $\zeta = -0.6$ 이고  $23 < H_r$ 일 때  $\zeta = -0.41$ 로 추정되었다. 즉, 관련인자의 범위에 따라 지수  $\zeta$ 가 상당한 폭으로 변이하는 것을 알 수 있다.

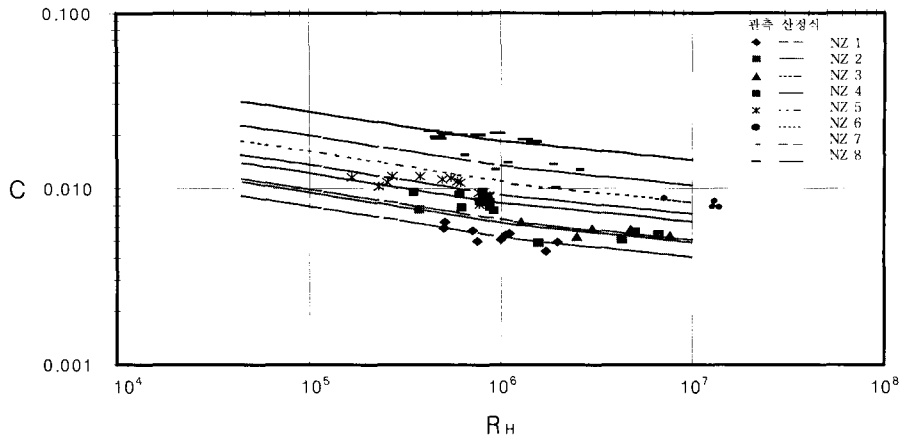


그림 5. 자연하천의 지수형 마찰계수 산정식 적용

그림 5는 Hicks와 Mason(1998)에 의해 보고된 New Zealand 하천의 관측자료를 레이놀즈수대 마찰계수 분포도로 나타낸 것이다. 그들의 현장관측자료로부터 추정된  $\alpha$ 는  $\alpha_f + \alpha_s$  값으로서 유동혼과 이민호(2000)가 개발한 지수형 마찰계수 산정식을 도입하여  $R_H$ 가  $1,000 < R_H < 40,000$ ,  $40,000 < R_H < 1,000,000$ ,  $1,000,000 < R_H$  일 때  $\beta$ 를 각각  $-0.25$ ,  $-0.17$ ,  $-0.11$ 로 가정하여 회귀분석한 결과이며, 표 2는 각 관측지점의 수리특성과 함께  $\alpha$ ,  $\beta$  값을 정리한 것이다. 자연하천에서는 마찰계수를 지배하는 요인이 관수로에서와 같이 순수 표면마찰력(개수로인 경우 수표면 저항력 포함)이 아닌 사행특성이나 단면변화특성과 같은 부차손실이므로, 상당히 불규칙적인 양상을 띠고 있는 것처럼 보인다. 그러나 전체적으로 보면 개수로 표면마찰계수 분

포도와 마찬가지로 레이놀즈수의 증가에 따라 마찰계수가 감소하고 조고 또는 하천 형상의 불규칙 정도에 따라 상향으로 평행이동하는 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

부차손실과 연관된 비례상수  $\alpha_s$ 의 수치는 New Zealand 하천의 관측자료와 Manning 계수로부터 표 2와 표 3에 제시된 바와 같이 추정하였다. 표 2의  $\alpha$  값은 순수 표면마찰력과 부차손실을 모두 포함하는 수치이다. 표 3의  $\alpha_s$  값은  $40,000 \leq R_H < 1,000,000$  완난류 II 구간을 기준으로 하여 추정된 값이다. 관수로 마찰흐름에서 Prandtl-von Karman의 대수형 산정식을 Blasius 식과 같은 지수형 산정식으로 표기하면 완난류에 대하여 3개 이상의 구간으로 분류하여야 한다. 유동혼과 강찬수(1996)는 제I구간을  $1,000 \leq R_H < 40,000$ , 제II구간을

표 2. 자연하천 손실계수

	각 관측지점의 수리특성	$\beta = -0.17$	$\beta = -0.11$
		$\alpha$	$\alpha$
NZ 1	유로와 단면이 규칙적인 수로	0.056	0.024
NZ 2	단면이 불규칙한 사행수로	0.067	0.029
NZ 3	잡초가 있고 단면이 불규칙한 사행수로	0.070	0.030
NZ 4	단면이 불규칙한 자갈하상	0.086	0.038
NZ 5	실트질 모래와 자갈, 잡초가 있는 하천	0.096	0.042
NZ 6	자갈하상이며 단면이 불규칙한 사행수로	0.115	0.049
NZ 7	수초가 많은 하천	0.141	0.061
NZ 8	단면이 불규칙하며, 자갈과 호박돌로 구성된 하상	0.193	0.087

표 3. 개수로 부차손실 계수

	수로조건	$\alpha_s$		
		완난류 II 구간	완난류 I 구간	완난류 III 구간
자연하천	유로와 단면이 규칙적인 수로	0.01 ~ 0.02	$\alpha_s \times 2.33$	$\alpha_s \times 0.43$
	이동상 하상, 자갈하상	0.02 ~ 0.05		
	단면이 불규칙한 사행수로	0.03 ~ 0.10		
	호박돌과 잡초가 있는 사행수로	0.06 ~ 0.20		
	수초가 많은 하천	0.10 ~ 0.30		

40,000 ≤ R<sub>H</sub> < 1,000,000, 제III구간을 1,000,000 ≤ R<sub>H</sub>으로 분류하고 제I구간의 지수치는 Blasius수치와 동일한 수치인 -0.25, 제II구간의 지수치는 -0.17, 제III구간의 지수치는 -0.11로 임의적으로 선정하였으며, 이때 비례상수는 각각 0.028, 0.012, 0.0052로 추정하였다. 즉, 제I구간의 비례상수는 제III구간 비례상수의 2.33배이며, 제III구간은 제II구간 비례상수의 0.43배로 산정된다. 표 3에 제시된 바와 같이 이들 배수를 개수로 마찰계수 산정에도 적용하였다.

4. 모형의 검증 및 적용

연구대상 유역으로는 대규모인 안성천 유역과 매우 작은 규모인 금곡천 유역을 선정하였다. 금곡천은 경기 북부에 있는 왕숙천의 지천으로 유역면적은 8.75km<sup>2</sup>, 유로연장 4.4km, 하천경사는 1/30정도로 경사가 매우 급한 전형적인 산지 소하천의 형태를 나타내고 있다. 유

역면적 최소 0.062km<sup>2</sup>로부터 최대 1.44km<sup>2</sup>까지 총 33개의 소유역으로 전 유역(그림 6)을 연구 대상의 유역망으로 구성하였으며, 하천 격자는 60m 간격으로 총 108개의 단면으로 구성하였다. 안성천 유역은 경기도와 충청남도 2개 도에 걸쳐 있으며, 북쪽에는 한강유역이 위치하여 있고, 남서쪽으로는 삼교천과 경계를 이루고 있다. 유역의 북쪽 상류에는 수원시, 오산시 등이 위치하여 있고 남쪽 하류에는 평택시와 아산군이 위치하여 있다. 유역면적은 1,677km<sup>2</sup>이고, 본류 유로 연장은 64km이며 총 186개의 소유역으로 유역망(그림 7)을 구성하였고 하천격자는 500m 간격으로 617개 단면으로 구성하였다.

대상유역에 대한 전산 모형의 적용을 위하여 금곡천 유역은 2001년 6월 29일부터 동년 6월 30일까지의 관측자료를 사용하였으며, 안성천 유역은 2000년 7월 22일부터 동년 7월 23일까지의 관측자료를 사용하였다.

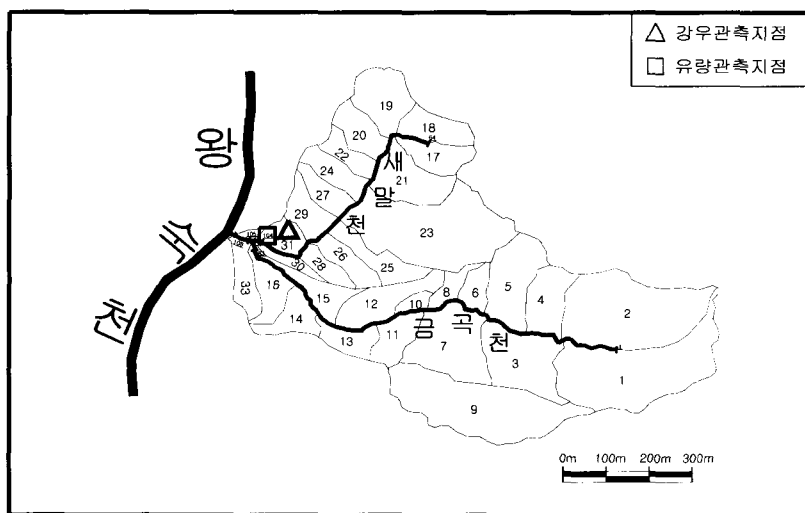


그림 6. 금곡천 유역도

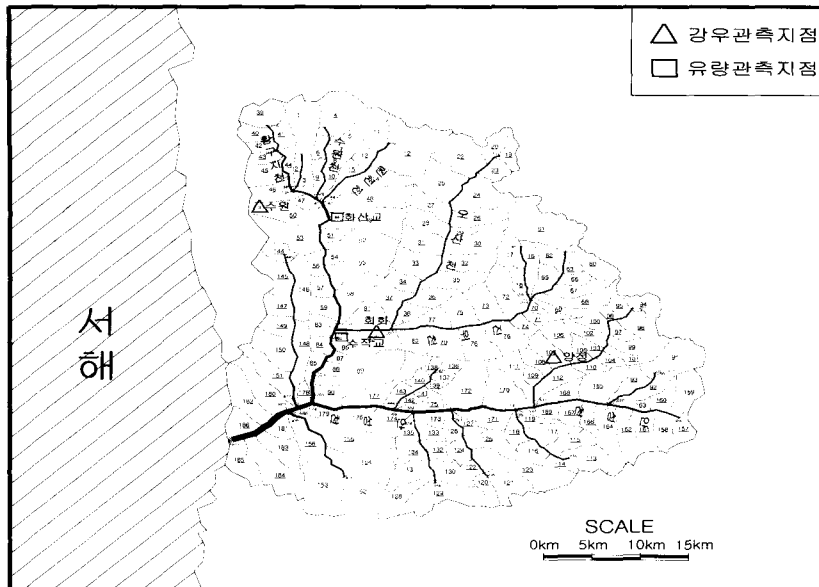


그림 7. 안성천 유역도

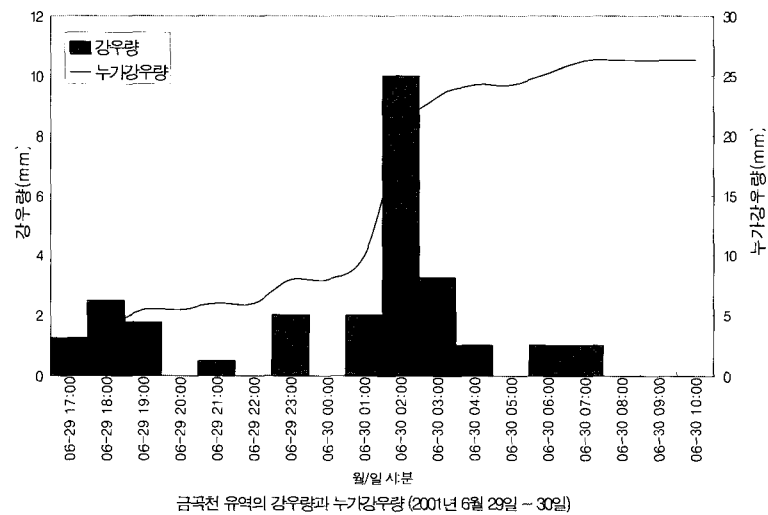
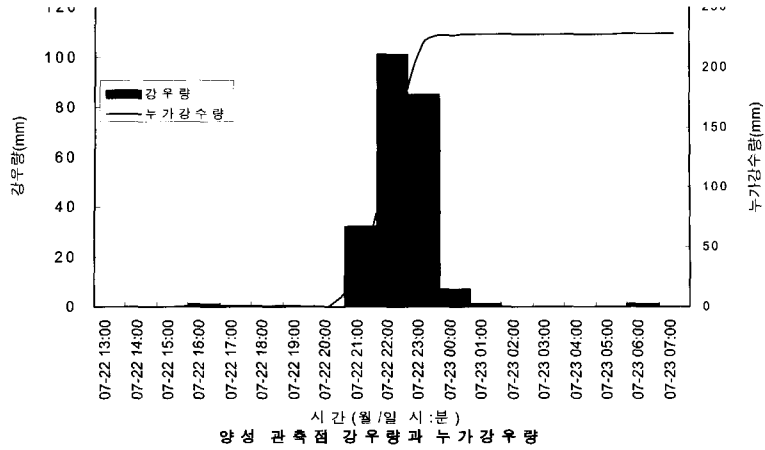


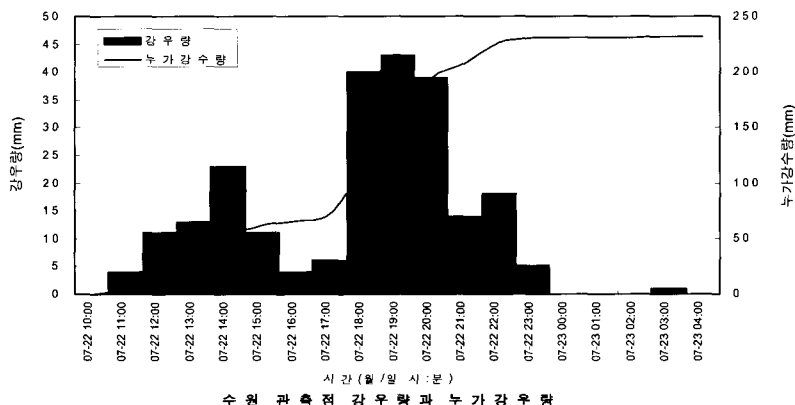
그림 8. 금곡천 유역 강우 관측자료

관측된 강우자료는 그림 8(금곡천)과 그림 9(안성천)에 제시된 바와 같이, 관측한 강우자료와 유역정보를 이용하여 금곡천(새말천) 유역과 안성천 유역에 대하여 수치모의를 실시하였다. 그림 8과 그림 9에 제시된 강우 자료는 모형 SIRG-RS를 이용하여 지표면 유출량을 산정할 때 직접적으로 사용한 관측자료이다. 유효강우량 추출을 위하여 각 유역의 유출계수를 추정하여야 되

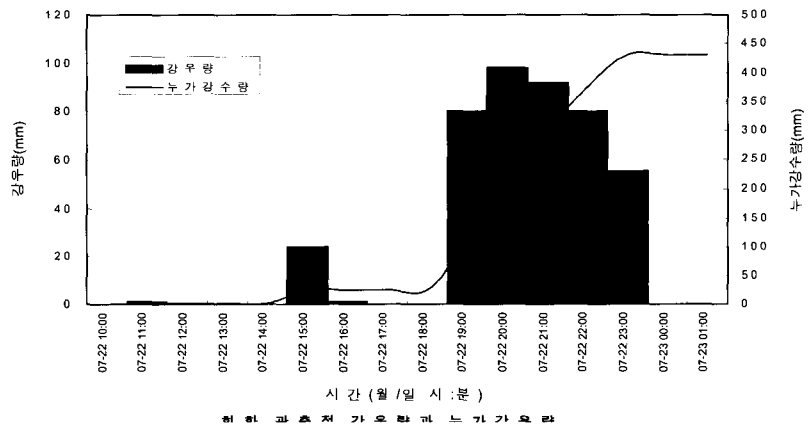
는데 지표피복도를 검토하고 일부 지역은 현장 방문하여 유출계수를 추정하였다. 금곡천의 경우 1개 지점에 서만 강우 관측을 실시하였는데 유역 면적이 작기 때문에 전 유역에 동일한 강우가 내린다고 가정하였다. 안성천 유역에서는 3개소에서 강우 관측을 실시하였는데 Thiessen 다각망을 구성하기에는 자료 개수가 부족하여 각 소유역의 강우를 3개소의 강우로부터 선형내삽과



(a) 양성



(b) 수원



(c) 화화

그림 9. 안성천 유역 강우 관측자료

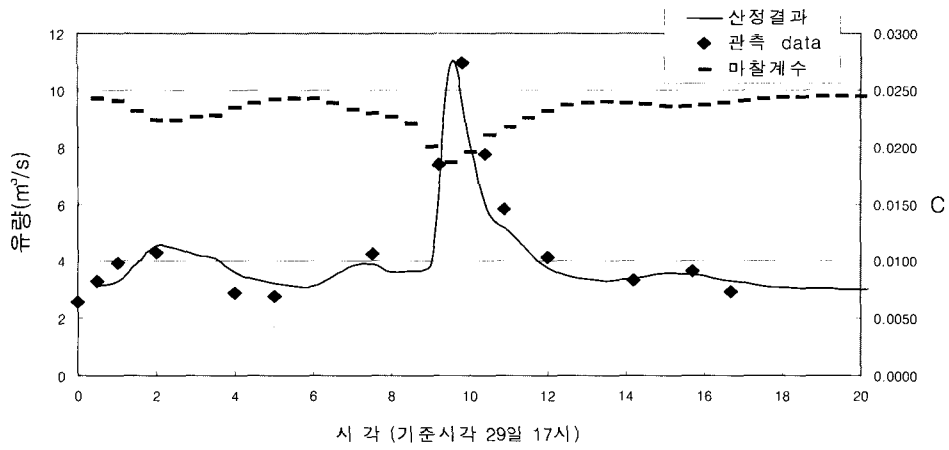
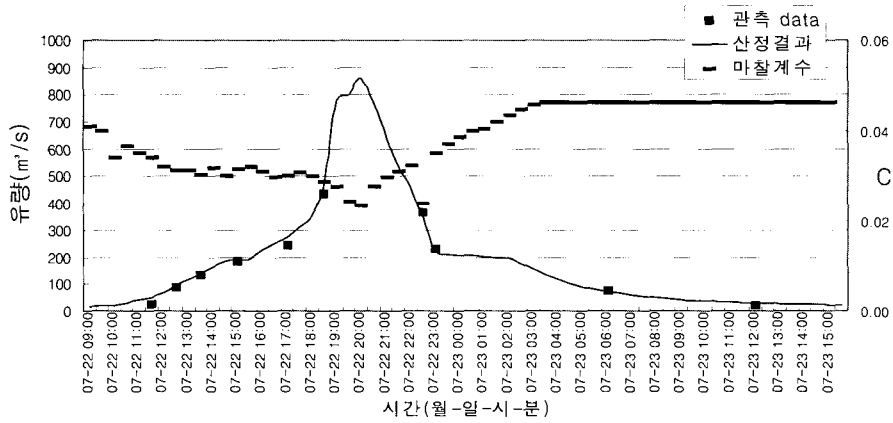
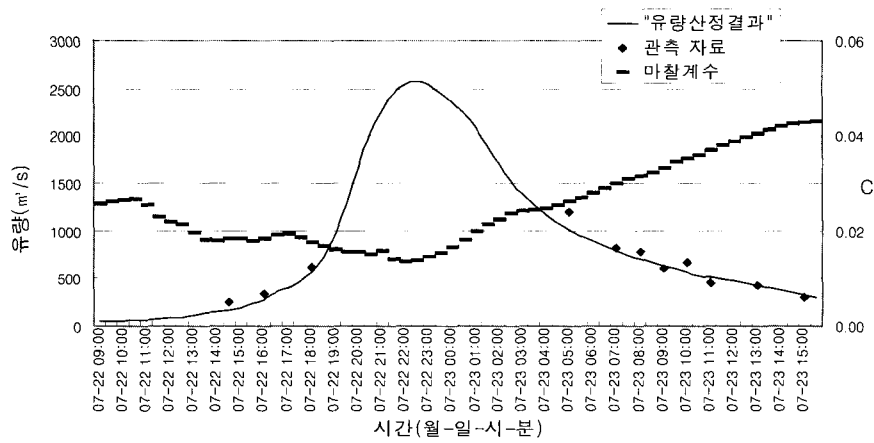


그림 10. 금곡천 유역의 수치해석과 관측자료의 비교



(a) 화산교



(b) 수직교

그림 11. 안성천 유역의 수치해석과 관측자료의 비교

외삽법으로 추정하였다.

금곡천에서의 관측지점은 그림 6에 도시된 바와 같이 새말천이 금곡천과 합류하는 지점으로부터 상류로 약 1.1 km에 위치한 곳으로 1998년 당시 홍수범람의 피해가 가장 심했던 곳이다. 안성천 유역에서는 황구지천, 진위천 등에 7개소 이상 관측지점을 설치하였는데 본고에는 2개 지점의 관측치만 제시한다. 하나는 화산교 지점으로서 수원으로부터 황구지천에 합류하기 직전이고, 다른 하나는 진위천의 중류상에 위치한 수직교 지점으로서 안성천 유역의 80% 이상 유역면적을 차지한 지점이다. 2000년 7월의 홍수시 특히 수직교 인근의 제방을 월류하고 인근 도로를 범람하여 3시간 이상 교통이 두절되었다. 수위와 유속을 현장에서 관측하여 유량을 추정하였는데 침두시각을 전후하여 수시간 관측이 불가능하였다(산학협동재단, 중소유역 홍수 예경보 시스템 개발, 2000).

금곡천의 경우 최대침두유량을 정확히 관측하지는 못하였지만  $11.1 \text{ m}^3/\text{s}$  이상은 되는 것으로 추정되는데 본 모형의 산정결과는  $11.0 \text{ m}^3/\text{s}$  이다. 한편 그림 10에 함께 도시된 바와 같이 홍수량의 변화에 따라 마찰계수도 상당히 변화되는 것을 알 수 있다. 지수형 산정식은 완난류 특성을 반영하여 유출량이 증가할수록 마찰계수를 작게 산정하고 유출량이 줄어들면 마찰계수는 오히려 증가한다. 안성천의 경우에는 홍수위가 최대점에 이르는 전후 1시간 가량 교통통제로 인하여 관측이 불가능하였으며, 화산교에 설치한 자동수위계측기도 작동불능상태에 이르렀다. 따라서 그림 11에 도시된 바와 같이 침두시각을 전후하여 상당 시간 관측자료를 취득치 못하였다. 그럼에도 불구하고 침두시각 이후에 재개된 관측의 결과로 추정하면 본 모형의 산정결과는 실제 자료에 근접할 것으로 추정된다. 계산된 결과로 침두유량을 살펴보면 화산교에서는 약  $860 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 수직교에서의 침두유량은 약  $2600 \text{ m}^3/\text{s}$  이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 경기도 안성천 유역과 왕숙천의 지류인 금곡천 유역에 대해 홍수 유출 모의를 시도하였고 지수형 마찰계수 산정식을 도입하여 개수로 흐름의 완난류 특성을 반영하였다. 본 모형의 적용에서 기존 Manning식을 사용하여도 Manning계수의 조정으로 유사한 산정 결과를 득할 수 있었다. 따라서 산정 결과의 정확도만으로 두 산정식의 우열을 판단하기에는 무

리가 따른다. 그러나 Varwick이나 Woo와 Brater 등의 관측결과로부터 추정되는 바와 같이 Keulegan이나 Bazin 등이 Bazin의 관측자료를 전난류로 해석할 수 있었던 이유는 완난류의 기본특성에 조코나 수면경사에 따라 마찰계수 분포가 평행으로 상향 이동하는 특성 때문인 것으로 파악되고 있다. 분명히 개수로 흐름에서도 층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등의 흐름특성이 존재할 것이며, 이러한 흐름 특성을 충분히 반영할 수 있는 지수형 산정식을 사용하는 것이 수리조건 또는 흐름특성에 따라 매우 다양한 형태가 발생하는 홍수유출 흐름을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

Hick와 Mason(1998)에 의해 보고된 New Zealand 하천의 관측자료를 바탕으로 마찰계수 산정식의 비례상수  $\alpha$  값을 분석하여 각 관측지점의 수리 특성에 따라 분류하여 제시하였으며 부차손실계수를 산정하기 위한 비례상수를 추정하였다(표 3). New Zealand 하천의 관측자료를 살펴보면 Bazin 등의 개수로 실험 자료와 유사한 형태를 나타내고 있다. 그러나 개수로 실험 관측치를 통해 구한  $\alpha$  값에 비해 자연형 하천의 관측치를 분석하여 구한  $\alpha$  ( $\alpha_t + \alpha_s$ ) 값이 하천의 수리 특성에 따라 일정량 증가한다. 이는 정형화된 실험 관측치에 비해 자연형 하천은 사행특성, 단면변화 특성, 하상 조고 특성 같은 부차손실( $\alpha_s$ )이 상당 부분 차지하고 있기 때문인 것으로 파악되고 있다.

본 연구에서 개발된 자연형 하천에 대한 지수형 마찰계수 산정식은 수리조건 흐름특성에 따라 다양한 경우에 대하여 적용 가능하며 Manning식과 같이 단순하면서 단일 형태를 취하였을 때 대두되는 경험계수 선택의 불확실성을 근본적으로 제거하여 주기 때문에 자연형 하천의 마찰계수를 보다 쉽고 정확하게 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 정형화된 개수로 실험 관측치로 얻어진 마찰계수 산정식을 자연형 하천에 적용함으로써 발생하는 마찰계수의 과소 산정의 문제점을 보완할 수 있을 것이다.

부차손실등을 고려하여 지수형 마찰계수 산정식을 개선하여도 급경사의 산지 소하천에서 발생하는 수치불안정을 해소할 수는 없었다. 이는 여러 연구자들이 기술한 바와 같이 급경사 수면에서의 수표면 혼합특성, 급류로 야기되는 하저토사의 장대화 와 이에 연유한 압력저항, 토사의 세굴, 이동 및 그에 따른 에너지손실, 계단식 소류지 시스템의 발달과 소류지에서의 roller eddies, 공기혼입 등 여러 격렬한 수리 조건으로 인하



여 수류에 대한 항력이 심지어 수십 배에 이르기 때문인 것으로 판단되고 있다. 아직 이에 대한 정량적 해석이 미흡함과 동시에 주요 연구 대상지가 하류에 위치하여 있기 때문에 산지 소하천에서의 에너지손실은 에너지경사에 비례상수를 도입하여 수치적 안정을 기하였으며, 하류에 위치한 관측점에서의 유출량 추정에 대하여 대체적으로 양호한 산정결과를 얻을 수 있었다. 그러나 산지하천 유역이 주요 연구 대상지이거나 전체 모형의 정밀도와 신뢰성을 높이고자 한다면 산지하천에서의 여러 에너지손실 요인들을 종합적으로 분석하여 적합한 경험식의 도출이 전제되어야 할 것으로 판단된다.

자연형 하천에 대한 지수형 마찰계수 산정식을 SIRG-RS 홍수유출모형에 적용하여 소유역(새말천 유역)과 대유역(안성천 유역)에서 관측된 일련의 강우 사상에 의한 홍수유출을 모의하였다. 유역 면적의 크기가 전혀 다른 두 유역에 적용하여 기존 모형의 미흡한 점을 파악하고 보완하였다. 그러나 안성천 유역에서 첨두 유량을 관측치 못한 것과 같은 관측의 결함과 동일 유역에 대하여 여러 강우 사상에 대한 모의를 실시하지 못하여 검증에 있어 크게 만족할 만한 성과를 거두지는 못하였다. 앞으로 보다 많은 관측자료가 확보되고 현장 관측의 기회가 주어지면 SIRG-RS 홍수유출모형을 보다 우수한 모형으로 개선 발전시킬 수 있을 것이다.

지표면 유출(지표하 유출 포함)과 하천 유출을 동시에 고려하는 홍수유출 모의에서 상당히 많은 부분을 경험식과 경험계수에 의존하여야 한다. 특히 지표면 유출에서의 마찰계수와 하천 유출에서의 마찰계수 산정이 가장 어려운 부분으로 인식되고 있는데, 하천 유출의 마찰계수는 자연형 하천의 관측자료를 이용하여 상당한 정밀도의 경험식을 개발하여 모형의 신뢰도를 높일 수 있었다. 그러나 지표면 유출의 도달시간 추정을 위한 지표면 흐름 마찰계수 산정은 여러 요인들을 종합적으로 고려한 수식이 개발되어 있지 않아 이에 대한 정량적 해석이 미흡하다. 본 수치모의에서는 지표면 유출의 마찰계수 산정에 도입되는 비례상수를 하천 유출의 최종 결과에 따라 조정하였는데, 급경사 산지하천에 대한 해석이 미흡하여 조정된 수치를 전적으로 신뢰할 수는 없을 것이다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 2001년 산학협동재단 연구과제인 “중소유역 홍수유출량 산정 모형 개발”의 일환으로 이루어진 것이며 이에 감사를 표한다. 본 연구에서 이루어진 수

치모의는 아주대학교 석사과정을 밟은 오윤창, 나정엽, 김연호 등에 의하여 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부 (1999). 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발.
- 산학협동재단 (2000). 중소유역 홍수 예경보 시스템 개발.
- 유동훈 (1995). “사각형 개수로 마찰계수”, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제2호, pp.155-168.
- 유동훈, 강찬수 (1996). “균일조도 동력경사관의 양해법 설계.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권, 제3호, pp.163-175.
- 유동훈, 이민호 (2000). “지수형 개수로 마찰계수 산정식”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제1-B호, pp. 1-10.
- 유동훈, 이정영 (2001). “지표면-하천 유출의 연계 수치모형”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제1호, pp. 91-103.
- 유동훈, 이종원 (1997). “사각형 개수로의 완난류 마찰계수”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제17권, 제2-5호, pp. 444-452.
- 유동훈, 전우용 (2000). “불투수층 사면에서의 도달시간.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제2호, pp. 195-205.
- 한국건설기술연구원 (1988). 건설부, 한국 확률강우 강도.
- 황의준, 전경수 (1997). “한강분류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- Bathurst, J. C. (1978). “Flow resistance of large-scale roughness,” *J. Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 104, No. 12, pp. 1587-1603.
- Bathurst, J. C. (1983). “Flow resistance estimation in mountain rivers,” *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 625-643.
- Bray, D. I. (1979). “Estimating average velocity in gravel-bed rivers,” *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1121.
- Chow, Ven Te. (1982). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill.
- Ganguillet, E. and Kutter, W.R. (1869). “An

- investigation to establish a new general formula for uniform flow of water in canals and rivers." *Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines*, Vol. 21, No. 2, pp. 129-147.
- Griffiths, G. A. (1987). "Form resistance in gravel channels with mobile beds," *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 340-355.
- Hicks, D. M. and Mason, P. D. (1998). *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers*, National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd.
- Horton, R. E. (1940). "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity," *Soil Science Society of America*, Vol. 5, pp. 399-417.
- Jarrett, R. D. (1984). "Hydraulics of high-gradient streams," *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539.
- Keulegan, G. H. (1938). "Laws of turbulent flow in open channels," *J. Research, National Bureau of Standards*, Research paper 1151, Vol. 21, No. 6, pp. 139-150.
- Manning, R. (1889). "On the flow of water in open channels and pipes," *Tans. Inst. Civil Eng. Ireland*, Vol. 20, pp. 161-195.
- Manning, R. (1895). "On the flow of water in open channels and pipes, Supplement," *Tans. Inst. Civil Eng. Ireland*, Vol. 24, pp. 179-207.
- Noori, B. M. A. (1984). "Form drag resistance of two dimensional stepped steep open channels," Proc. 1st Int. Conf. on Hydraulic Design in Water Resources Eng., Channels and Channel Control Structures, K.V.H. Smith, ed., Springer, pp. 133-147.
- Rouse, H. (1965). "Critical analysis of open-channel resistance," *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 91, No. 4, pp. 1-25.
- Shen, H. W. and Li, R. M. (1973). "Rainfall effects on sheet flow over smooth surface," *J. Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 99, No. 5, pp. 771-792.
- Singh, V. P. (1976). "Derivation of time of concentration," *J. Hydrology*, Vo. 30, pp. 147-165.
- Soil Conservation Service, (1964). *Hydrology*, SCS National Eng. Handbook, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Thorne, C. R. and Zevenbergen, L. W. (1984). "Estimating mean velocity in mountain rivers," *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 612-623.
- Tracy, H. J. and Lester, C. M. (1961). "Resistance coefficient and velocity distribution: smooth rectangular channel," U.S. Geological Survey, Water-supply paper 1592-A.
- Whittaker, J. G. and Jaeggi, M. N. R. (1982). "Origin of step-pool systems in mountain rivers," *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 108, No. 6, pp. 758-773.
- Williams, G.S. and Hazen, A. (1933). *Hydraulics Tables*, John Wiley & Sons, Inc. oo, D-C and
- Brater, E. F. (1961). "Laminar flow in rough rectangular channels," *J. Geophysical Research*, Vol. 66, No. 12, pp. 4207-4217.
- Yen, B. C. (2002). "Open channel flow resistance," *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 129, No. 1, pp. 20-39.
- Yen, B. C. and Akan, A. O. (1999). "Chapter 14: Hydraulic design of urban drainage systems," *Hydraulic Design Handbook*, L. W. Mays, ed., McGraw-Hill, New York.
- Bazin, H.E. (1865). *Recherches experimentals sur lecoulement de leau les canaux decouverts*, Memoires presentes par divers savants al Academie des Sciences, Paris, Vol. 19.
- Nikuradse, J. (1933). "Stroemungsesete in rauhen Rohren," *Ver. Dtsch. Ing. Forsch.*, No. 361.
- Prandtl, L. (1925). "Uber die ausgebildete Turbulenz," *Z. Angew. Math. Mech.*, Bd. 5, pp. 136-139.
- Varwick, F. (1945). "Zur Fließ Fließ fur offene Kunstliche Gerne." These inedite, Dresden University.

(논문번호:02-68/접수:2002.09.04/심사완료:2003.01.23)