

〈論 文〉

地形學의 水文應答特性에 의한 線型貯水池 모델 解析

Runoff Analysis of a Linear Reservoir Model by the Geomorphologic Response Characteristics

趙 弘 濟*
Cho, Hong Je

Abstract

A Synthetic unit hydrograph method was suggested for the representation of a direct runoff hydrograph with empirical geomorphologic laws and geomorphologic parameters by applying geomorphologic instantaneous unit hydrograph theory and Rosso's results of application of GIUH theory to the Nash Model which is a linear reservoir model. The shape parameter m and scale parameter k can be derived by the Horton's empirical geomorphologic laws R_A, R_B, R_L when ordered according to Strahler's ordering Scheme, main stream length and using the maximum velocity for the dynamic characteristics of a river basin. The derived response function was tested on some observed flood data and showed promising. For the determination of the shape parameter m , eq. (16) was showed applying and m showed a good regression with the size of basin area.

要 旨

地形因子 및 法則을 水文應答의 직접변수로 결합시킨 지형학적 순간단위도(GIUH)이론과 이를 線型貯水池 모델인 Nash 모델의 物理的 因子인 m 와 k 에 상관시킨 Rosso의 성과를 개선하여, 地形因子, 地形法則 및 호우특성과 流域動的 特性으로서 最大流速이 고려된 개념으로서 m 와 k 를 산정하여 流出水文曲線을 再現하는 方法을 제시하였다. m 와 k 는 Horton의 地形法則인 R_A, R_B, R_L 와 主河川流路延長 및 流出速度로서 表現이 가능하며, 실제유역에 대한 적용성을 검토하기 위해 유역내 동적특성을 나타내는 호우특성과 流出速度로서 最大流速을 이용하여 k 를 산정하는 기본식을 재구성 하였고, 실측자료를 이용 分析한 결과 本理論의 적용성이 입증되었다. m 의 산정에 있어서 Rosso가 제안한 (16)式的 일반성을 확인 하였으며, 流域面積의 증가에 따라 m 가 커지는 좋은 상관관계를 보였다.

1. 序 論

기존 합성단위도 모델의 方法은 순간단위도 함수의 特性值 또는 降雨—流出 모델의 개념적 因

자와 物理적 系의 特性值를 회귀분석 하는데 그 理論的 基本을 두었다.¹⁾ 河川流域의 洪水追跡은 河川의 기하학적 구조에 의해 수행될 수 있으며 河川의 기하학적 구조는 各 河川流域의 形態學的 特性에 따라 다양함을 보이지만, 일반적으로

* 本學會 正會員 蔚山大學校 工科大學 土木工學科

몇가지 주요 因子의 法則등에 의해 단일화가 이루어질 수 있는 구조적 同質性을 갖는다. Rao et al²⁾은 Nash의 선형저수지 모델에 대해 규모계수 k 를 유역면적, 도시화 비율, 유효우량, 강우 지속시간등의 회귀함수로 나타내었으며 Dooge³⁾는 k 를 유역면적, 주하천연장, 주하천경사의 회귀함수로 표현하였다. 또 순간단위도 함수의 特性值를 尖頭時間, 尖頭流量 또는 모멘트등의 因子로서 회귀분석한 경험공식등이 있으며, 이의 적용은 전적으로 地域特性에 따른다. 이와 같이 서술적 수문학은 실제현상의 적용에 있어 그 成果의 分析을 물리적 현상에 근거를 둔 것이 아니라, 水文學的 因子의 地域化를 위해 회귀관계나 상관계수등을 이용하였다. 그러나 다중상관해석의 결과로는 수문과정의 인식, 해석에 만족스러운 결과를 제시하지 못하며, 다만 경험적 적합성을 제시할 뿐이다. 이와같은 회귀분석의 단점을 해결하기 위해 流域의 地形學的 구조및 水文過程의 물리적 현상에 근거를 둔 순간단위도 合成理論을 Itrubé et al⁴⁾⁵⁾⁶⁾가 수평의 연구결과를 씨리프로 발표하여, 水系水文學의 降雨流出解析에 있어 새로운 章을 마련하였으며, Kundzewicz⁷⁾은 이를 강래 水文學의 새로운 연구 분야로 확인하였다. 이 연구의 主目的은 우리가 主로 使用하여 온 많은 회귀관계 이론 대신에 流域水文學에 있어서 地形法則이나 特性의 역할에 대한 이해를 보다 높고자 하는데 있다.

근본개념은 流域內에 下降한 降雨입자(a single drop)의 流下 경로에 대해 통계적 수법을 이용, 地形法則을 순간단위도에 직접연결시키고자 하는데 있으며, 方法으로서는 動的確率系 理論과 queueing 이론을 使用하였으며, 연구의 本質은 河川流域의 形態學的 구조를 Strahler의 河川次數法則으로 설명할 경우 임의 위치에 下降한 降雨입자가 流下하는 과정을 Strahler의 次數法則에 의해 표현하고자 하는 것으로서, Semi-Markov Chain에 의한 전치확률과 이 應答과정의 지수 분포를 보인다는 가정에 있다. 이에 대한 연구 성과는 순간단위도의 主된 因子인 尖頭流量과 到達時間을 Horton의 地形法則과 動的因子로서 流域應答特性인 流下速度로 표현하였으며 이를 지형학적순간단위도(Geomorphologic IUH)로 칭

하였다.

GIUH에 대한 연구로서, Gupta et al⁹⁾¹⁰⁾은 Semi-Markov Chain 이론에 의하지 않고 확률론적 개념으로서 降雨의 流域內 流下 경로에 대한 확률함수로서 표현하였으며, Itrubé et al¹¹⁾¹²⁾은 GIUH 이론을 기후인자 즉 호우강도의 분포와 호우지속시간 및 지형법칙의 Random 함수로서 표현한 지형기후학적순간단위도(Geomorphoclimatic IUH)이론을 제시하였다. 이는 각 호우특성에 따르는 순간단위도의 尖頭流量과 尖頭時間의 변화를 확률분포함수로서 표현할 수 있음을 보인 것이다.

이와 같이 순간단위도의 본질에 대한 特性을 알 수 있으면 지형학적순간단위도를 개념화하는 것은 어렵지 않으며, 이를 이용해서 Rosso¹³⁾는 개념모델인 Nash 모델을 使用해서, 수문순환세의 물리적 特性을 구하는 새로운 관계를 제시한 바 있으며, Itrube et al¹⁴⁾¹⁰⁾¹³⁾은 보다 적절한 수문과정의 再現을 위해 流域內 動的特性인 流下速度로서 平均流速보다 最大流速이 보다 적합할 것임을 지적하였다.

국내 연구로서 조¹⁶⁾가 Itrube et al의 지형기후학적 순간단위도 이론을 Sukekawa¹⁴⁾의 洪水流出 모델에 결합시켜 그 적용의 타당성을 보인 바 있으며, 本 研究는 J.B. Valdés et al¹¹⁾이 Eagleson¹¹⁾¹⁵⁾의 이론을 이용 유도한 最大流速 표현 기법을 使用해서, Horton의 地形法則과 Itrube et al⁴⁾의 지형학적순간단위도 이론으로 Nash의 선형저수지 모델에 대한 물리적 特性因子를 구하는 합성단위도배출을 제시하고자 하는데 主안점이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 지형학적 순간단위도(Geomorphologic IUH)

流域에 대한 降雨의 유출현상은 水文學的, 地形學的 因子에 의해 다양한 應答特性을 나타낸다. Itrube et al⁴⁾⁵⁾⁶⁾가 제안한 지형학적 순간단위도(GIUH)는 流域內에서 무작위로 선택된 降雨입자가 出口에 到達하는 時間의 확률밀도함수로서 정의되며, 아래의 4가지 기본가정하에 유도하였다.

첫째 : 流域內 河川의 기하학적 구조는 Horton의 法則을 따르고

둘째 : 순간단위도는 流域內 降雨입자의 流下時間의 확률밀도함수를 의미하며

셋째 : 水路內의 水文應答은 지수분포를 따르며

넷째 : 有效雨量은 알 수 있고, 침투량은 고려하지 않는다.

기본이론은 流域內 下降한 降雨입자의 流下過程을 통계적 수법을 이용 지형법칙으로 순간단위도를 구성하고자 하는데 있으며, 동적확률계 이론과 queueing 이론으로서 임의 위치에 하강한 降雨입자가 流下하는 過程을 Strahler의 하천차수법을 이용 水文應答函數로 표현하고자 하는 것이다. Itrube et al은 이 應答過程이 지수분포를 보이며, 1次河川의 斜面流出을 무시하고 流域內 降雨입자의 流下速度를 平均速度로서 일정하게 가정하였다. 그러나 실제 流域內의 流下現象은 上流에서 下流 또는 1次河川에서 高次河川으로의 흐름과정에서 形態學的, 水理學的의 因子에 의해 달라지며 同一하게 취급하는 것은 고순이다. 이에 대해 Bras et al¹³⁾은 洪水時 流域內 代表유속으로 취급가능한 最大流速으로서 GIUH의 연구가 필요함을 지적한 바 있다.

위의 기본가정과 이론을 바탕으로 강우입자의 流出過程을 개념적으로 모델화¹⁶⁾하면 (1)式과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} GIUH &= f(\text{Basin Geomorphology, Channel Dynamics}) \\ &= f(\text{Horton's Law, Holding Time}) \\ &= f(R_B, R_B, R_L, L, V) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기서,

- Holding Time = Travel Time of a water drop
- L = 하천의 유로연장
- $R_B = N_i / N_{i+1}$, $i=1, 2, \dots, \Omega$ (하천차수) : 분기비
- $R_L = \bar{L}_{i+1} / \bar{L}_i$, $i=1, 2, \dots, \Omega$ (") : 하천연장비
- $R_A = \bar{A}_{i+1} / \bar{A}_i$, $i=1, 2, \dots, \Omega$ (") : 유역면적비
- V = 유출속도

Itrube et al⁴⁾은 (1)式으로 표현될 수 있는 개념

적 모델을 3次河川에 적용시켜, 地形法則과 動的特性이 고려된 지형학적 순간단위도 t_p (GIUH)의 主된 因子인 尖頭流量 h_p 와 到達時間에 대한 관계를, 일반적인 河川次數 $\Omega(1, 2, \dots, \Omega)$ 에 대한 應答函數로서 (2), (3)式과 같이 유도하였다.

$$h_p = \theta \cdot v \dots\dots\dots (2)$$

$$t_p = k/v \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

$$\theta = 1.31 / L_B \cdot R_L^{0.43} \dots\dots\dots (4)$$

$$k = 0.44 L_B R_B^{0.55} R_A^{-0.55} R_L^{-0.38} \dots\dots\dots (5)$$

v = 응답의 유출속도

Schumm,⁴⁾⁵⁾¹³⁾ Smart는 실제유역의 分析을 통해서 분기비 (R_B), 하천연장비 (R_L), 유역면적비 (R_A) 등이 $3 \leq R_B \leq 5$, $1.5 \leq R_L \leq 3.5$, $3 \leq R_A \leq 6$ 의 범위내에 있음을 보였다. (4), (5)式에서 나타난 각 계수들은 실제유역 分析을 통해 제시된 R_B, R_A, R_L 의 범위내에서 126개의 무작위 조합을 사용. 회귀분석을 실시한 것으로서, 이들 조합에 따라 GIUH에 미치는 최대오차는 10% 미만임을 Itrube et al⁴⁾이 分析을 통해 지적하였다.

尖頭流量(h_p)과 到達時間(t_p)의 곱은 流出速度에 무관한 무차원 함수(IR)로서 지형법칙들로 구성된 (6)式과 같다.

$$IR = h_p \cdot t_p = 0.58 (R_B / R_A)^{0.55} \cdot R_L^{0.05} \dots (6)$$

2.2 지형학적순간단위도 (GIUH)와 Nash 모델과의 관계

水文學的 線型系에 있어서 降雨-流出관계는 단위충격함수(unit Impulse function)를 이용하면 아래와 같은 회귀적분함수로 표현 된다.

$$Q(t) = \int_0^t h(t-\tau) i(\tau) d\tau \dots\dots\dots (7)$$

여기서,

- $h(t-\tau)$; kernel function 으로 순간단위도
- $i(\tau)$; 유효우량
- $Q(t)$; 직접유출량

(7)式的 순간단위도를 결정하기 위해 많은 개념 모델을 선정할 수 있으나, n개의 선형저수지 모델(Nash 모델)이 가장 일반화 되어 있으며 Lumped System, Linearty 그리고 Time Invariant의 3가지 가정하에 성립되는 2변수 감마 확률

밀도함수로 정의되는 Nash 모델은 (8)식과 같다.

$$h(t) = \frac{1}{k\Gamma(m)} e^{-\frac{k}{t}} \left(\frac{t}{k}\right)^{m-1} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

$h(t)$: 충격응답함수 (IUH)

m : 형상계수

k : 규모계수

Γ : 감마함수

(8)식으로 표현되는 순간단위도의 형상을 결정하기 위해서는 k 와 m 의 값을 구해야 하며, 모멘트법, 지체시간이용법등 기준방법이 있다. (8)식에서 $m=1$ 일 경우 지수분포 모델이 되며 (9)식과 같다.

$$h(t) = \frac{1}{k} e^{-\frac{t}{k}} \dots\dots\dots (9)$$

Sukekawa¹⁴⁾는 사다리꼴 流出水文曲線을 利用하여 k 와 m 의 관계를 (10)식과 같이 제시하였다.

$$k = t_c / 2m \dots\dots\dots (10)$$

여기서,

t_c = 홍수 도달시간

본 연구에서 주된 관심사인, 지형법칙을 이용한 k 와 m 의 산정 방법에 있어서, Itrube et al⁴⁾가 유도한 應答函數 (2), (3)식은 경험관계식이 아니라, 물리적 개념으로 접근한 방법론에 그 주된 의의가 있으며, (4), (5)식의 상관관계식은 前節에서 언급한 바와 같이 地形法則因子的 범위내에서 무작위 126개 조합에 의해 최적화 한 것이다. 따라서 (4), (5)식은 실제유역에 대한 일반성을 부여하기 위해서 단순화한 관계식으로서, 실제유역에서의 수문응답 재현은 그 地域의 形態學的 구조 특성에 따라 서로 상이 할 수 있다.

순간단위도의 본질인 到達時間과 尖頭流量이 알려지면 지형학적 순간단위도(GIUH)를 개념화하거나, 개념적 모델 因子와 물리적 系의 특성과의 관계를 새로운 형태로 나타내는 것은 어려운 일이 아니다. 到達時間 t_p 와 尖頭流量 h_p 에 근거를 둔 水文應答으로 Nash 모델을 지형학적 합성(Geomorphologic Synthesis)으로 표현하기 위해서는 k 와 m 에 대한 관계식이 필요하다¹³⁾¹⁹⁾.

$$t_p = k(m-1) \dots\dots\dots (11)$$

$$h_p = \frac{(m-1)^{m-1}}{k\Gamma(m)} \exp(m-1) \dots\dots\dots (12)$$

지형법칙을 이용한 k 와 m 의 산정방법으로서 Rosso¹³⁾는 (8)식과 같이 표현되는 감마밀도함수에 대해, (11), (12)식의 곱인 무차원 함수로서 (13)식과 같이 나타내었다.

$$H_* = h_p \cdot t_p = (m-1)^m \exp(1-m) / \Gamma(m) \dots\dots\dots (13)$$

여기서,

H_* : 무차원 함수.

또, Itrube et al⁴⁾는 지형학적 순간단위도(GIUH)에 있어서, 무차원 함수를 尖頭流量과 到達時間의 곱인 (6)식으로 나타낼바 있다.

따라서, Rosso¹³⁾는 尖頭流量과 到達時間의 무차원 함수인 (6), (13)식을 (14)식과 같이 가정하여

$$IR = H_* \dots\dots\dots (14)$$

형상계수 m 을 地形法則 因子의 함수로 구성된 (15)식과 같이 표시하였다.

$$(m-1)^m \exp(1-m) / \Gamma(m) = 0.58 (R_B / R_A)^{0.55} R_L^{0.05} \dots\dots\dots (15)$$

(15)식에서 m 는 시행착오법등을 이용한 최적화에 의해 구할 수 있으며, Rosso¹³⁾는 R_B, R_A, R_L 을 각각 $3 \leq R_B \leq 5, 1.5 \leq R_L \leq 3.5, 3 \leq R_A \leq 6$ 범위에서 변하는 독립변수, 형상계수 m 를 종속변수로 하여 126개 조합을 모의 발생시켜 다중회귀분석에 의해 (16)식과 같이 나타내었다.

$$m = 3.29(R_B / R_A)^{0.78} R_L^{0.07} \dots\dots\dots (16)$$

또, 규모계수 k 는 (11)식을 이용 (17)식과 같이 나타내었다.

$$k = 0.7 [R_A / (R_B \cdot R_L)]^{0.48} v^{-1} L \dots\dots\dots (17)$$

Rosso¹³⁾는 (16)식과 (17)식의 적합성을 검토하기 위해 Nash 모델과 Nash 모델을 이용한 GIUH 모델을 평균유속을 이용 모의발생시켜 비교하였으며, Nash 모델의 물리적 特性因子(k, m)를 GIUH 성과로서 재현할 수 있음을 보였다. 그러나 실제유역에 있어서 流出速度는 河川次數의 증가에 따라, 上流에서 下流로의 흐름에 따라, 또는 호우지속시간, 호우크기, 선행강수지수등에 따라 다르므로 흐름속도를 平均流速으로 일정하게 취급할 수는 없다. 이에 대해 Rosso¹³⁾는 기후학적 특성 즉 호우지속시간, 호우강도등이

고려된 지형기후학적 순간단위도(Geomorphochimatic IUH)로서 Nash 모델을 해석함이 보다 합리적임을 지적한 바 있으며 추후연구과제로 제안하였다. Itrube et al은 보다 적절한 降雨一流出解析을 위해 尖頭流速(最大流速)을 사용하여야 할 것을 강조한 바 있으며, Pilgrim¹⁸⁾은 field 관측을 통해 호우유출시 流域全體의 흐름속도를 最大流速으로 일정하게 취급할 수 있다고 하였다. 그러나 最大流速의 실측은 불가능한 일이며 이에 대한 적절한 간접적 解析 方法이 요구된다.

2.3 流下速度

流域內 下降한 降雨입자는 流域의 斜面과 河川流路를 통해서 流出하게 된다.

斜面에서와 河川流路에서의 流出特性은 조도계수, 통수면적, 유역및 유로경사등의 地形學的의 因子및 호우지속시간, 호우강도등의 기후학적 因子에 의해 上流에서 下流 또는 1次河川에서 高次河川, 그리고 斜面, 河川流路에서 다르게 발생한다. 실용상의 이유로 流域全體에 대해서 平均流速으로 일정하게 취급하는 것이 일반적이나 실제 水文現象을 보다 적절히 재현하기 위해서는 정확한 표현수단이 요구된다.

Laurenson⁸⁾은 (18)式과 같이 유역내 저유시간 k 가 上流의 流出量 q 에 따라 변한다는 queuing theory로서 (19)式과 같은 비선형 저수지 모델을 제안하였으며,

$$k=k(q) \dots\dots\dots (18)$$

$$S_i=k_i Q_i^{\alpha_i} \dots\dots\dots (19)$$

여기서,

i : 분할유역 면적계수

α : 계수

이에대한 응용으로서, 平均流速을 (20)式과 같이 다르게 취급하므로써 보다 일반성을 부여할 수 있을 것으로 사료되며, 추후 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

$$k_i = \frac{\bar{L}_i}{v_i} \dots\dots\dots (20)$$

여기서,

\bar{L} : 하천평균연장

v : 평균속도

i : 하천차수 ($i=1, 2, \dots, \Omega$)

또 평균속도를 (21)式의 Manning 公式이나 (22)式의 chézy 公式을 사용하는 경우

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \dots\dots\dots (21)$$

$$V = CR^{1/2} I^{-1/2} \dots\dots\dots (22)$$

(23)式과 같이 표현이 가능하며

$$V = f(I^{1/2}) \text{ 또는 } V_i = f(I_i^{1/2}) \dots\dots (23)$$

(23)式을 (20)式에 代入시키면 (24)式과 같이 地形因子에 의해 各 河川次數別 지체시간의 계산이 가능하다.

$$k_i = f(\bar{L}_i, I_i^{1/2}) \dots\dots\dots (24)$$

반면에, 단위유량도에서 임의강도의 유량은 임의강우지속시간동안 유역전반에 균등하게 내리는 것으로 가정되지만, 유역내의 動的特性인 흐름속도는 호우강도와 호우지속시간에 따라 변한다. pilgrim¹⁸⁾은 field 관측을 통해 호우강도가 일정할 경우 호우지속시간 동안 尖頭流量의 흐름속도는 全流域을 통해 일정하다고 하였다. pilgrim의 가정하에 흐름속도는 해석적으로 1次流域에서의 호우강도, 지속시간및 유역의 지형특성으로서 高次河川流域의 흐름속도를 구할 수 있는 함수로 나타낼 수 있다.

J.B. Valdés et al¹¹⁾은 Engleson이 1次流域에 대해 유도한 流域의 到達時間 모델을 이용하여 尖頭流速을 (25)式과 같이 나타 내었다.

$$V_{max} = \alpha_s^{1/m} q_{max}^{(ms-1)/ms} \dots\dots\dots (25)$$

河川流路의 尖頭流出 速度가 일정하다고 가정할 때 流出速度 v 는 (26)式과 같이 표현된다.

$$v_1 = \alpha_1^{1/ms} Q_1^{(ms-1)/ms}$$

$$= \alpha_2^{1/ms} Q_2^{(ms-1)/ms} = v_2 \dots\dots\dots (26)$$

여기서,

v_1, v_2 : 1次및 Ω 次的 침투유속

Q_1, Q_2 : 1次및 Ω 次的 침투유량

α_1, α_2 : 1次및 Ω 次的 kinematic wave parameter $= s_s^{1/2} / n_s \cdot b_s \dots\dots\dots (27)$

여기서, s_s : 유역경사

n_s : 조도계수

b_s : 하천폭

有效雨量을 i_r 이라 하면

$$Q_1 = i_r \cdot A_1 \dots\dots\dots (28)$$

$$Q_2 = i_r \cdot A_2 \dots\dots\dots (29)$$

여기서,

A_1, A_2 : 1次 및 Ω 次的 유역면적
 (28), (29)式을 (26)式에 代入하면

$$\alpha_1 = \alpha_2 (R_A)^{2-1} m_s - 1 \dots \dots \dots (30)$$

따라서 최대유속 V_{max} 은 (25), (30)式에서 (31)式과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max} = \alpha_s^{1/m_s} (i_r \bar{A}_1)^{(m_s-1)/m_s} \dots \dots \dots (31)$$

(31)式에서 α_s 를 流域全體에 대해 일정하다고 가정하면, $m_s = 5/3$, $A_1 = A_2 R_A^{1-2}$ 이므로 (31)式은 (32)式과 같이 된다.

$$V_{max} = 0.665 \alpha_2^{0.6} (i_r \cdot A_2)^{0.4} \dots \dots \dots (32)$$

3. 합성모델

본 연구의 주된 관심사는 Bras et al¹¹⁾ 등이 보다 합리적인 水文應答의 재현을 위해서는 GIUH의 動的特性으로서 平均流速 대신에 最大流速을, Rosso¹³⁾가 Nash 모델의 물리적 因子(k, m) 산정에 있어서 호우특성을 고려한 지형기후학적 순간단위도(Gcomorphoclimatic IUH)의 연구를 제안한 점에 근거를 두었으며, 호우특성과 하천차수의 변화에 따른 실제 流下速度의 변화를 적절히 표현할 수 있는 지형기후학적 순간단위도 이론으로서 Bras et al가 유도한 最大流速 산정식을 이용하면, Nash 모델의 물리적 因子(k, m)를 구할 수 있는 일반식을 유도할 수 있다.

地形法則과 動的特性으로 표시되는 尖頭時間 t_p 에 대한 관계식은 (5)式을 (3)에 代入시켜 얻을 수 있으며, Rosso¹³⁾는 (33)式과 같이 나타내었다.

$$t_p = 1.584 (R_B/R_A)^{0.55} R_L^{-0.38} v^{-1} L \dots (33)$$

(33)式을 (10)式에 代入시키면

$$t_p = k(m-1) = 1.584 (R_B/R_A)^{0.55} R_L^{-0.38} v^{-1} L$$

$$\therefore k = \frac{1.584 (R_B/R_A)^{0.55} R_L^{-0.38} L}{v(m-1)} \dots (34)$$

여기서, 最大流速을 이용한 지형학적 선형저수지 모델을 구성하기 위해서 pilgrim의 가정을 이용해서 실제유역에 대한 현상으로 일반화시키면, 즉 $v = v_{max}$ 을 사용하면 (34)式은 (35)式과 같다.

$$k = \frac{1.584 (R_B/R_A)^{0.55} R_L^{-0.38} L}{v_{max} (m-1)} \dots (35)$$

따라서, (32)式의 v_{max} 을 (35)式에 代入시키면 (36)式과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{1.584 (R_B/R_A)^{0.55} R_L^{-0.38} L}{0.665 \alpha_2^{0.6} (i_r \cdot A_2)^{0.4} (m-1)} \dots (36)$$

(36)式은 선형저수지 모델의 물리적 因子인 k 를 지형법칙, 지형인자 및 호우강도로서 구할 수 있는 관계식을 나타내며, 형상계수 m 는 일반식인 (15)式을 시행착오법에 의해 최적화하거나, Rosso¹³⁾가 모의발생자료에 대해 회귀분석한 결과인 (16)式을 使用할 수 있다.

4. 실제유역에의 적용

4.1 자 료

본 연구의 수치예를 위하여 使用된 資料는 1976 IHP 보고서²⁰⁾에 수록된 경안천, 무심천 대표 시험유역의 洪水流出 기록과 1984-5년에 관측한 위천 대표시험유역내의 병곡교와 고노교 지점의 실측 기록이다. 경안천, 무심천 대표시험유역은 토사의 이동등에 따른 관측시설의 과도한 변동으로 효과적인 관측을 수행하지 못하여 신뢰성 있는 流量의 관측기록이 거의 없으나 1976 IHP 보고서에 수록된 최초 관측치의 신뢰성을 인정하고 資料로 채택하였다.

4.2 분석유역의 지형특성

경안천 및 무심천 流域은 流域面積이 9.2 km² 및 20 km² 이며, 流路延長은 5.3 km 및 5.5 km 이다. 낙동강 水系의 위천 대표 유역은 流路延長이 472.5 km² 이고 流路延長이 42.83 km 이며, 分析대상으로 선정한 流域內 동곡교, 고노교 地點의 流域面積 및 流路延長은 33.63 km² 및 109.73 km² 그리고 8.0 km 및 18.9 km 이다. 보고서

「表-1」 Horton의 地形法則 分析表

구분 유역	분기비 (R_B)	유역면적비 (R_A)	유로연장비 (R_L)	하천차수 (Ω)
경안천	2.59	3.29	1.56	4
무심천	3.08	3.78	1.61	4
위천 (동곡교)	3.05	3.70	1.62	4
위천 (고노교)	4.57	5.39	2.56	4

및 본인의 分析에 따르면 Horton의 地形法則이 적용되는 地域으로서 투수성이 높은 山地河川 流域이다. Strahler's ordering scheme에 따라 Horton의 地形法則의 分析 결과는 「表 1」과 같다.

4.3 적용예 및 분석

前節에서 論한 지형학적 순간단위도의 기본이론식에 있어서 (3)式 및 (32)式은 Itrube et al, Rosso가 流域의 분기비 (R_B), 하천연장비 (R_L), 유역면적비 (R_A)의 산정에 있어서 Schumm⁴⁾¹³⁾이 실제유역 分析을 통해서 제시한 $3 \leq R_B \leq 5$, $1.5 \leq R_L \leq 3.5$, $3 \leq R_A \leq 6$ 범위내의 值를 126개의 조합으로 모의발생시켜 최적화한 것이다. 실제로 수문사상이나 지형특성은 각 地域에 따라 그 現象이나 特性이 독립성을 가지므로, 分析대상 流域에 대해서 각각 그 現象을 구명해서 기본이론식이나 법칙을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 「表 1」에서 보이는 바와 같이 分析대상 流域의 R_B, R_A, R_L 의 值가 기본이론식 유도에 사용된 범위내에 있으므로 (3), (33)式 등의 기본식을 인용하였다.

分析方法으로서 형상계수 m 의 산정은 Rosso¹³⁾가 제시한 (16)式의 일반성을 확인하기 위해 (16)式과 기본식 (15)式을 시행착오법으로 최적화하여 구한 值와 비교하였으며, 규모계수 k 의 산정을 最大流速을 利用 제 구성한 (36)式을 이용하였다. m 및 k 의 산정에 있어서 $R_B, R_L, R_A, L, A, i_r, \alpha_s$ 등은 地形 및 降雨 因子로서 地形圖 또는 홍수기록으로부터 구할 수 있으나 α_s 는 동적인자로서 (27)式과 같으며, 조도계수 등의 적절한 선정이 문제로 남는다. 본 연구에서는 (37)式과 같이 실측치를 이용 α_s 의 가장 적절한 值를 모의발생 시켜서 사용하였다.

$$ERROR = \sum (Q_{ob.} - Q_{ca.})^2 \rightarrow \min. \dots (37)$$

여기서,

$Q_{ob.}$ = 관측치

$Q_{ca.}$ = 계산치

수분곡선 해석을 위한 유효우량의 산정은 Φ -index 법을 使用하였고, 本 方法의 적용성을 위해 실측치와 비교한 것이 「그림 1, 2, 3, 4」이며, 分析資料에 대한 결과의 비교가 「表 2」와 같다.

分析 결과에서 보이는 바와 같이 그 적합성이 높으나 무심천 76/9/24 홍수는 첨두유량의 오차가 30.7%, 위천 84/7/5 홍수는 첨두유량이 18.9%, 도달시간 3시간등으로 다소 편차가 크다. (37)式에 의해 최적화시킨 α_s 의 민감성을 조사하기 위해 20%의 오차를 부여한 결과, 첨두유량 및 도달시간에 약 10%의 오차를 발생시켜 본 모델이 α_s 에 민감함을 알았다. 資料의 신뢰성 등의 문제점을 감안하더라도 추후 보다 많은 地點 및 관측자료에 대해서 본 方法의 검토가 요망된다.

형상계수 m 의 산정에 있어서 Rosso¹³⁾가 제시한 (16)式과 일반(15)式의 비교결과(表 2) 최대로 m , 到達時間 t_p , 尖頭流量 h_p 가 1.9%, 10% (1개 단, 나머지는 zero), 3.8% 오차로서 아주 근접한 값을 부여하므로, (16)式을 그대로 使用할 수 있어 일반성이 인정 된다.

「그림 1, 2, 3, 4」에서 Rosso Method와 Optimum Method란 형상계수 m 의 산정 方法을 의미하는 것으로, Rosso M.는 (16)式을 Optimum M.는 (15)式에 의한 것임을 나타낸다.

형상계수 m 의 산정식인 (15), (16)식은 流域面積의 직접적인 函數가 아니나, 分析結果(表 2) 流域面積의 증가에 따라 m 의 값이 크지는 상관성을 나타내었다. 그 상관정도를 구하기 위해서

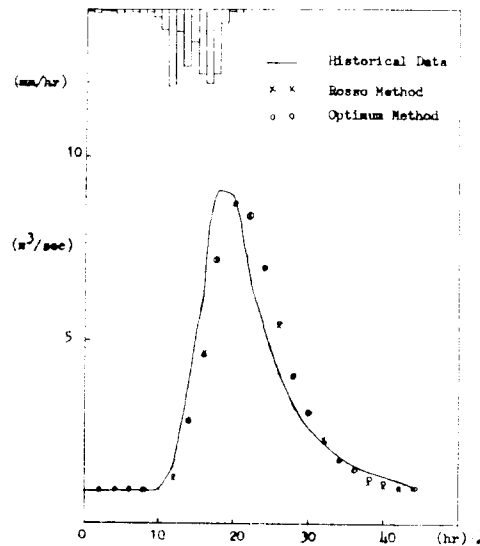


Fig. 1 Comparison of Predicted and Observed Peak Discharge for the Kyungan River Basin 1976. 8. 26

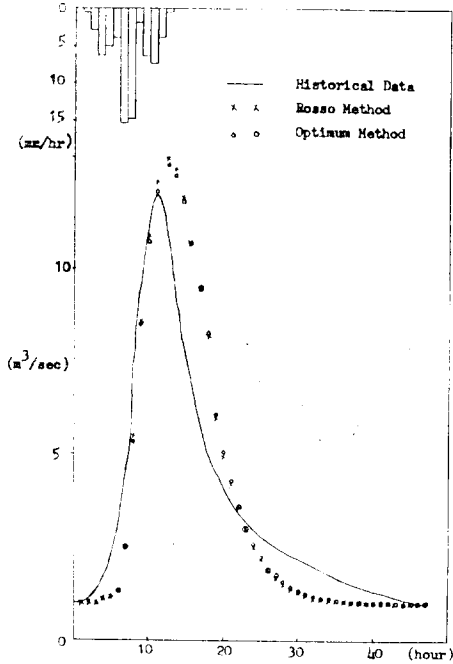


Fig. 2 Comparison of Predicted and Observed Peak Discharge for the Musin River Basin 1976. 8. 27

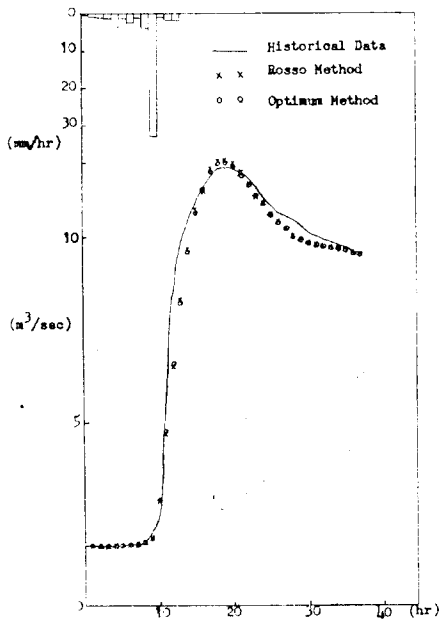


Fig. 3 Comparison of Predicted Observed Peak Discharge for the Wi River Basin Donggok Bri. 1984. 7. 22--7. 24

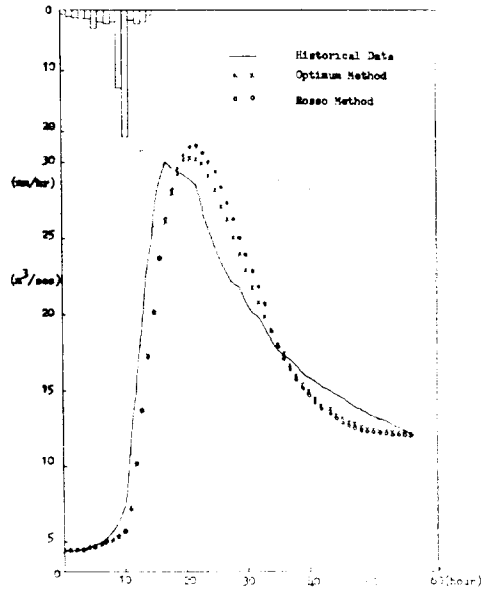


Fig. 4 Comparison of Predicted and Observed Peak Discharge for the Wi River Basin Kono Bri. 1984. 7. 22--7. 24

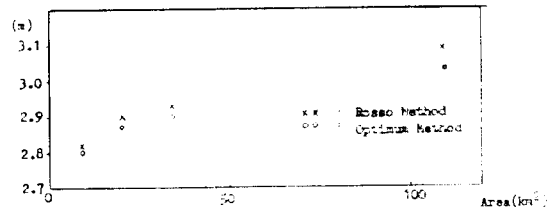


Fig. 5 Relation Between Area and Shape Parameter (m)

그래프로 나타낸 것이 「그림 5」이며, (15), (16)식에 대한 面積크기와의 상관계수가 각각 0.95, 0.98이다.

5. 結 論

本 研究는 地形法則과 地形因子 및 流域內 動的 特性인 호우특성과 代表流速으로서 最大流速을 線型貯水池 모델인 Nash 모델에 적용시켜 水文應答의 직접변수로 결합시키고자 한 것으로서 한강수계의 경안천, 금강수계의 무심천, 낙동강수계의 위천대표시험유역의 시간유출량 資料를 使用하여 적용성을 검토한 結果는 다음과 같다.

표·2 관측치와 계산치의 비교

발생년월일 유역	구분	유역면적 (km ²)	첨두유량 (관측치 m ³ /sec)	도달시간 (관측치 hr)	형상계수	첨두유량 (계산치 m ³ /sec)	도달시간 (계산치 : hr)	형상계수	첨두유량 (계산치 : m ³ /sec)	도달시간 (계산치 : hr)
					(m) Ross법			(m) 최적화법		
무심천	76/8/27	20.0	11.0	10	2.90	11.924	11	2.87	11.834	11
	76/9/14		20.5	28		14.207	35		14.14	35
경안천	76/8/26	9.2	8.18	20	2.82	7.843	21	2.80	7.813	21
위천 (동곡교)	84/7/5	33.63	14.61	9	2.93	12.708	10	2.89	13.208	11
	84/5/2		13.67	9		12.609	11		12.212	11
위천 (교노교)	84/7/22		7.58	16		7.818	17		7.736	17
	84/7/5	109.73	87.37	10	3.09	70.837	13	3.03	70.612	13
	85/5/13		18.98	21		18.913	16		18.902	16
	84/4/22		23.58	17		24.182	21		23.81	21

(1) 지형학적 순간단위도(GIUH)이론과 호우 특성 및 최대유속을 이용하여 Nash 모델의 물리적 因子를 求하는 관계식 (35)을 제시하였다.

(2) 재구성된 水文應答函數의 적용성을 分析하기 위해 실측치와 비교한 결과 비교적 높았고 最大流速 使用에 대한 이론적 타당성을 확인하였으나, 부분적으로 尖頭流量 및 到達時間의 再現에 다소 큰 편차를 보였으므로 보완된 資料로서 검토가 요망된다.

(3) 형상계수 m 의 산정에 있어서, Rosso가 제시한 (16)식과 일반식 (15)의 시행착오법에 의한 최적화를 이용한 것의 비교결과 尖頭流量 및 到達時間에 거의 오차를 나타내지 않았으며, (16)식을 인용할 수 있는 일반성이 인정된다.

(4) 地形法則을 이용해서 分析한 형상계수 m 은 流域面積의 크기에 따라 증가하는 현상을 보였으며, 개념상 타당한 결과를 나타낸다.

謝 辭

本 研究는 韓國科學財團의 1985年度 前半期 研究課題 支援費에 의하여 遂行되어졌으며, 이에 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

1) Z.W. Kundzewicz: "Physical based hydrological flood Routing methods" Journal des sciences Hydrologiques Vol.31., No.2, pp.

237~261, 1986.
 2) Rao, R.A, Delleur, J.W. and Sarma, P.B.S.; "Conceptual Hydrologic Models in Urbanizing Basins." Jour. of Hydraulics Div. ASCE, Vol.98, HY10, 1972.
 3) Dooge, J.C.I; "Linear theory of Hydrologic System." Tech. Bull. No.1468, Agricultural Reserch Service, US Dept. Agriculture, Washington, DC.
 4) I.R. Itrube and J.B. Valdes: "The Geomorphologic Structures of Hydrologic Response", Water Resources Research Vol. 15, No. 6, pp.1409~1420, 1979.
 5) _____; "A Rainfall-Runoff Analysis of Geomorphologic IUH" Water Resources Research Vol. 15, No. 6, pp.1421~1434, 1979.
 6) _____; "Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interrelation Between the Geomorphologic IUH and the Storm Characteristics" Vol. 15, No.6; pp. 1435~1444, 1979.
 7) Z.W. Kundzewicz "The hydrology of tomorrow", Journal des sciences Hydrologiques Vol. 31, No. 2, pp.223~235, 1986.
 8) E.M. Laurenson; "A Catchment Storage model for Runoff Routing" J. of Hydrology, II (2), pp.141~163, 1964.
 9) V.K. Gupta, C.T. Wang, ED. Waymire; "A Representation of an Instantaneous Unit Hy-

- drograph from Geomorphology*” Water Resources Research, Vol.16, No.5, pp. 855~862, 1980.
- 10) _____; “*A Geomorphologic Synthesis of Nonlinearity in Surface Runoff*” Water Resources Research, Vol.17, No. 3, pp. 545~554, 1981.
 - 11) R.L. Bras et al.; “*A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous unit hydrograph*” Water Resources Research, Vol. 18, No. 4, pp. 877~886, 1982.
 - 12) I.R. Itrube et al.; “*On the Climatic Dependence of the IUH: A Rainfall-Runoff Analysis of the Nash Model and Geomorphoclimatic Theory.*” Water Resources Research, Vol. 18, No. 4, pp. 887~903, 1982.
 - 13) R.Rosso et al; “*Nash Model Relation to Horton order Ratio*” Wter Rescurces Research Vol. 20, No. a7, pp. 914~920, 1984.
 - 14) N. Sukekawa and Y. Kitagawa; “*A Rainfall Runoff Model for Assessing the Effects of Urbanization Flood Runoff*” Transaction of JSCE, Vol. 14, pp. 214~216, 1982.
 - 15) P.S. Eagleson: “*Dynamic Hydrology*” McGraw-Hill, 1970.
 - 16) 趙弘濟: “地形氣候學的線型貯水池 모델에 의한 流出解析” 韓國水文學會誌 第18卷 第2號 pp.143~152, 1985.
 - 17) V.K. Gupta et al: “*On Hydrologic Similitude*” Water Resources Research Vol. 22, No. 6, 1986.
 - 18) D.H. Pilgrim, “*Isochrones of Travel Time and Distribution of Flood Storage from a Tracer Study on a Small Watershed*” Water Resources Research Vol. 31, No. 3, pp. 587~595, 1977.
 - 19) P. Serban: “*Methode de Determination de l’hydrogramme unitaire Synthetique*” Hydrologie et Meteorologie pp.45~53, 1975.
 - 20) 建設部, “國際水文開發計劃(IHP)代表流域調查報告書” 1976, 1982~1986.