

사면 및 하도 복합유출장의 단기 유출해석 시스템 개발

하 성 룡*, 이 광 호*

1. 서론

유역의 개발에 따른 상수원의 수질 악화 현상은 사회, 경제 및 생태적 측면에서 커다란 관심을 집중시키고 있다. 우리나라와 같이 국토의 대부분이 산지이며 하천 중심이 잦은 유역에서는 수자원의 개발과 도시의 산업경제 활동이 거의 동일한 공간에서 일어나게 된다. 따라서 상수원의 문제도 집수유역내 하천의 홍수대책을 위한 치수의 면과 식수 및 산업용수의 공급을 위한 이수면에서 수량 및 수질학적 양면으로 발생되어지고 있다. 특히 유역의 개발(도시화 및 리조트 개발 등)은 강우유출 특성의 변화를 초래하여 홍수집중시간의 단축과 유출율의 증가를 유발시키며, 수질 측면에서도 점원 및 비점원 오탁부하 유출량의 증가에 의하여 상수원의 수질보전에 커다란 장애요인으로 지적되어지고 있다. 종래 수문해석 연구의 주요 관심은 재해대책을 위한 하천공사의 기초자료인 첨두유출량의 산정에 집중됨으로써, 유출현상의 수리해석은 비교적 경시되어 왔다고 볼 수 있다. 그러나 유역의 개발에 따른 상수원 수질변화를 평가하기 위해서는 오탁부하의 발생 및 그 유출에 지배적 영향을 미치는 강우-유출현상의 사면 및 하도공간에서의 수리학적 거동에 대한 해석 수법의 개발이 절실히 요구되어지고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 유역개발에 따른 오탁부하 유출해석에 요구되어지는 유역의 지형인자를 고려한 강우의 수리학적 단기 유출해석 시스템을 개발하는 것이다.

2. Kinematic wave 이론

kinematic wave 기초 방정식은 식(1)으로 정리되며, 그 해는 특성곡선 (Charateristic curve) 추적에 의하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad W = K \cdot Q^P \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{P K^{1/P}} W^{(1/P - 1)}, \quad \frac{dW}{dt} = q \quad (2)$$

* 정희원. 忠北大學校 都市工學科

사면류에 관한 Kinematic wave의 기본방정식은 사면유량 $q(t)$ 와 사면의 균등유입량인 강우강도 $i_r(t)$ 의 관계로 부터 식 (3)으로 설명된다. 사면류의 특성곡선과 이 곡선을 따라 전파되어지는 수위의 특성방정식이 각각 다음 식으로 산출된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x'} = i_r, \quad h = K_1 \cdot q^{P_1} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{P_1 K_1^{1/P_1}} \cdot h^{(1/P_1 - 1)} \cdot \frac{dh}{dt} = i_r \quad (4)$$

2.2 우수전파의 수치해석법

계산시간 간격 Δt 동안의 사면류의 이동위치 및 특성곡선상의 수리변화량은 다음 식(5)와 같이 차분계산에 의하여 구해진다.

$$\left. \begin{aligned} x'(t+\Delta t) &\cong x'(t) + \frac{\Delta q}{\Delta h} \cdot \Delta t \\ \Delta h &= h(t+\Delta t) - h(t) \cong i_r(t+\Delta t) \cdot \Delta t \\ \Delta q &= q(t+\Delta t) - q(t) \\ &\cong \frac{1}{K_1^{1/P_1}} \left[\left\{ h(t+\Delta t) \right\}^{1/P_1} - \left\{ h(t) \right\}^{1/P_1} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

또한 하도류의 경우도 사면류의 경우와 같이 단위 계산시간 간격 Δt 간의 사면유출유량 $q(t+\Delta t)$ 가 일정하다면 다음 등식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} W(t+\Delta t) &\cong W(t) + \bar{q} \cdot \Delta t \\ \bar{q} &\cong 1/2 \{ q(t) + q(t+\Delta t) \} \\ x(t+\Delta t) &\cong x(t) + \frac{\Delta Q}{\Delta W} \cdot \Delta t \\ \Delta W &= W(t+\Delta t) - W(t) = \bar{q} \cdot \Delta t \\ \Delta Q &= Q(t+\Delta t) - Q(t) \\ &\cong \frac{1}{K^{1/P}} \left[\left\{ W(t+\Delta t) \right\}^{1/P} - \left\{ W(t) \right\}^{1/P} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Kinematic wave 수치해의 안정성은 차분방정식의 계산시간 Δt 와 사면 및 하도 거리의 계산 간격 Δx 에 의하여 결정된다. 계산간격 Δx , Δt 가 주어질 때 해가 안정되기 위한 필요조건은 시간간격 Δt 간에 특성곡선의 궤적($x+dx$)가 $(x+\Delta x)$ 를 초과하지 않을 것, 즉 $dx < \Delta x$ 가 되도록 $\Delta t - \Delta x$ 의 격자망을 설정하는 것이다. 해의 안정조건은 특성곡선으로 부터 다음 식으로 정의된다.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} < \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max} = \left(\frac{Q^{1-P}}{PK} \right)_{\max} \quad (7)$$

3. 강우유출 해석 시스템 Kis (Kinematic wave storm runoff system)

시스템의 기본개념을 강우-유출현상에 대한 Kinematic wave 가정을 전제로 하여 강우-유출현상을 사면류와 하도류로 구분하고, 강우의 전파현상을 특성곡선의 추적에 의하여 해석한다. 해석대상유역은 유역의 수문 지형학적 이론에 입각하여 다수의 단위등가조도 유역(2사면1하도 복합체)으로 분할되어지고, 각 단위등가조도유역은 유역의 하천망체계를 따라서 상하류 유역으로 모델화된다.

표 1. 강우 유출해석 시스템 Kis의 구성요소 및 해석방법

구 성 요 소	해석이론 및 방법	파라메타	단 위	설 명
사면류해석 및 등가조도유역 lumping	- Kinematic wave 이론 및 등가조도계수 - Charateristic curve 추적법	Ne	m ^{-1/3} .sec	사면등가조도계수
		S _n	-	등가사면평균경사
		K ₁ , P ₁	-	등가사면 정수
		L _s ΔX _s , Δt _s	m m, sec	등가사면길이 사면류계산간격
하도류 해석 및 하도망 추적	- Kinematic wave 이론 - Charateristic curve 추적법	a, Z, K, P	-	하도정수
		n	-	하도 조도계수
		S _c	-	하도 평균경사
		L _c ΔX _c , Δt _c	m m, sec	하도 길이 하도 계산간격
지하수유입 해석	- 지하수 감수계수 산정법	λ	hr ⁻¹	지하수감수계수
		G ₀ , G ₂	m ³ /sec/km ²	지하수 유입량
		t ₀ , t ₁ , t ₂	sec	지하수계산 시각
유역평균강우 강도 및 유효강우분리	- Thiessen망 - SCS법	CN	-	SCS법의 유출지수
		Fa	mm	초기손실유량
		a _{ij}	-	Thiessen 계수

시스템 계산결과의 통계적 평가기준은 첨두자승오차 E₁과 카이 자승오차 E₂로 한다.

$$E_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{F_o - F_c}{F_{op}} \right]_i^2, \quad E_2 = \sum_{i=1}^m \left[\frac{(F_o - F_c)^2}{F_o} \right]_i \quad (8)$$

여기서 m 는 관측데이터수, F_o, F_{op} 는 관측수문량 및 첨두수문량, F_c 는 계산수문량이다.

4. 시험유역의 등가조도 모델화

Strahler방식에 의해 차수화된 하도망을 기준으로 대상유역을 u차 집수역과 그 잔류역으로 분할하고, 각각의 단위유역 중앙에 하도를 그 양편에 좌우비대칭의 등가조도 사면을 지니는 직사각형 유역으로 단순화한다. 이때, 각 u차 집수역의 하도길이(L_c)는 주 2차 하도 상류단으로부터 u차 하도의 최하류단까지로 정의하고, 하도를 중심으로한 좌우 집수역 면적을 하도길이로 각각 나

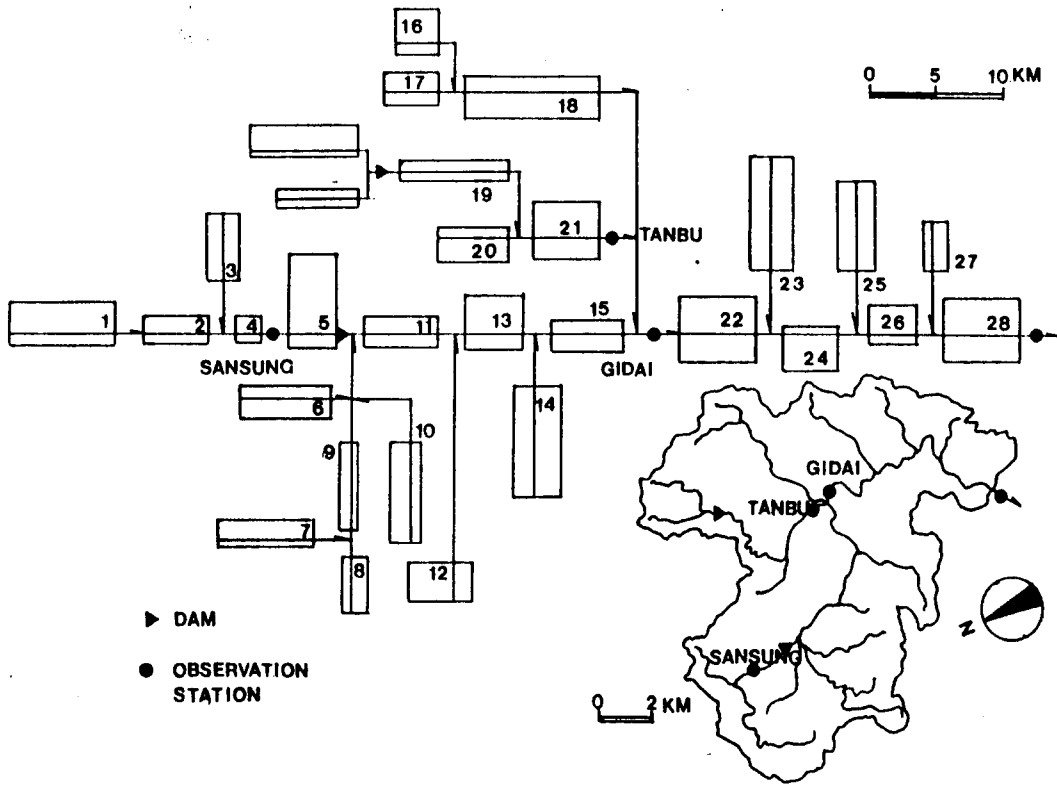


그림 1. 보청천 유역 개요 및 등가조도유역 모델

는 값을 좌우 사면의 길이(L_s)로 한다. 단, 좌우사면 면적은 하도의 최상류단을 주 1차 하천의 상류단까지 연장하고 그 지점으로 부터 유역경계선까지의 계곡을 따라 가상하도를 연장, 하도길이에 의해 좌우로 분리된 집수역으로 한다. 이때 하도 좌우측에 형성된 직사각형 사면을 등가조도사면이라 하며, 등가조도사면은 전사면이 동일 경사와 등가조도계수를 지닌다.

본 연구에서는 유역분할규모의 차이가 계산결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 4차 하도를 기준으로한 대규모 분할과 2~3차 하도를 기준으로한 중규모 분할의 2가지 분할기준을 설정하였다. 그림 1은 중규모로 분할 모델화된 보청천유역을 나타낸 것이다.

5. 개발 시스템의 현장 적용성 평가

보청천 유역 IHP보고서의 대표홍수 관측자료로부터 가능한 최근의 관측강우중 강우유출형태가 서로 상이한 2개의 홍수를 선정 개발시스템의 현장적용성 평가를 위한 대상홍수로 하였다. 보청천 하류역은 최근 들어 인공구조물의 설치와 골재의 준설 등으로 하도형상의 변화가 급격히 일어나고 있는 관계로 본 검토의 관측홍수자료는 기대 지점 상류역의 것을 대상으로 하였다.

모델 파라메타의 추정은 중규모분할(28개 단위 유역) 등가 유역모델에 관측 홍수를 대상으로 식 (8)의 E_1 , E_2 오차가 최소화되도록 반복 계산을 통하여 실시하였다. 또한 추정된 모델 파라메타에 대한 검정은 동일유역에 대해 또 다른 관측홍수를 대상으로 실시하였다. 그림 2와 그림 3은 기대지점에서의 모델 파라메타의 추정과 검정 결과이다.

유역분할 규모에 따른 모델의 재현성을 평가한 결과를 정리한 것이 그림 4이다. 그림의 횡축은 분할의 기준하천 차수 U 를, 종축의 좌는 침투자승오차 E_1 을, 우는 χ^2 오차 E_2 를 나타낸다. 분

할기준하천차수 U 가 높아질수록, 즉 유역 모델 파라메타의 집중화가 확대되면 될수록 모델 재현성의 악화가 심화됨을 알 수 있으나 보다 구체적인 영향은 각 하천차수별의 검토가 요구된다.

그림 5는 유역 등가조도계수 $Ne(m^{-1/3} \cdot sec)$ 의 변화에 따른 모델 재현성에의 영향을 평가한

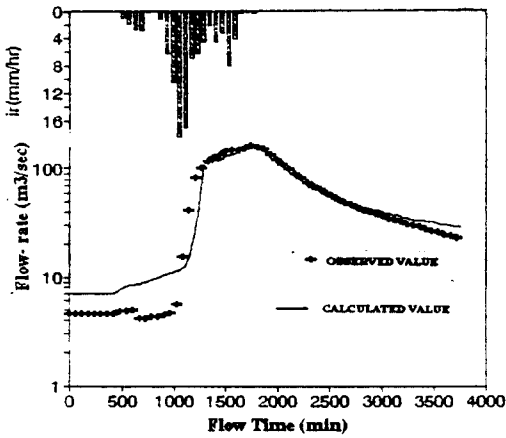


그림 2 모델 파라메타 추정결과

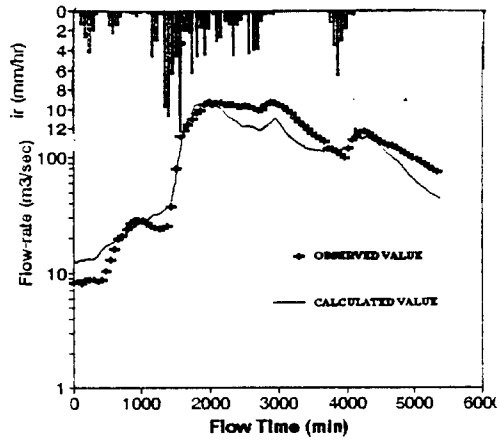


그림 3 모델 파라메타 검증결과

결과이다. 그림의 우측 종축은 모델 파라메타 추정 결과에 따른 최적 Ne 값에 의한 계산결과와의 오차량(E_1, E_2)_{opt}에 대한 각 Ne 값에 의한 계산 결과의 오차량(E_1, E_2)의 비를 나타내고, 우측 종축은 침두유량 재현비 (Q_{cp}/Q_{op})를 나타낸다. Ne 가 0.01-0.1간의 변화에 대한 발생오차량은 침두자승오차비가 7.63-3.25, χ^2 오차비가 5.74-2.4로 침두유량비가 1.67-1.37의 변화를 보였다. 반면, 최적 등가조도 주변의 Ne 가 0.6-1.0에서는 오차비가 각각 1.0-1.75, 1.0-1.53, 0.95-0.98의 대단히 적은 변화를 보였고, Ne 가 증가함에 따라 침두자승오차가 가장 민감한 변화를 다음이 χ^2 오차, 침두유량비의 순으로 반응하였다.

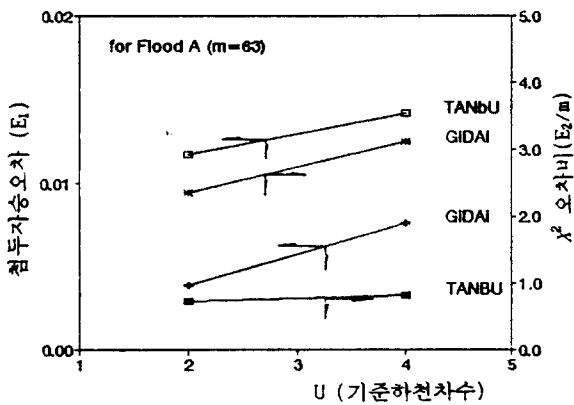


그림 4 유역분할규모에 따른 재현성 영향

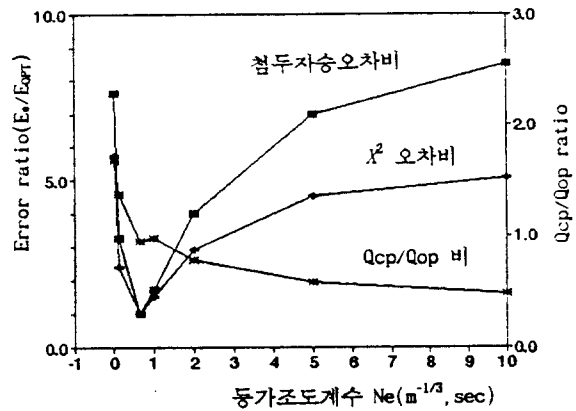


그림 5 등가조도 Ne 에 의한 계산재현성

6. 결 론

유역의 지형인자를 고려한 강우의 수리학적 단기유출해석 시스템개발을 위한 본 연구의 주된 성과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Kinematic wave이론에 근거한 강우유출과정을 특성곡선추적법에 의하여 해석하는 실용적 알고리즘의 개발과 개발 알고리즘을 도입한 강우의 비정상 유출해석 시스템(Kis)를 개발하였다.
- 2) 개발된 강우유출해석 시스템(Kis)은 등가조도 사면과 하도가 복합된 복수개의 등가유역모델로 구성된 하도망의 수리해석기능을 지닌다.
- 3) 기준 하천관측점 및 해석 대상유역의 임의 공간에서의 수리량의 시간 변동을 예측함으로써 오염부하의 발생 및 배출과정 해석에 요구되어지는 수리량의 해석수법으로 개발시스템의 적용이 가능하게 되었다.
- 4) 시스템의 재현성 및 현장 적용가능성 향상을 도모하기 위하여 검토 대상 등가유역의 확률적 수문지형특성량에 근거한 모델 파라메타 추정방법을 제안 시스템에 적용하였으며, 모델 파라메타 변화에 따른 모델 감도분석을 통하여 환경변화에 대한 시스템의 반응성능을 확인하였다.

참고 문헌

1. 하 성룡, "사면 및 하도 복합유출장의 단기 유출해석 시스템 개발", 대한토목학회 논문집, 제14권, 제4호, 1994.
2. Iwagaki, Y. and Sueishi, T., "Approximate Method for Calculation of Unsteady Flow in Open Channels with Lateral Inflow", *Proc. 4th Nat'l Cong for App. Mech.*, 1954, pp.235-240.
3. Wooding, R.A., "A Hydraulic Model for the Catchment-Stream Problem., I. Kinematic-wave theory", *J. Hydrology*, vol.3, 1965, PP. 254 - 267.
4. Wooding, R.A., "A Hydraulic Model for the Catchment-Stream Problem, II. Numerical Solutions", *J. Hydrology*, vol.3, 1965, PP. 268-282.
5. 角屋 睦, 福島 晟, "中小河川の洪水到達時間", 京都大學防災研究年報, 第19-B, 1976, pp.143-152.
6. T. Sueishi, "Runoff Estimation in Storm Sewer System Using Equivalent Roughness", *Trans. of JSCE*, No.91, 1963, pp.41-54.
7. 建設省, 二訂建設省 河川砂防技術基準(案) 調査編, 1986.
8. 角屋 睦, 永井 明博, "洪水比流量曲線へのアプローチ", 京都大學防災研究年報, 第22號B-2, 1979, pp.195-208.