

소유역의 수로기하학적특성과 사면을 고려한 유역순간단위도의 유도

Derivation of the Basin Instantaneous Unit Hydrograph Considering the Network Geometry and Hillslope of Small Basin

김재한* · 윤석영**

Kim, Jae Han* · Yoon, Seok Young**

Abstract

The basin instantaneous unit hydrograph was derived by considering the network geometry and hillslope. The network geometry is quantified in a function, termed the width function, that reflects the distribution of runoff with flow distance from the outlet. The model using the derivation of the basin IUH consists of two components: the routing component of the initial distribution through the network by means of a simplified diffusion approximation and the hillslope component by means of an exponential distribution that is the probability density function of the travel time in the hillslope.

The application of this method was tested on four observed flood data of Bocheon stream and Wi stream. The results show that the proposed method can be used for the analysis of the basin IUH.

요 지

유역순간단위도를 수로기하학적 특성과 사면을 고려하여 유도하였다. 수로기하학적 특성은 Width function으로 정량화되며, 이것은 출구로부터 임의 흐름거리의 유량 분포를 나타낸다. 유역순간단위도의 유도에 사용된 모형은 간단한 확산함수에 의해 수로에 분포된 초기유량을 추적하는 추적요소와 사면에서의 체류시간 밀도함수인 지수분포로 나타내지는 사면요소로 구성하였다.

본 방법의 적용성을 검토하기 위하여 보청천유역, 위천유역에 대해 4개사상의 실측수문량을 이용하여 유역순간단위유량도를 산정하였으며, 산정결과, 본 연구에서 제안한 방법을 이용해 유역순간단위유량도를 유도할 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

유출해석의 주된 목적중의 하나는 하천의 유출수 문곡선을 예측하는데 있으며, 예측은 강우-유출간의

상호관계를 규명한 모형으로 수행된다.

그러나, 단위도이론⁽¹⁾, 순간단위도의 개념모형^(2,3), 계분식에 의한 선형, 비선형응답모형등, 이들 모형은 과거 수문자료에 의존하여 유역응답이 산정되므로 분석은 용이한 반면, 미계측 지점의 적용에 제약이 발생하며, 유출에 관계되는 유역의 물리적인 현상을

* 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구소, 선임연구원

규명하는데는 미흡한 점이 많다.

Horton⁽⁸⁾, Shreve⁽⁹⁾, Smart⁽¹⁰⁾ 등에 의해 하천의 구조가 하천형태학적으로 분석되어지고 정량적으로 체계화 되어짐에 따라, 유역의 수문 응답과 지형학적 법칙을 직접 결합시킨 지형학적 순간단위도가 Rodriguez-Iturbe 등⁽¹¹⁾에 의해 최초로 유도되었으며, 이후 Gupta⁽¹²⁾, Cheng⁽¹³⁾, 이⁽¹⁵⁾, 조⁽¹⁶⁾, 이⁽¹⁷⁾, 김⁽¹⁸⁾ 등과 같은 학자들에 의해 다수 연구되었으나, 이 이론은 물입자의 이동경로를 따라 정해지는 차수별 이동시간에 대한 확률밀도함수에 대해 논란의 여지가 있는 실정이다.

그러나, 위에서 제시한 모형들은 유출을 유발시키는 사면과 물입자들을 이동시키는 수로망의 역할에 대해서 구체적인 설명을 못하고 있는 실정이다.

Harley⁽⁶⁾는 연속방정식과 운동방정식을 선형화시킨 식에 순간단위도(IUH)이론과 동일한 초기조건을 적용하여, 하천의 길이를 따라 균등하게 입력되는 물입자에 대한 충격수로 응답이라고 할 수 있는 선형해를 구함으로써 선형계로 수로를 분석할 수 있도록 하였다. Dooge⁽⁷⁾는 Harley에 의해 유도된 응답을 선형수로 응답(Linear channel response, LCR)이라 하였으며, 선형수로 응답을 1, 2, 3변수의 9개의 모형으로 분류하여 제시한바 있다.

Mifflin⁽²¹⁾은 수로망의 역할을 규명하기 위해 수로에서의 지체효과와 출구까지의 최소이동시간으로 분리한 후, 사면과 수로를 조합하여 계산한 다음, 실측유량과 비교함으로써 각각의 역할에 대해 상대적 중요성을 논해 주었다.

Kirkby⁽¹⁹⁾, Troutman 등⁽²⁶⁾은 Width function에 대한 확률모형을 해석적으로 유도하여 순간단위도에 적용시킨바 있다. Mesa 등⁽²²⁾은 수로망의 지형학적 인자가 수문 응답과 유출 과정에 미치는 영향을 Width function으로서 나타냈으며, 이를 이용하여 유역 응답을 유도함으로써, 수로 응답과 사면 응답이 유역 응답에 상대적으로 중요한 역할을 한다는 것을 입증하였다.

이와 같이, 수로에서의 이동 및 지체효과를 고려해 줄 수 있는 선형모형과 유량분포를 나타낼 수 있는 함수 및 사면에서의 응답을 고려해줌으로서 유역 응답을 유도할 수 있는 가능성을 제시해 주고 있다. 이와 같은 문제는 유출을 유발시키는 사면과 유량을

이동시키는 수로에 대한 물리적인 특성을 규명할 때 해결이 가능하다.

본 연구는 수로와 사면이 상호 독립적이라는 가정하에, 유역의 수로기하학적특성과 수리학적 인자로 매개변수를 산정할 수 있는 수로망 응답과 사면에서의 지체시간을 이용하여 유도한 사면 응답을 동시에 적용시켜 유역의 순간단위도를 유도하였다.

2. 모형의 구성

개념모형에 의한 강우-유출분석은 유역을 가상적인 선형저수지, 선형수로 또는 이들 두 성분을 조합시킨 방법 등으로 크게 분류할 수 있다. 본 연구에서는 선형수로와 선형저수지개념을 조합시킨 방법을 택하였다.

이와 같은 모형을 도식화하면 그림 1과 같다.

유역의 Magnitude는 각 링크(Link)에서 유량과 수로의 기하학적 크기간의 관계를 나타내는데 유리한 Shreve의 방법을 적용하였다. 지류를 갖지 않는

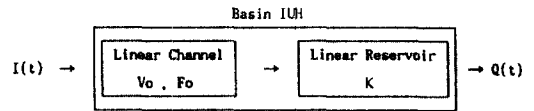


그림 1. 모형의 개념도

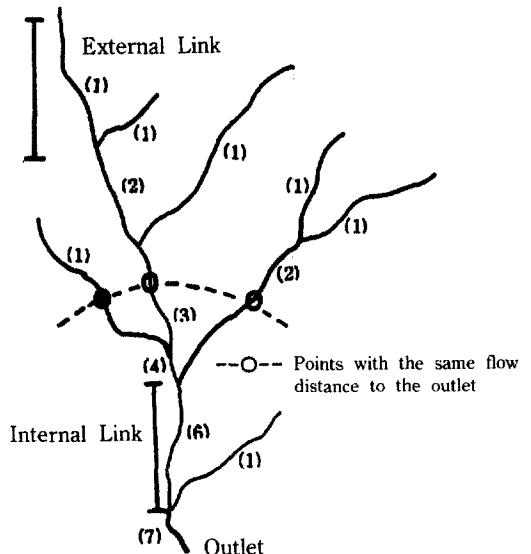


그림 2. 수로망의 구조 및 Magnitude

1차 하천에 Magnitude를 모두 1로 할당하고, Magnitude가 각각 μ_1, μ_2 인 두 하천이 만나면 Magnitude가 $(\mu_1 + \mu_2)$ 인 수로가 구성된다. 따라서 Magnitude가 μ 인 하천은 μ 개의 1차하천을 가지며, $(2\mu-1)$ 개의 Link, μ 개의 Exterior Link와 $(\mu-1)$ 의 Interior Link를 가진다. 이를 계통도로 나타내면 그림 2와 같다.

3. 수로망응답함수의 유도

수로망응답의 유도는 수로망의 체류시간과 유량의 초기분포를 적절히 설정함으로써 가능하다. 수로망응답함수(Network response function, $f_n(t)$)는 수로망의 임의 지점에서 출구까지 물을 이동시키는 선형수로응답함수와 수로망의 기하학적 특성과 수리학적 인자로 구성된다.

3.1 선형수로응답함수

선형수로응답함수는 물리적으로 수로망에서의 물의 이동과 감쇄(Translation and Attenuation)를 만족시키는 간단한 모형으로, 유역 출구에서 임의의 거리만큼 떨어진 지점에 부작위적으로 순간 주입된 물입자의 체류시간(Holding time)의 확률밀도함수라 할 수 있다.

선형수로응답함수를 유도하기 위해 실제적으로 수로추적에 가장 많이 사용되는 확산식을 적용하였다. 확산식은 선형화된 St.Venant식을 거리에 관한 2계 미분식으로 나타냄으로써 유도되며 식 (1)과 같다.

$$(gY_0 - V_0^2) \frac{\partial^2 \delta Q}{\partial X^2} = 3gS_0 \frac{\partial \delta Q}{\partial X} + \frac{2gS_0}{V_0} \frac{\partial \delta Q}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)을 간단히 하기위해 양변을 $2gS_0/V_0$ 로 나누후, 각 계수를 D와 a로, δQ 를 h로 치환하면 식 (2)와 같이 된다.

$$\frac{1}{2}D \frac{\partial^2 h}{\partial X^2} = \frac{\partial h}{\partial t} + a \frac{\partial h}{\partial X} \quad (2)$$

$$a = 1.5V_0 \quad (3)$$

$$D = \frac{V_0^3}{gS_0 F_0^2} (1 - F_0^2) \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gY_0}} \quad (5)$$

여기서, a는 홍수파의 이동에 관련되는 계수이며 D은 홍수파의 감쇄를 나타내는 확산계수이다. F_0 는 정상상태의 Froude수, V_0 는 정상상태의 유속(m/s), Y_0 는 정상상태의 수심(m), S_0 는 수로경사, g는 중력가속도(m/s^2)이다.

식 (2)는 식 (6)의 초기조건을 이용하여 Laplace 변환을 시켜 풀게되며, 해는 식 (7)과 같다.

$$h(X, 0) = 0 \quad \text{for } X > 0 \quad (6)$$

$$h(0, t) = \delta(t) \quad \text{for } t \geq 0$$

$$h(X, t) = \frac{X}{\sqrt{2\pi Dt^3}} \text{EXP}\left\{-\frac{(X-at)^2}{2Dt}\right\} \quad (7)$$

여기서, X는 유역출구에서 임의 상류지점까지의 거리(m), t는 시간(h), a는 유속(m/s), D은 확산계수로 모두 양(+)의 값을 가지며, 식 (3),(4),(5)에 의해 계산된다.

3.2 유량분포함수

유량분포함수는 유역의 출구에서 임의의 거리(X)만큼 떨어진 지점에서 유발하는 유출량의 분포를 나타내는 확률밀도함수이며, 유역의 수로망으로 유도된다.

유량분포함수의 유도를 위해서는 Kirkby⁽¹⁹⁾에 의해 제시된 Width function의 도입이 필요하다. Width function은 계산될 수문곡선의 형상과 침투유량의 결정에 중요한 영향을 주는 함수로 유역출구로부터 임의의 흐름거리까지의 유량의 분포를 나타내며, 유역출구로부터 임의의 거리(X)만큼 떨어진 곳에 있는 링크(Link)의 수로 계량된다.

Width function은 거리(X)를 정의하는 방법에 따라 몇가지로 나타낼 수 있는데, 유역출구에서 실제 하천길이 X인 지점에서의 링크의 수로 구성되는 함수를 적용하였다.

M을 유역의 Magnitude, α_k, β_k 를 각각 k번째 링크의 상류와 하류끝에서 출구까지의 흐름거리라 하면, $\alpha < \beta$ 인 임의의 두거리 α, β 에 대해 $\mu(X; \alpha, \beta)$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu(X; \alpha, \beta) = 1 \quad \text{if } X \in [\alpha, \beta]$$

$$= 0 \quad \text{otherwise} \quad (8)$$

식 (8)은 각 링크에 1단위가 할당되는 것을 뜻하며, 식 (9)는 출구에서 거리(X)에 위치한 지점의 링크의 수를 나타낸다.

$$N(X) = \sum_{k=1}^{2M-1} \mu(X; \alpha_k, \beta_k) \quad (9)$$

유량분포함수, W(X)는 식 (9)를 수로의 총길이(L_T)로 나누어 줌으로서 식 (10)과 같이 유도된다. 식 (10)은 거리(X)에서 발생할 초기유량의 확률밀도함수이며, 출구에서 거리(X)에 위치한 지점의 링크의 수만큼 합산시킴으로서 그 지점에 할당되는 비율이 계산된다.

$$W(X) = \frac{1}{L_T} N(X) \quad (10)$$

그러나, 그림 2에서 보는 바와 같이 출구점에 가까울수록 Magnitude는 커지며, 반대로 본류 및 지류의 상류로 갈수록 Magnitude는 적어짐을 알 수 있다. 이는 동일한 기능을 가진 수로라 할지라도 Magnitude가 큰 하류쪽 수로가 Magnitude가 작은 상류쪽보다는 상대적으로 유량의 이동에 주된 기능을 한다고 볼 수 있으므로, 식 (11)과 같이 각 링크에 부여된 Magnitude를 가중치로 하는 가중된 유량분포함수의 유도가 가능하다.

$$W^*(X) = \frac{1}{F} \frac{1}{L_T} \sum_{k=1}^{2M-1} \frac{1}{M_k} \mu(X; \alpha_k, \beta_k) \quad (11)$$

여기서, F는 W*의 면적이 1이 되도록 하는 값이며, M_k는 k번째 링크의 Magnitude이다.

3.3 수로망응답

수로망응답(Network Response)을 구하기 위해서는 선형수로응답함수(h(X, t))와 유량분포함수(W*(X))를 하나의 식으로 나타내는 것이 필요하다. 이를 위해 두 함수를 곱한다음, 거리에 대해 적분하면, 수로망응답함수(f_n(t))가 식 (12)와 같이 구해진다.

$$f_n(t) = \int_0^{\infty} h(X, t) W^*(X) dX \quad (12)$$

식 (12)는 X에 대해 적분이 불가능하다. 따라서 X가 X₁, X₂, ..., X_k와 같이 임의로 선정되고, W_k*(X)

≥ 0, ΣW_k*(X)=1이라면, 수로망응답함수는 이산형확률분포인 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.⁽²³⁾

$$f_n(t) = \sum_k h(X, t) W_k^*(X) \quad (13)$$

식 (13)은 선형수로응답함수, h(X, t)의 매개변수인 유속, Froude수는 하천의 흐름현상 등을 고려해 임의의 값을 선정한 후, W_k*(X)와 함께 시행착오법으로 계산되며, 선형응답함수는 단위도의 제약조건인 곡선하의 면적이 1에 가장 근사한 값을 최종 선정한다.

4. 사면응답함수의 유도

유역의 토양종류, 피복상태, 선행강우, 경사 및 강우강도 및 지속기간 등 많은 조건에 따라 다르게 나타나는 사면에서의 유출은 서로 다른 물리적인 구조로 구성된 지표류(overland flow), 중간류(sub-surface flow), 포화지표류(saturation overland flow), 환원수(return flow) 등에 의해서 생성된다.

사면에서 유출을 유발시키는 주된 흐름인 이들 흐름은 출구까지 도달하는데 여러형태의 저류효과에 영향을 받으면서 수로에 도달한다. 이와같은 흐름은 실제 정량적으로 구별할 수 없을 뿐만아니라, 물리적 구조가 다르기 때문에 서로 다른 유속을 갖는다. 이와 같은 이유로 사면에 대한 응답함수를 간단히 모형화한다는 것은 사실상 불가능하다.

본 연구에서는 사면을 하나의 가상 저수지로 가정한 선형저수지 이론을 이용하여 사면에서의 응답함수를 유도하였다.

4.1 사면의 체류시간 밀도함수

단위량의 강우가 시간, t=0에 유역의 사면에 공급된후, 더이상 공급되지 않는 상태에서 물입자가 단위시간당 1/λ(λ: 물입자의 평균체류시간)의 비율로 포아슨과정을 따르면서 이동한다면, 이것은 유입은 없고 유출만 있는 기본적인 Queue system과 같다. 따라서, 사면에서 물입자의 이동시간, t의 확률밀도함수는 평균이 λ이고 분산이 λ²인 지수분포로 간주할 수 있다.⁽¹³⁾

선형저수지 모형은 유역을 하나의 저수지로 가상하여 유출량을 추정하는 방법으로 저유량은 유출량

에 직접 비례한다고 가정하면, 순간 발생한 단위량의 입력에 대해 선형 저수지의 응답함수($f_h(t)$)는 식 (14)와 같다.

$$f_h(t) = \frac{1}{K} \cdot e^{-t/K} \quad (14)$$

여기서, K 는 물입자의 평균체류시간이며, 식 (14)는 통계적으로 사면에서의 출발시간이 t 인 분포함수로 간주할 수 있다. $f_h(t)$ 는 시간 t 에서 확률밀도를 나타내는 것으로, 전체 물입자에 대해 시간 t 에서 출발한 물입자의 비와 같다.

그러므로, 식 (14)는 λ 와 물리적 특성이 같은 K 를 매개변수로 하는 지수분포이며, 한개의 선형저수지에서의 체류시간 역시, 지수함수적인 분포를 갖는 것을 의미한다. 따라서 식 (14)는 사면에서 수로까지 이동하는 물입자의 확률밀도함수, 즉 사면에서의 순간단위도라 할 수 있다.

Dooge⁽⁵⁾는 수문응답모형을 지표지역과 수로로 분리하여, 지표지역에서의 지체시간을 지수분포로, 수로에서의 지체시간을 저류와 이동으로 나누어 각각 지수분포와 균등분포로 분리해 유도했으며, Mesa 등⁽²²⁾은 사면에서 기인된 체류시간을 기저시간으로 하는 삼각형의 순간단위도를 유도하여 사면응답을 유도한바 있다.

4.2 평균체류시간 K_h 의 결정

식 (14)를 간단히 하기 위해 $1/K$ 를 K_h 로 대치하면 식 (15)와 같이된다.

$$f_h(t) = K_h \cdot \exp(-K_h \cdot t) \quad (15)$$

여기서, K_h 는 매개변수(h_r^{-1})이며, 식 (15)는 수로망 응답과 유효우량의 회선적분으로 산출된 수로망유출수문곡선과 관측수문곡선의 1차모멘트의 차를 이용해 산정된다. 즉 수로망유출수문곡선과 관측수문곡선의 1차모멘트의 차는 사면에서 기인된 체류시간($T(h_r)$)이라 할 수 있으며, 이때 사면에서의 평균유속($V(m/h)$)은 식 (16)과 같이 산정된다. Mesa 등⁽²²⁾에 의하면 사면에서의 유속은 0.3~100m/h의 범위에 있는 것으로 제시하고 있다.

$$V = \frac{L}{T} \quad (16)$$

식 (15)의 매개변수를 계산하기 위해, Horton이 제안한 식 (17)를 이용하여 유역의 평균사면길이를 산정하였다.

$$L = \frac{1}{2D_d} \quad (17)$$

여기서, D_d 는 배수밀도(drainage density)이며, 식 (18)과 같다.

$$D_d = \frac{\Sigma L_s}{A} \quad (18)$$

여기서, ΣL_s 는 유역의 총 하천길이(m)이며, A 는 유역의 총면적(m^2)이다. 따라서, 식 (15)의 K_h 는 식 (19)와 같이 유도되어 진다.

$$K_h = \frac{V}{L} = 2 \cdot D_d \cdot V \quad (h_r^{-1}) \quad (19)$$

5. 유역응답함수의 산정

유역응답함수(Basin IUH, $f_b(t)$)는 수로응답함수, $f_h(t)$ 과 사면응답함수, $f_s(t)$ 를 식 (20)과 같이 회선적분시킴으로써 유도되며, 유도된 유역응답함수는 단위도의 제약조건인 곡선하의 면적이 1이 되어야 한다. 식 (20)은 서로 독립적인 관계를 갖는 무한히 많은 물입자가 사면과 수로에서 지체되는 시간의 확률밀도함수의 합으로 나타낼 수 있음을 의미한다.

$$f_b(t) = \int_0^t f_h(t-z) f_s(z) dz \quad (20)$$

6. 유출수문곡선의 산정

유역의 유출수문곡선은 각 유역에서 산정된 순간 단위도와 유효우량을 식 (21)을 이용하여 회선적분시킴으로서 산정된다.

$$Q(t) = \int_0^t f_b(t-\tau) i(\tau) dt \quad (21)$$

여기서, $Q(t)$ 는 직접유출량, $f_b(t)$ 는 유역 순간단위도, $i(t)$ 는 유효우량이다.

7. 적용 및 비교검토

7.1 강우-유출 및 지형자료

유역응답함수의 적용성을 검토하기 위하여, 국제 수문개발 대표시험유역인 위천 유역의 동곡지점과 보청천 유역의 이평지점을 대상유역으로 선정하였다. 강우-유출자료는 표 1과 같이 수자원관리기법 개발조사보고서⁽³⁰⁾에 수록되어 있는 1시간 간격의 관측자료를 이용하였으며, 그림 3과 같이 동곡지점의 수로망과 Magnitude를 도시하였다.

계산의 간편성을 위해 직접유출량은 수평직선분리법, 유효우량은 Φ -index법을 적용하여 표 2와 같이 산정하였으며, 유역순간단위도와와의 차원을 고려하여 유효우량을 적용하였다. 지형인자는 1/50,000 지형도를 이용해 구하였으며, 수로경사는 하천출구에서 각 링크의 상류끝단의 표고차를 하천길이에 나눈후, 전체를 평균하여 산정하였다.

그중 동곡지점의 유량분포는 그림 3과 같이 구성된 수로망과 식 (10), 식 (11)를 이용하여 그림 4와 같이 구성하였다.

7.2 수로응답

(1) V_0 , F_0 및 유량분포함수의 결정

동곡지점의 수로망응답을 결정하기 위해 유량분

포를 식 (10)과 식 (11)를 이용해 각각 산정한 후, 100, 150, 200, 400, 800mm씩 분할하여 읽은 값과 임의 V_0 와 F_0 를 적용하여 시행착오법으로 산정했으며, 산정 결과는 표 3, 4과 같다.

수로망응답의 제약조건은 표 3의 경우 0.398~2.649, 표 4의 경우 0.753~1.518의 범위를 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 유속, Froude수 및 분할거리와 수로망응답함수와 복합적으로 발생하는 부조화 그리고 이산형형태로 입력된 유량분포의 계산오차 때문에 발생하는 현상이라 추정된다. 이와 같은 현상은 표 3, 4에서 보는바와 같이 적용범위의 결정에 대한 문제를 제기시키게 되며, 밀줄이 그어진 곳은 단위도의 제약조건을 벗어나는 값으로 수로망응답의 일반해를 구하는데 제외된다. 따라서 수로망응답함수의 적용범위는 표 3, 4로부터 수로망응답의 제약조건을 모두 충족시키는 유속, Froude수 및 분할거리의 상한치를 찾음으로서 결정된다. 표 3의 경우, 분할거리 400m, 유속 0.25m/s, Froude수 0.1내의 범위에서, 표 4의 경우, 분할거리 400m, 유속 0.35 m/s, Froude수 0.1내의 범위에서 단위도의 제약조건을 충족시킬 수 있다. 이처럼 유량분포의 산정방법에 따라 수로망응답함수의 적용범위가 크게 달라짐을 알 수 있었으며, 결국 유량분포함수를 적용할때 Magnitude를 이용하여 가중시켜 산정하는

표 1. 대상유역의 수문자료 및 지형자료

유역명	사 상	관측기간 (연·월·일)	유역면적 (km ²)	총수로길이 (km)	수 로 경 사	사면길이 (m)
동곡교	(1)	87.7.14-7.18	33.8	37.3	0.031	452
	(2)	89.8.21-8.24				
이평교	(1)	84.6.16-6.22	76.0	100.2	0.011	379
	(2)	87.8.20-8.23				

표 2. 대상유역의 유효우량

유역명	사 상	유효우량 (mm/hr)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
동곡교	(1)	4.9	4.7	1.70	10.7	5.7	8.9				
	(2)	15.2	13.1	4.5	0.8	0.	1.2	0.9	0.	4.2	1.4
이평교	(1)	6.									
	(2)	9.86	7.12	9.45	2.07	1.05	0.2	2.15	1.65	2.08	0.31

표 3. 식 (10)의 유량분포와 수로망응답의 제약조건과의 관계(동곡유역)

유속	Fro No.	분할거리 (m)				
		100	150	200	400	800
Vo	Fo	100	150	200	400	800
	0.20	1.000	1.090	0.998	1.003	<u>1.146</u>
	0.15	1.019	1.056	1.008	1.004	<u>1.284</u>
	0.20	1.030	1.037	1.008	1.010	<u>1.390</u>
0.22	0.10	0.933	0.934	0.941	0.967	<u>0.822</u>
	0.15	<u>0.897</u>	<u>0.897</u>	0.912	1.069	0.906
	0.20	<u>0.875</u>	<u>0.881</u>	0.914	1.270	1.060
0.25	0.10	0.961	1.054	0.952	0.958	0.956
	0.15	0.969	0.989	0.950	0.943	<u>0.871</u>
	0.20	0.954	0.959	0.943	0.926	<u>0.773</u>
0.27	0.10	0.922	1.190	0.919	0.938	<u>0.890</u>
	0.15	<u>0.882</u>	<u>1.253</u>	<u>0.876</u>	<u>0.888</u>	<u>0.668</u>
	0.20	<u>0.860</u>	<u>1.295</u>	<u>0.849</u>	<u>0.833</u>	<u>0.509</u>
	0.25	<u>0.848</u>	<u>1.305</u>	<u>0.825</u>	<u>0.764</u>	<u>0.398</u>
0.30	0.10	1.018	1.163	1.026	1.021	1.220
	0.15	1.045	<u>1.157</u>	1.053	1.081	<u>1.693</u>
	0.20	1.061	<u>1.109</u>	1.067	<u>1.193</u>	<u>2.194</u>
	0.25	1.070	1.070	1.080	<u>1.349</u>	<u>2.649</u>
0.35	0.10	1.012	1.018	1.018	1.016	0.905
	0.15	1.031	1.025	1.038	1.033	0.904
	0.20	1.054	1.045	1.057	1.033	0.975
	0.25	1.073	1.063	1.063	1.002	1.041
	0.30	1.087	1.073	1.051	0.967	<u>1.105</u>
0.40	0.10	1.035	1.043	1.035	1.034	1.064
	0.15	1.079	1.088	1.075	1.081	<u>1.139</u>
	0.20	<u>1.108</u>	<u>1.120</u>	<u>1.103</u>	1.092	1.211
	0.25	<u>1.129</u>	<u>1.144</u>	<u>1.120</u>	1.091	<u>1.315</u>
	0.30	<u>1.144</u>	<u>1.161</u>	<u>1.132</u>	<u>1.105</u>	<u>1.449</u>
	0.35	<u>1.155</u>	<u>1.174</u>	<u>1.141</u>	<u>1.136</u>	1.593

Fro No.: Froude수

표 4. 식 (11)의 유량분포와 수로망응답의 제약조건과의 관계(동곡유역)

유속	Fro No.	분할거리 (m)				
		100	150	200	400	800
Vo	Fo	100	150	200	400	800
	0.20	1.010	1.020	1.017	1.033	0.996
	0.15	1.037	1.050	1.041	1.068	0.949
	0.20	1.055	1.060	1.052	<u>1.102</u>	0.926
0.22	0.10	0.921	0.918	0.928	0.937	1.089
	0.15	<u>0.864</u>	<u>0.860</u>	<u>0.870</u>	0.982	<u>1.248</u>
	0.20	<u>0.828</u>	<u>0.826</u>	<u>0.843</u>	<u>1.134</u>	<u>1.460</u>
0.25	0.10	0.994	0.983	0.972	0.987	0.978
	0.15	1.002	0.983	0.967	0.988	<u>0.858</u>
	0.20	0.998	0.968	0.955	0.982	<u>0.756</u>
0.27	0.10	0.929	0.924	0.925	0.936	1.082
	0.15	<u>0.869</u>	<u>0.867</u>	<u>0.868</u>	<u>0.885</u>	<u>1.131</u>
	0.20	<u>0.833</u>	<u>0.835</u>	<u>0.833</u>	<u>0.830</u>	<u>1.196</u>
	0.25	<u>0.815</u>	<u>0.817</u>	<u>0.806</u>	<u>0.753</u>	<u>1.240</u>
0.30	0.10	1.057	1.029	1.064	1.052	0.960
	0.15	1.097	1.053	<u>1.107</u>	<u>1.109</u>	<u>1.187</u>
	0.20	<u>1.115</u>	1.065	<u>1.125</u>	<u>1.203</u>	<u>1.518</u>
	0.25	<u>1.124</u>	1.067	<u>1.134</u>	<u>1.337</u>	<u>1.820</u>
0.35	0.10	1.010	1.012	1.018	1.018	1.060
	0.15	1.017	1.021	1.029	1.029	1.029
	0.20	1.039	1.049	1.052	1.037	1.072
	0.25	1.059	1.076	1.046	1.023	1.035
	0.30	1.073	1.096	1.062	1.012	1.032
0.40	0.10	<u>1.106</u>	<u>1.119</u>	<u>1.105</u>	1.088	0.918
	0.15	<u>1.179</u>	<u>1.209</u>	<u>1.182</u>	<u>1.168</u>	0.826
	0.20	<u>1.225</u>	<u>1.267</u>	<u>1.235</u>	<u>1.211</u>	<u>0.820</u>
	0.25	<u>1.255</u>	<u>1.308</u>	<u>1.268</u>	<u>1.239</u>	<u>0.888</u>
	0.30	<u>1.276</u>	<u>1.338</u>	<u>1.289</u>	<u>1.279</u>	0.985
	0.35	<u>1.293</u>	<u>1.361</u>	<u>1.303</u>	<u>1.334</u>	1.088

Fro No.: Froude수

것이 바람직한 것으로 나타났다. Mifflin^(21,22) 역시 Magnitude를 이용하여 유량분포를 가중시킴으로서 관측치의 재현성을 향상시킨 바가 있다.

이평지점의 경우, 동곡과 같은 방법으로 가중된 유량분포함수만을 이용하여 적용범위를 선정할 결

과, 분할거리 400m, 유속 1.0m/s, Froude수 0.15내의 범위에서 단위도의 제약조건을 모두 충족시킴을 알 수 있었다. 동곡지점에 비해 유역면적이 넓은 이평지점이 유속과 Froude수의 적용범위가 증가되었으며, 유속이 0.63m/s이상부터는 Froude수가 0.2~0.3

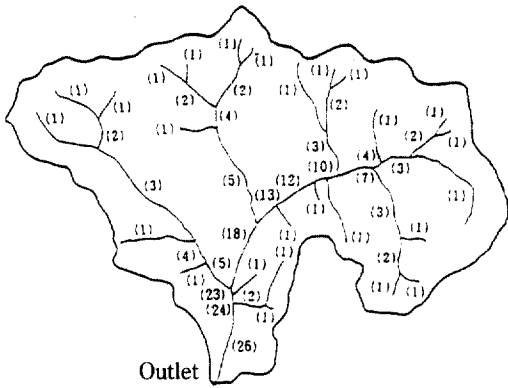


그림 3. 동곡교유역의 수로망 및 Magnitude

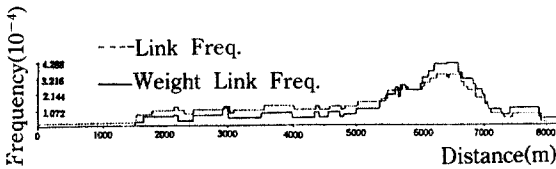


그림 4. 동곡교유역의 유량분포도

까지 적용범위가 증가되는 것을 알 수 있었다.

두 유역의 비교를 통해, 유량분포합수가 가중되고 유역면적이 넓을수록 수로망응답함수의 적용범위가 커지며, 유속이 증가할수록 Froude수도 함께 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

분할거리는 표 3, 4에서와 같이 수로망응답의 적용성을 향상시키기 위해 짧게 할수록 바람직하나 작업량이 많아지는 어려움이 있으므로, 적어도 유량분포의 형상이 반영될 수 있도록 유역의 규모 등을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다. 동곡의 경우 100~150m, 이평의 경우 150~200m가 적당한 것으로 판단된다.

(2) 평균수로경사

유역의 평균수로경사는 산정방법에 따라 다른 값을 가지는 매개변수로 유역응답에 어느정도 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 산정된 값이 비정상적인 이상수치가 아니면 수로망응답에 주는 영향은 유속과 같이 민감하게 반영되지는 않는 것으로 밝혀진바 있다.^(20,28) 따라서, 여기서도 수로경사는 동일한 방법으로 산정된 값을 일관되게 적용시켰다.

(3) 수로망응답의 산정

동곡과 이평지점의 유역순간 단위도유도에 적용될 호우사상별 매개변수와 수로망응답은 표 5, 그림 5와

표 5. 적용된 수로망응답의 매개변수 및 제약조건

유역명	사상	유 속 (m/s)	Froude 수	분할거리 (m)	제약 조건
동곡교	(1)	0.3	0.1	100	0.992
	(2)	0.35	0.1	100	1.034
이평교	(1)	0.58	0.1	150	0.975
	(2)	0.92	0.15	150	0.992

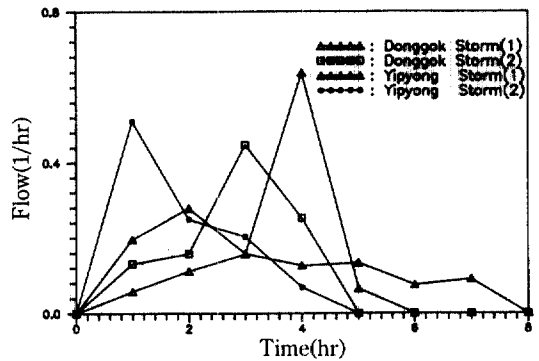


그림 5. 동곡교 및 이평교유역의 수로망응답

같다.

수로망응답함수의 유속과 Froude수는 예상한대로 표 5에 나타난바와 같이 강우-유출사상에 따라 각각 다른 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 유역의 각종 특성인자나 기상인자들에 의해서 기인된다고 판단된다. 이들 유역대표치 획득에 대한 연구는 추후 연구과제라 하겠다.

그림 5에서 보는 바와 같이 유속과 Froude수에 의해 수로망응답의 기저시간이 큰 폭으로 변하는 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 현상은 계산수문 곡선의 첨두유량은 물론, 특히 첨두유량 발생시간을 결정하는데 중요한 역할을 한다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 적용된 선형수로망응답함수가 유역의 물리적인 성질과 잘 부합되는 것이라 판단된다.

7.3 사면응답

사면응답함수의 K_h 는 사면의 유속에 의해 제약을 받는 매개변수로, 유역별 사면에서의 유속은 동곡이 97.3m/h, 94.7m/h 이평이 46.9m/h, 19.2m/h로 산정되었으며, 대상유역 모두 Mesa가 제시한 조건이

표 6. 유역별 사면응답함수

유역명	사상	사면응답함수(h ⁻¹)	사면유속
동곡교	(1)	$f_h(t) = 0.2150 \exp(-0.2150t)$	97.3m/h
	(2)	$f_h(t) = 0.2079 \exp(-0.2079t)$	94.1m/h
이평교	(1)	$f_h(t) = 0.1236 \exp(-0.1236t)$	46.9m/h
	(2)	$f_h(t) = 0.0506 \exp(-0.0506t)$	19.2m/h

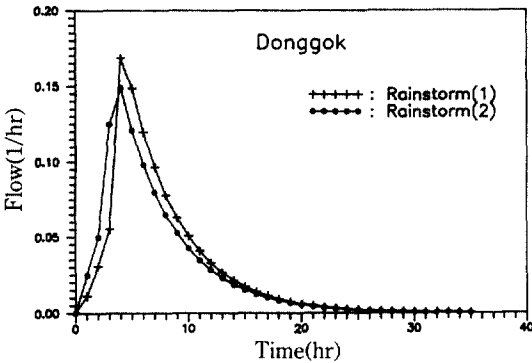


그림 6. 동곡교유역의 유역순간단위도

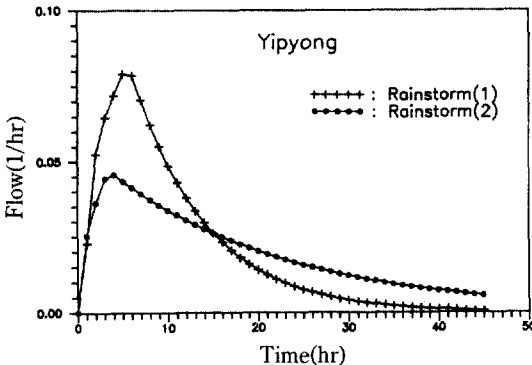


그림 7. 이평교유역의 유역순간단위도

내인 19.2~97.3m/h의 범위내에 있었다. 이들의 결과로부터 각 유역별로 획득된 사면응답함수는 표 6과 같다. 사면응답은 계산수문곡선과 관측수문곡선과 비교해 볼때, 사면에서의 물입자의 체류시간에 대한 확률밀도함수로 지수분포가 적용성이 높음을 확인할 수 있다.

7.4 적용성 검토

유역응답의 적용성은 계산 및 관측수문곡선과의 비교를 통해 검토하였다. 호우사상별 유역응답의

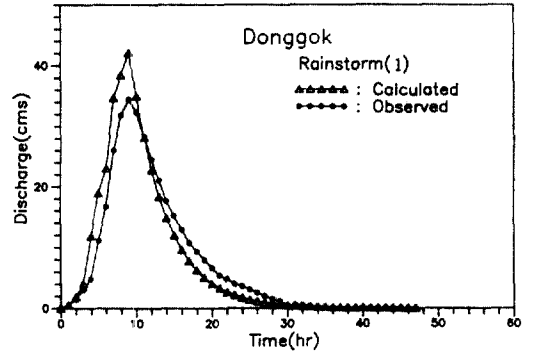


그림 8. 동곡교유역의 계산 및 관측수문곡선

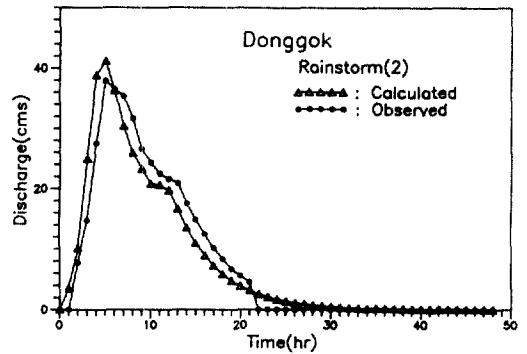


그림 9. 동곡교유역의 계산 및 관측수문곡선

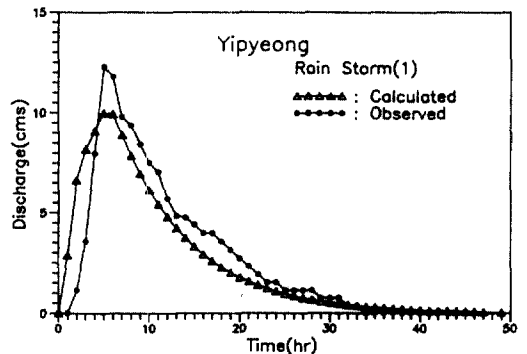


그림 10. 이평교유역의 계산 및 관측수문곡선

산정결과는 그림 6, 7과 같다.

유역별 산정된 유출수문곡선의 결과는 그림 8, 9, 10, 11과 같다.

계산침투유량은 관측유량보다 동곡교관측소의 경우, (1)번사상이 7.6m³/s크게, (2)번사상이 3.3m³/s 적게 산정되었고, 이평교관측소의 경우, (1)번사상이

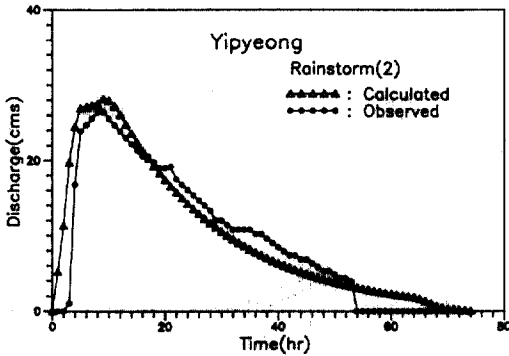


그림 11. 이평교유역의 계산 및 관측수문곡선

1.7m³/s, (2)번사상이 2.3m³/s 적게 산정되어 각 호우사상에서 대략 6.4~22%의 오차가 발생되었으며, 첨두유량 발생시간은 오차가 발생되지 않았다.

이와 같은 결과로부터 본 연구방법은 수문곡선의 추정에 크게 기여되리라 판단되며, 그 적용성이 높음을 확인할 수 있었다.

8. 결 론

본 연구에서 시도된 유역의 순간단위도 모형의 타당성을 검증하기 위하여 낙동강지류인 위천상류부의 동곡지점과 금강지류의 보청천 상류부인 이평지점의 유량관측치와 산정치를 비교해 본결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 관측수문곡선과 계산수문곡선을 비교한 결과 상당히 근접하게 나타났으며, 유역응답함수의 유도에 적용된 선형수로응답함수와 사면에서의 물입자의 체류시간 밀도함수인 지수분포함수의 적용성이 높음을 확인할 수 있었다.

2) 유역의 유출은 지형적 인자와 수리학적 인자와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었고, 특히 수로와 사면에서의 유속을 산정할 수 있었다.

3) 첨두치의 도달시간과 그 양은 각각 수로망응답함수와 사면응답함수에 지대한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

4) 유량분포함수가 가중되고 유역면적이 넓을수록 수로망응답함수의 적용범위가 커지며, 유속이 증가할수록 Froude수의 적용범위도 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

5) 유량분포함수의 분할거리는 유량분포의 형상을 반영시킬 수 있는 정도의 분할거리를 선정하여 적용할 것을 제시한다.

6) 향후, 미계측유역의 단위도를 쉽게 유도할 수 있도록 각종 매개변수를 산정할 수 있는 방법이 일반화되어야 하겠으며, 사면과 수로에 대한 물리적인 제 현상이 심층적으로 연구되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Sherman, L. K., "Stream Flow from Rainfall by The Unit-graph Method.", *Eng. News-rec.*, Vol. 108, 1980, pp. 279-287.
2. Zoch, R. T., "On The Relation between Rainfall and Streamflow", *Monthly Weather Review*, Vol. 62, 1934, pp. 315-322; Vol. 64, 1936, pp. 105-121; and Vol. 65, 1937, pp. 135-147.
3. Clark, C. O., "Storage and The Unit Hydrograph.", *Transactions, ASCE*, Vol. 110, 1945, pp. 1419-1446.
4. Nash, J. E., "The Form of The Instantaneous Unit Hydrograph.", *International Assoc. Sci. Hydrology, Pub.*, Vol. 3, 1957, pp. 114-121.
5. Dooge, J. C. I., "General Theory of The Unit Hydrograph." *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, 1959, pp. 241-256.
6. Dooge, J. C. I., and Harley, B. M. "Linear Routing in Uniform Open Channels" *Internatl. Hydrol. Symposium., Compt 1. Rent. Fort Collins, Colo.*, Vol. 1, 1967, pp. 57-63.
7. Dooge, J. C. I., "Linear Theory of Hydrologic Systems.", Tech. Bul. 1468, U. S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1973.
8. Horton, R. E., "Erosional Development of Streams and thier Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology.", *Bulletin, Geo l. Soc. of Am.*, Vol. 56, 1945, pp. 275-370.
9. Shreve, R. L., "Statistical Law of Stream Number.", *J. Geology*, Vol. 74, 1966, pp. 17-34.
10. Smart, J. S., "Channel Networks.", *Advances in Hydrosience, Academic Press*, Vol. 8, 1972, pp. 305-346.
11. Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B., "The Geomorphological Structure of Hydrologic Response.", *Water Resources Research*, Vol. 15, 1979, pp. 1409-1420.
12. Gupta, V. K., E. Waymire, and Wang, C. T., "A

- Representation of An Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphology.", *Water Resources Research*, Vol. 16, 1980, pp. 855-862.
- 13 Cheng, B. L., "A Study of Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph.", Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1982.
 - 14 안상진, "유역의 하천특성인자와 유출 및 수리기하간의 상관식.", 박사 학위논문, 인하대학교, 1980.
 - 15 이순탁, 박종권, "하천유출량 산정을 위한 GIUH 모델.", **한국수문학회지**, 제20권, 제4호, 1987, pp. 267-278.
 - 16 조홍재, "지형학적 수문응답특성에 의한 선형저수지 모델 해석.", **한국수문학회지**, 제20권, 제2호, 1987, pp. 117-126.
 - 17 이정식, "유역의 지형 및 강우특성인자를 고려한 순간단위도에 관한 연구" 박사학위논문, 연세대학교, 1987.
 - 18 김재한, 윤석영, 한성희, "수로망에 의한 순간단위도의 유도." 충남대학교, 산업기술연구소, 논문집, 제6권, 1호, 1991, pp. 9-17.
 - 19 Kirkby, M. J., "Tests of The Random Network Model, and its Applications to Basin Hydrology.", *Earth Surf. Processes*, Vol. 1, 1976, pp. 197-212.
 - 20 Kishen, D. M. and Bras, R. L., "The Linear Channel and its Effect on The Geomorphologic IUH.", *J. Hydrology*, Vol. 65, 1983, pp. 175-208.
 - 21 Mifflin, E. R., "On The Role of Network Geometry in The Basin Response" M. S. Thesis, University of Mississippi, 1984.
 - 22 Mesa, O., and Mifflin, E. R. "On The Relative Role of Hillslope and Network Geometry in Hydrologic Response.", Scale Problems in Hydrology, Reidel Publishing, 1986.
 - 23 Feller, W., "An Introduction to Probability Theory and its Applications, II, John Wiley, New York, 1971.
 - 24 Dunne, T., "Relation of Field Studies and Modeling in The Prediction of Storm Runoff.", *J. hydrology*, Vol. 65, 1983, pp. 25-48.
 - 25 Gupta, V. K. and Waymire, E., "On The Formulation of an Analytical Approach to Hydrologic Response and Similarity at The Basin Scale.", *J. hydrology*, Vol. 65, 1983, pp. 95-123.
 - 26 Troutman, B. M. and karlinger, M. R. "Unit Hydrograph Approximations Assuming Linear Flow through Topologically Random Channel Networks.", *Water Resour. Res.*, Vol. 21, No. 5, 1985, pp. 743-754.
 - 27 Gupta, V. K. and Mesa, O. J., "Runoff Generation and Hydrologic Response via Channel Network Geomorphology-Recent Progress and Open Problems.", *J. Hydrology*, Vol. 102, 1988, pp. 3-28.
 - 28 김재한, 윤석영, 윤어진, 김만기, "수문응답에 있어서 Geometry의 역할에 관하여", **대한토목학회 학술발표회 개요집(II)**, 1992.
 - 29 김재형, 윤용남, "소유역의 홍수유출계산을 위한 단일선형저수지 모형의 적용", **한국수문학회지**, 제 19권 제1호, pp65-74, 1986.
 - 30 건설부, "수자원관리기법 개발연구조사사업 보고서 별책부록 홍수수문자료집", 1991.

(接受: 1992. 12. 26)