

〈論 文〉

地形氣候學的 線型貯水池 모델에 의한 流出解析

Runoff Analysis by the Geomorphoclimatic Linear Reservoir Model

趙 弘 濟*

Cho, Hong Je

Abstract

A method is suggested for the reappearance of a surface runoff hydrograph of a river basin by linking the hydrologic response of a catchment represented by the instantaneous unit hydrograph(IUH) with the Horton's empirical geomorphologic laws. The geomorphologic theory of the IUH developed by G. Itrube et al. and the geomorphoclimatic theory of the IUH developed by Bras et al. are used to derive the new hydrologic response function in consideration of geomorphologic parameters and climatic characteristics by applying to Sukekawa's rainfall-runoff model. The derived response function was tested for on some observed hydrographs in a natural watershed and showed promising, and by considering a drainage basin as $m(1\sim4)$ identical linear reservoir in series, it was founded that the model($m=2$) is most applicable to predict hydrologic response regardless of the size of basins. A modelization algorithm of a basin using Sthahler's ordering scheme of drainage network will give good result in analysis of the surface runoff hydrograph by the method of this study.

要 旨

Horton의 地形法則을 水文應答의 直接變數로 결합시켜 流出水文曲線을 再現하는 方法을 제시하였다. Itrube 等の 지형학적 순간단위도(Geomorphologic IUH) 이론과 Bras 等の 지형기후학적 순간단위도(Geomorphoclimatic IUH) 이론을 Sukekawa가 제시한 홍수유출모델에 적용시켜, 지형인자 및 기후특성이 고려된 수문응답함수를 재구성하였다. 分析結果 本 理論의 실제 流域에 대한 適用이 우수하였으며, 流域을 $m(1\sim4)$ 개의 저수지로 모델화할 때, 流域面積의 大小에 관계 없이 流域을 2개의 저수지로 가정한 $m=2$ 인 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한 河川次數法을 이용 流域을 모델화함으로써 本 이론의 확대해석이나 일반화가 이루어질 수 있을 것으로 판단되었다.

1. 序 論

河川流域의 形態學의 特性은 水文氣象學의 因子 및 地質學의 因子와 밀접한 상관성을 가진다. 자연상태의 모든 流域은 그 形狀이나 地形因子 등이 다양하여 各 流域의 水文應答特性이 地形特性에 따라 변화한다. Horton¹⁾이 河川流域에 대해 量的 표현에 의한 地形法

則을 발표함으로써 水文 水理學者에게 아주 중요한 수단을 제공하였으나, 定量的 地形學의 法則을 水文學의 流出應答의 중요한 변수로 직접 결합시키지는 못하였다.

河川流域의 다양한 形態나 구성因子 등이 몇 가지의 분류된 地形學의 法則에 의해 설명될 수 있음에 착안하여, 流域의 水文應答도 몇 가지의 기본법칙으로 해석될 수 있을 것으로 보고, 가장 적절한 降雨-流出 應

* 蔚山大學校 工科大学 土木工學科 助教授

답 모델을 얻고자 많은 학자¹²⁾들이 노력하여 왔다.

최근 流域의 크기나 形狀의 효과를 流出特性에 연결시키기 위한 노력이 Itrube, Gupta³³⁾⁴⁵⁾에 의해 수행되어, 動的 확률 이론으로서 流域의 同質性解析이나 流域의 流出應答를 Horton의 定量的 地形學值로서 구성할 수 있음을 보이고, 地形學的 순간단위도(Geomorphologic IUH) 이론을 제시하여 水文應答解析의 새로운 章을 마련하였다.

流域내에 내린 降雨에 대한 流出과정의 主된 因子는 動的 因子로서의 流出速度이며, 이는 流域內 降雨의 지체시간(Holding Time)으로서 표현된다. 1980年 Wang et al⁶⁾은 등시성 개념을 도입한 Mean Holding Time으로서 G. IUH를 재구성하였고, 1981年 Waymire et al⁷⁾은 流出의 비선형성이 降雨強度에 따른 Mean Holding Time의 종속성으로 표현됨을 보였다. 1982年 Bras et al⁹⁾은 기후因子인 降雨強度와 降雨持續期間 및 流域의 地形因子의 함수로서, 해석적 확률밀도함수인 지형기후학적 순간단위도(Geomorphoclimatic IUH)를 유도하였다.

1982年 Itrube et al¹⁰⁾은 Bras의 Gemorphoclimatic IUH 이론을 삼각형 단위도에 적용시켜 Nash Model과 비교하였으며, 1984年 Rosso¹³⁾¹⁴⁾는 G. IUH 이론에 의한 Nash Model의 재현성을 검토하여 그 이론의 타당성을 보였다.

河川개수계획이나 수리구조물 설계에 필요한 設計洪水量 설정이나, 지역개발에 따른 배수계획 등에 필요한 設計水文量의 적절한 설정을 위해서는 洪水流出에 대한 충분한 관측자료가 필요하지만 대부분의 河川地域이 관측이 미비하거나 전무하다. 이러한 문제의 극복을 위해 많은 해석기법과 경험공식 등이 연구 발표되었다. 호우유출에 대한 다양한 해석기법의 최종목표는 가장 적절한 尖頭流量과 洪水到達時間을 얻는데 있으며, 가장 간편한 선형저수지 모델로서 Nash Model¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾이 있다. Nash Model은 저유계수 K와 형상계수 m 등 2개의 因子로서 구성되며, 적절한 저유계수의 결정을 위한 많은 연구가 있다.

1982~1983年 Sukekawa¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾는 1차유역에 대해 Eagleson의 Kinematic Wave 이론에 의한 집중시간 산정법으로서, 간단한 저유계수 결정법을 제시하여 洪水流出 모델을 유도하였으며, 도시화에 따른 流域內의 流出量 변화를 산정하는 기법을 제시하였다. 본 연구는 Itrube, Gupta³³⁾⁴⁵⁾ 등이 유도한 地形學的 순간단위도(Geomorphologic IUH) 이론을 소개하는데 일차적 목적이 있으며, Bras et al⁹⁾¹⁰⁾의 지형기후학적 이론(Geomorphoclimatic Theory)의 성과와 Sukekawa^{17~19)}

의 洪水流出 모델을 결합하여 미계측 河川流域의 地形因子나 하천기하학 등이 고려된 비교적 간편한 洪水流出 산정법을 얻고자 하는데 주안점이 있다.

2. 水文應答의 地形學的 構造

자연상태의 河川流域은 形狀, 크기, 지질구조, 토양 및 식물의 성장 등 모든 水文學的, 地形學的 特性을 달리한다. 流域에 대한 降雨에 대한 流出現象은 이러한 各各의 因子에 의해 다양한 應答特性을 나타낸다. 河川流域의 다양한 地形學的 構造는 Horton, Strahler²²⁾ 法則에 의해 규칙성 있게 나타낼 수 있다.

1979年 Itrube et al²³⁾²⁴⁾은 流域內 動的 特性인 流出應答에 流域의 크기나 形狀의 효과 및 地形法則을 결합 應시켜 해석적 수분응답함수인 地形學的 순간단위도(Geomorphologic IUH)를 유도하였다.

2-1. 지형학적 순간단위도(G. IUH)

河川流域의 다양한 形態나 구성因子 등은 몇 가지의 분류된 地形學的 法則에 의해 설명될 수 있다. Itrube et al²³⁾은 流域의 地形學的 因子가 포함된 순간단위도로서, 流域의 水文應答構造를 해석적으로 설명하였다. 순간단위도는 (1)식과 같이 「그림 1」과 같은 유역전반에 균등하게 내린 순간적 단위유효우량이 流域出口에 到達하는 時間의 분포함수로서 설명되어진다.

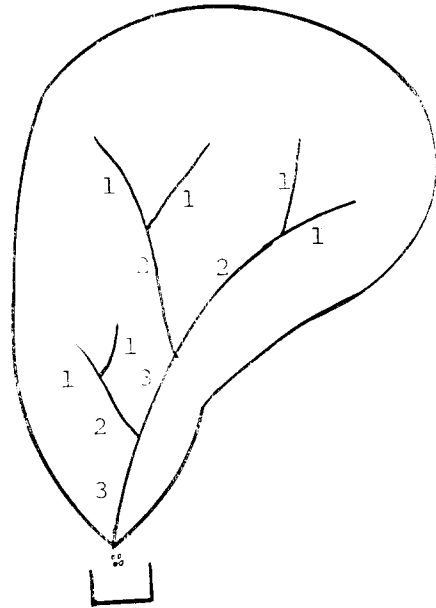


Fig. 1 Third-order Basin with Strahler's Order System and its Trapping State.

$$IUH(t) = -\frac{dV(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^t q(t) dt \dots \dots \dots (1)$$

반면에 G. IUH란, 流域에 내린 有效降雨의 時間的 경과를 임의시간 t에 降雨입자가 내린 河川次數 狀態에서의 연속 Markovian 과정으로 설명한 것으로서, 유역 출구에서의 확률적시간 분포상태를 地形法則을 포함한 應答함수로 나타낸 것이다. 「그림 2」는 3次 河川流域의 개념적 모델을 나타내며, 降雨입자가 1, 2 또는 3次 流域의 해당면적 크기내 ($A_n : \Omega$ 는 河川次數)에 내릴 때, 降雨입자는 河川流路를 통해서 出口에 到達하게 된다.

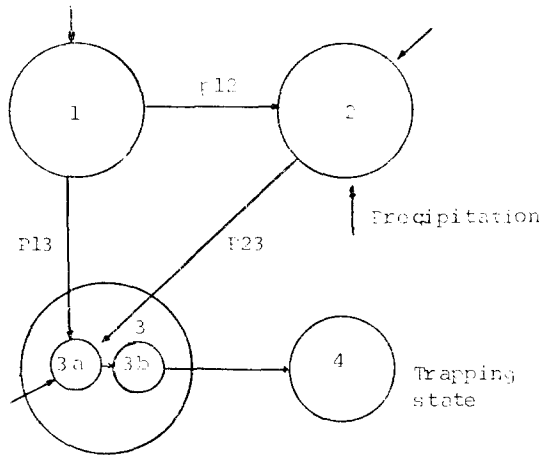


Fig. 2. Representation of a Third-order Basin as a Continuous Markovian Process.

斜面에서의 流出율 $S_i (i=1, 2, \dots, \Omega)$, 河川에서의 流出율 $C_i (i=1, 2, \dots, \Omega)$ 라 하면 3次 流域에 내린 降雨입자는 반드시 (2)식과 같은 流出경로를 따른다.

- Path 1 ; $S_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3$
- Path 2 ; $S_2 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3$
- Path 3 ; $S_3 \rightarrow C_3$
- Path 4 ; $S_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3$

「그림 2」에서 $P_{ij} (i < j ; i, j = 1, 2, \dots, \Omega)$ 란, (2)식과 같이 i次 流域에 내린 降雨입자가 j次 流域에 流入하는 과정중, 流路의 흐름을 기준으로 표현한 전이확률로서, (3)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & P_{12} & \dots & P_{1n} & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & \dots & P_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

流域에 내린 降雨입자의 動的 特性인 到達時間은 降雨입자의 流域內 지체시간을 의미하며, 이는 河川流路를 통과하는 降雨입자의 流出速度로서 정의될 수 있다. 流出速度는 河川流路의 경사, 길이, 단면적 및 조도계수 등의 因子에 의해 변화하고, 河川次數의 증가에 따라 流速이 변한다. Iturbe et al은 降雨입자가 i次 河川에서 머무르는 時間(Holding Time)을 나타내는 random 변수가 지수분포를 따른다고 가정하였으며, 이는 선형저수지 모델과 비교할 때 타당성이 있다.

이와 같이 降雨입자의 流出과정을 개념적으로 모델화하면 (4)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G. IUH &= f(\text{Basin Geomorphology, Channel Dynamic}) \\ &= f(\text{Horton's Law, Holding Time}) \\ &= f(R_A, R_B, R_L, L_n, \nu) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

여기서,

- Holding Time = Travel Time of a Water drop
- $L_n = \Omega$ 次 河川의 유로연장
- $R_B = N_i / N_{i+1} \quad i=1, 2, \dots, \Omega$; 분기비
- $R_A = \bar{A}_{i+1} / \bar{A}_i \quad i=1, 2, \dots, \Omega$; 유역면적비
- $R_L = \bar{L}_{i+1} / \bar{L}_i \quad i=1, 2, \dots, \Omega$; 하천연장비
- ν = 流出速度

따라서, 지형학적 순간단위도(G. IUH)는 무작위로 선택된 降雨입자가 出口에 到達하는 時間의 확률밀도함수로서 정의된다. Iturbe et al⁹⁾¹⁰⁾은 (4)식의 개념적 모델을 3次 河川에 적용시켜, 地形法則과 動的 因子 ν 가 고려된 G. IUH의 주요 因子인 到達율 q_p 와 到達時間 t_p 에 대한 확률밀도함수 (5), (6)식을 유도하였다.

$$q_p = \frac{1.31}{L_n} R_L^{0.45} \nu \dots \dots \dots (5)$$

$$t_p = \frac{0.44 L_n}{\nu} (R_B / R_A)^{0.55} R_L^{-0.35} \dots \dots \dots (6)$$

여기서, ν 는 流路內 흐름속도이고 (6)식은 (R_B / R_A) 의 값에 따라 변하며, Iturbe et al은 가장 적절한 값으로 0.8을 제안하였다.

2-2. 지형기후학적 순간단위도⁹⁾¹¹⁾
(Geomorphoclimatic IUH)

일반적으로 임의강도의 有效雨量 i_r 은 임의지속시간 t_r 동안 流域全域에 均等하게 내리는 것으로 가정된다. 豪雨強度 i_r 과 강우지속시간 t_r 에 따라 (5), (6)식 G. IUH의 動的 因子인 ν 는 변한다. Pilgrim⁹⁾은 강우지속시간 t_r 동안 豪雨強度 i_r 이 일정할 경우 豪雨持續期間 동안 흐름속도는 全流域을 통해서 일정하다고 하였다. Pilgrim의 가정에 흐름속도 ν 는 해석적으로 1次 流域에서의 i_r, t_r 및 流域의 地形特性으로서, 高次

河川流域의 흐름속도를 구할 수 있는 함수로 나타낼 수 있다.

반면에 降雨強度 i_r 과 降雨持續時間 t_r 의 分布는 기후의 영향을 받는 random 변수이며, 尖頭流量 q_p 와 到達時間 t_p 의 分布는 流域의 地形特性 및 i_r, t_r 의 分布로 표현되어지는 기후특성의 영향을 받는다. G. IUH 의 정의에 따르면, 洪水到達時間은 斜面에서의 流出時間을 무시하고 流路에서의 流出時間으로 정의할 수 있다. 「그림 3」은 1次 河川流域 모델이며, Eagleson¹⁹⁾ 이 流域의 到達時間 t_c 를 「그림 3」을 이용 (7)式과 같이 나타내었다.

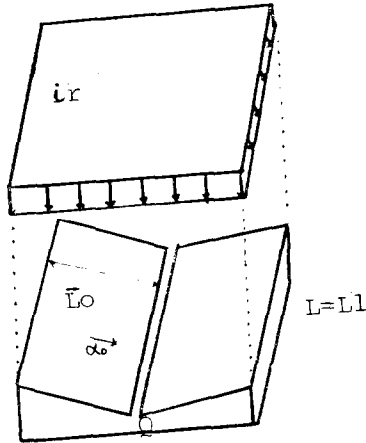


Fig. 3. Schematic of the Average First-order Subcatchment

$$t_c = \left(\frac{\bar{L}_1 \cdot i_*^{1-m_s}}{\alpha_s} \right)^{1/m_s} \dots\dots\dots(7)$$

여기서, $i_* = \frac{\bar{A}_1}{\bar{L}_1} \cdot i_r \dots\dots\dots(8)$

- α_s ; 유로의 Kinematic Wave Parameter
- m_s ; " " " = 5/3
- \bar{A}_1 ; 1次 유역의 평균면적
- \bar{L}_1 ; " 하천평균연장
- i_r ; " 균등유효강우강도
- i_* ; 단위길이당의 사면유입량
- \bar{L}_0 ; 사면폭
- α ; 사면의 Kinematic Wave Parameter

尖頭流量 q_p 는 「그림 3」에 있어서, 流路의 到達時間에 대한 降雨의 상대적 降雨持續時間 t_r 에 따라 변하며, (9)式과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} t_r < t_c; q_{max} &= \alpha_s (i_* \cdot t_r)^{m_s-1} \\ t_r > t_c; q_{max} &= \bar{L}_1 \cdot i_* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

尖頭流速은 (10)式과 같이 표현되며,

$$V_{max} = \alpha_s^{1/m_s} \cdot q_{max}^{(m_s-1)/m_s} \dots\dots\dots(10)$$

(10)式에 (9)式을 代入하면 (11)式과 같이 나타내어진다.

$$\left. \begin{aligned} t_r < t_c; V_{max} &= \alpha_s (i_* \cdot t_r)^{m_s-1} \\ t_r > t_c; V_{max} &= \alpha_s^{1/m_s} (\bar{L}_1 \cdot i_*)^{(m_s-1)/m_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

Bras et al 은 (9)~(11)式에 있어서, 降雨強度 i_r 과 降雨持續時間 t_r 의 分布가 기후특성에 따른 random 변수이기 때문에 IUH 를 Stochastic Unit Impulse Function 으로 나타내하고자 하였다. 즉 지형기후학적 순간단위도(Geomorphoclimatic IUH)의 尖頭流量 q_p 와 到達時間 t_p 는 流域의 地形因子와 기후특성因子인 i_r, t_r 分布의 영향을 받는 random 변수이다.

河川流路의 流出速度를 일정하다고 가정할 때 (Pilgrim) 流出速度 ν 는 (12)式과 같다.

$$\nu_1 = \alpha_1^{1/m_s} Q^{(m_s-1)/m_s} = \alpha_n^{1/m_s} \cdot Q_n^{(m_s-1)/m_s} = \nu_n \dots\dots\dots(12)$$

여기서

- Q_1, Q_n ; 1次 및 Ω 次 유역의 尖頭流量
- α_1, α_n ; " " kinematic wave parameter

有效雨量을 i_r 이라 하면,

$$Q_n = i_r \cdot A_n, Q_1 = i_r \cdot A_1 \dots\dots\dots(13)$$

$$\therefore \alpha_1 = \alpha_n (R_A^{n-1})^{m_s-1} \dots\dots\dots(14)$$

(9), (10)式에서 尖頭流速 ν 는 (15)式과 같다.

$$\nu = \alpha_s^{1/m_s} (i_r \cdot \bar{A}_1)^{m_s-1/m_s} \dots\dots\dots(15)$$

(15)式에서 α_s 를 유역전체에 대해 일정하다고 가정하면, $m_s = 5/3$, $\bar{A}_1 = A_n \cdot R_A^{1-n}$ 이므로 (15)式은 (16)式과 같이 된다.

$$\nu = 0.665 \alpha_n^{0.6} (i_r \cdot A_n)^{0.4} \dots\dots\dots(16)$$

임의의 유효강우강도 i_r 에 대해 (16)式을 (5), (6)式의 ν 에 代入하고 $R_B/R_A = 0.8^{4/3}$ (assumed)을 적용시키면, 지형기후학적 IUH 의 尖頭流量 q_p 와 到達時間 t_p 는 (17), (18)式과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_p = 0.871 / \Pi_i^{0.4} \dots\dots\dots(17)$$

$$t_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} \dots\dots\dots(18)$$

여기서,

$$\Pi_i = L_n^{2.5} / i_r \cdot A_n \cdot R_L \cdot \alpha_n^{1.5} \dots\dots\dots(19)$$

3. 선형저수지 모델

流域의 有效雨量에 대한 出口에서의 직접유출량을 나타내는 고전적 순간단위도는 Lumped System, Linearity and Time Invariance 의 3가지 가정하에 성립한다. 가장 일반적인 IUH에 대한 형태는 2변수 감마 확률밀도함수로 정의되는 Nash Model²⁰⁾인 선형 저수지 모델로서 (20)式과 같다.

$$h(t) = [k\Gamma(m)]^{-1} (t/k)^{m-1} \exp(-t/k) \dots\dots\dots(20)$$

여기서,

- $h(t)$; 충격 응답함수(IUH), (T^{-1})
- m ; 형상계수, (m_2^{-1})
- k ; 저유계수, $(t_L/\alpha, T)$
- t_L ; 지체시간, (T)
- m_2 ; IUH의 면적중심에 대한 무차원 2차 모멘트

$\Gamma(\cdot)$; Gamma 함수

IUH(Nash Model)의 physical factor는 유량관측 자료 부족으로 직접 정의할 수 없어, Nash²⁾(1960年)에서 Rosso(1983年)¹³⁾¹⁴⁾에 이르기까지 간접적으로 결정하는 방법이 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다.

1982年 Sukekawa^{17~19)}는 (20)式的 2개 因子인 형상계수 m 와 저유계수 k 를 「그림 4」와 같은 IUH를 사용해서 (21)式과 같이 정의하였다.

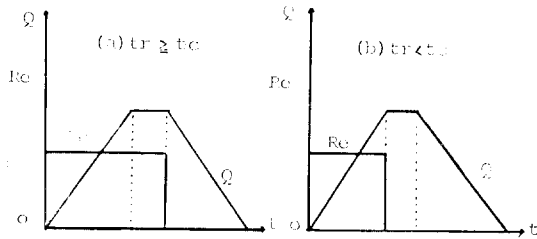


Fig. 4. Relationship of M&Tc

$$k = M/m = t_c/2m \dots\dots\dots(21)$$

여기서,

- k ; 저유계수
- m ; 형상계수
- t_c ; 도달시간

(21)式에서 到達時間 t_c 는 (7)式과 같이 Eagleson¹⁾이 1次 流域에 대해 Kinematic Wave Theory를 이용하여 나타낸 (22)式과 같다.

$$\left. \begin{aligned} t_r > t_c; t_c &= (L/\alpha R_e^{2/3})^{3/5} \\ t_r < t_c; t_c &= t_r + 3/5\alpha \\ & (L - \alpha R_e^{2/3} t_r^{5/3}) / (R_e \cdot t_r)^{2/3} \end{aligned} \right\} \dots\dots(22)$$

여기서,

- L ; 사면길이
- R_e ; 유효우량
- α ; $\sqrt{\sin \theta/N}$
- t_r ; 강우제속시간
- N ; 유역사면의 등가조도

유효우량을 $R_e(t)$, 유역면적을 A 라 할 때 流域斜面의 流出量 $Q(t)$ 는 (23)式과 같다.

$$Q(t) = A \cdot \int_0^t (h-\tau) R_e(\tau) d\tau \dots\dots\dots(23)$$

여기서, IUH $h(t-\tau)$ 의 형상계수 m 는 水文曲線의 형상에 영향을 미치며, $m=1\sim 4$ 일 때 강우제속시간 t_r 및 연속유효우량 R_e 에 대한 직접유출 水文曲線은 (24)~(27)式과 같다.

$m=1$ 의 경우

$$\left. \begin{aligned} t \leq t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(2 \frac{t}{t_c}\right) - 1 \right] \\ & \exp\left(-2 \frac{t}{t_c}\right) \\ t > t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(2 \frac{t_r}{t_c}\right) - 1 \right] \\ & \exp\left(-2 \frac{t}{t_c}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

$m=2$ 의 경우

$$\left. \begin{aligned} t \leq t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(4 \frac{t}{t_c}\right) - 4 \frac{t}{t_c} - 1 \right] \exp\left(-4 \frac{t}{t_c}\right) \\ t > t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(4 \frac{t_r}{t_c}\right) \left(4 \frac{t-t_r}{t_c} + 1\right) - \left(4 \frac{t}{t_c} + 1\right) \right] \cdot \exp\left(-4 \frac{t}{t_c}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(25)$$

$m=3$ 의 경우

$$\left. \begin{aligned} t \leq t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(6 \frac{t}{t_c}\right) - 18 \left(\frac{t}{t_c}\right)^2 - 6 \left(\frac{t}{t_c}\right) - 1 \right] \exp\left(-6 \frac{t}{t_c}\right) \\ t > t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(6 \frac{t_r}{t_c}\right) \left\{ 18 \left(\frac{t-t_r}{t_c}\right)^2 + 6 \frac{t-t_r}{t_c} + 1 \right\} - \left\{ 18 \left(\frac{t}{t_c}\right)^2 + 6 \frac{t}{t_c} + 1 \right\} \right] \exp\left(-6 \frac{t}{t_c}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(26)$$

$m=4$ 의 경우

$$\left. \begin{aligned} t \leq t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(8 \frac{t}{t_c}\right) - \frac{256}{3} \left(\frac{t}{t_c}\right)^3 - 32 \left(\frac{t}{t_c}\right)^2 - 8 \frac{t}{t_c} - 1 \right] \cdot \exp\left(-8 \frac{t}{t_c}\right) \\ t > t_r; Q(t) &= A \cdot R_e \left[\exp\left(8 \frac{t_r}{t_c}\right) \left\{ \frac{256}{3} \left(\frac{t-t_r}{t_c}\right)^3 + 32 \cdot \left(\frac{t-t_r}{t_c}\right)^2 + 8 \frac{t-t_r}{t_c} + 1 \right\} - \left\{ \frac{256}{3} \left(\frac{t}{t_c}\right)^3 + 32 \left(\frac{t}{t_c}\right)^2 + 8 \frac{t}{t_c} + 1 \right\} \right] \exp\left(-8 \frac{t}{t_c}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(27)$$

여기서, (22)식의 到達時間 t_c 를 高次 河川에 대해 정의하면, (23)식 및 (24)~(27)식은 河道流出의 水文曲線으로서 「그림 5」와 같은 의미를 가진다.

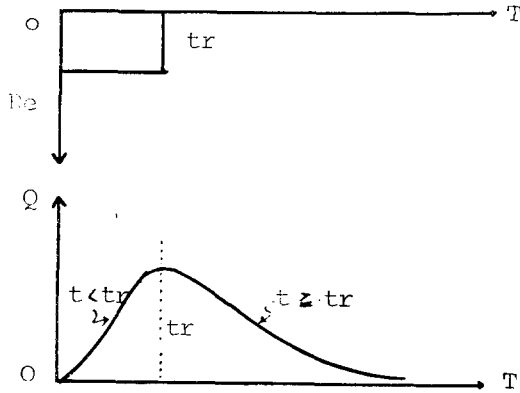


Fig. 5. Hyetograph and Hydrograph

4. 降雨-流出 모델의 구성

기존 선형저수지 모델의 순간단위도에 있어서 physical factors 결정에 流域特性因子나 지체시간 등의 상관해석 방법으로 여러가지 측면에서 연구하였으나 좋은 결과를 얻지 못하였다.

최근 1979 Itrube et al.²²⁻²³⁾이 定量的 地形學 値로서 水文應答함수를 구성하여 G. IUH를 유도함으로써 降雨-流出 解析에 새로운 전기를 마련하였다. Gupta

al은 Strahler's Ordering Scheme은 이 水文應答解析에 있어서 하천기하학을 표현하는 가장 적합한 방법이 아님을 주장한 바 있으나, Rosso²⁴⁾는 Horton 法則을 이용해서 Nash Model의 physical factor인 형상계수와 저유계수를 구하는 방법을 제시하고 그 적용성을 보였다. 또 Rosso et al.²⁵⁾은 연구를 통해 지형기후학적 IUH는 감마분포의 IUH나 Strahlering Scheme보다 더 개선된 하천기하학의 표시법에 의해 더욱 발전된 연구가 수행될 수 있을 것으로 전망하였다.

Sukekawa¹⁷⁻¹⁹⁾는 1次 河川流域 모델에서 「그림 3」과 같은 사다리꼴 단위도를 이용 Eagleson이 Kinematic Wave Theory로서 유도한 (22)식의 到達時間 t_c 로서, 유역분할법에 의해 高次河川의 流出應答함수를 재현시켰다. 반면에 Bras et al.²²⁾은 지형기후학적 IUH 유도에서 삼각형 단위도를 이용, Horton 法則과 Pilgrim이 제시한 流域內 流出速度가 流域全體에 걸쳐 일정하다는 가정으로, 高次河川의 IUH에 대한 尖頭流量 q_p 와 到達時間 t_p 를 (17), (18)식과 같이 정의하였다.

降雨-流出解析의 궁극적 목적이 尖頭流量과 尖頭流量 發生時間을 구하는데 있다고 할 때 사용되는 단위도의 型은 그다지 중요하지 않다. 그러나 삼각형²⁰⁾ 단위도에서 감수곡선을 「그림 6」의 (a), (b)로 가정하고 합리식으로 비교하면, 단위도 (a)의 尖頭流量은 $q_p = CiA$, 단위도 (b)의 尖頭流量은 $q_p = 0.75 CiA$ 가 된다.

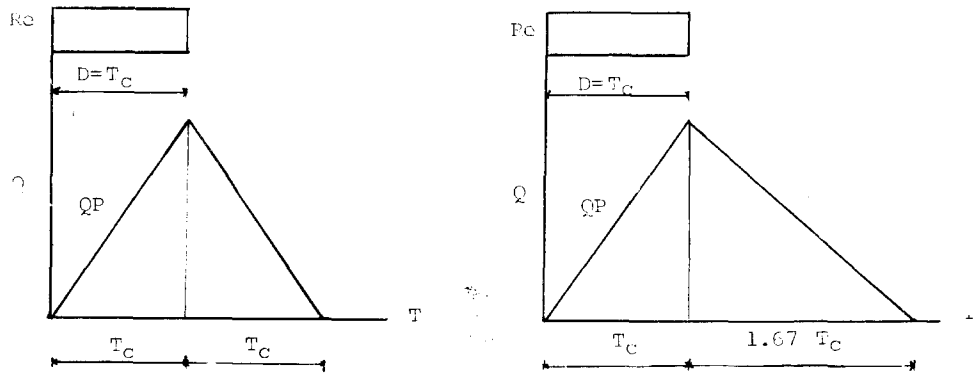


Fig. 6. Triangular Runoff Hydrograph

이와 같은 경우 감수곡선은 尖頭流量의 크기에 영향을 미치게 되며, 水文應答을 재현하면서 到達時間이나 尖頭流量을 얻는 것이 보다 합리적이라 사료된다. 「그림 7」과 같이 단위도를 정의하면 到達時間 t_c 는 단위도의 型에 관계없이 동일한 값으로 나타내어진다.

따라서, Sukekawa의 선형저수지 洪水流出모델 et

에 있어서 到達時間 t_c 의 결정을 Bras et al이 지형기후학적 IUH에서 제시한 到達時間 t_p 의 공식으로 하게 되면, Sukekawa 流出모델은 지형기후학적 이론을 이용한 降雨-流出 모델로서 Ω 次 河川流出의 水文應答을 효과적으로 재현시킬 수 있는 간편한 모델이 된다. 삼각형 IUH에서 유효강우강도 i_r 가 일정할 경우

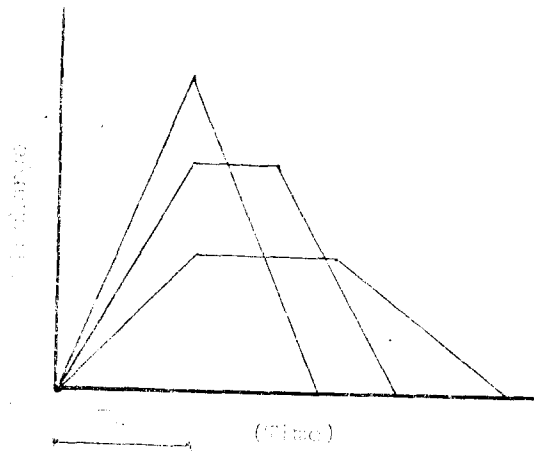


Fig. 7. Family of Hydrograph

Itrube et al^{3)~5)}는 流出水文曲線의 洪水到達時間 T_p 를 (28)式과 같이 나타내었다.

$$T_p = t_p + 0.75t_r \dots\dots\dots(28)$$

여기서, t_p : (6)式

t_r : 강우지속시간

Bras et al⁹⁾은 지형기후학적 이론에서 유도한 (18)式으로 (29)式과 같이 정의하였다.

$$T_p = 0.585 \Pi_i^{0.44} + 0.75t_r \dots\dots\dots(29)$$

여기서 Π_i 는 (19)式과 같다. T_p 는 기저시간을 t_b 라 할 때 $t_r < t_b$ 에서 정의되고 보다 장시간의 강우일 경우 $T_p = t_b$ 가 된다.

5. 적용예 및 검토분석

본 연구의 수치예를 위하여 사용된 資料는 1976 IHP 보고서²¹⁾에 수록된 경안천 및 무심천 대표시험유역과 1982 IHP 보고서²²⁾에 수록된 평창강, 보청천 및 위천 대표유역의 것이다. 경안천 및 무심천 流域은 流域面積이 9.2 km² 및 20 km²이며, 流路延長은 5.3 km 및 5.5 km이다. 보고서의 分析에 따르면 Horton의 地形法則이 적용되는 지역으로서 4次 河川으로 투수성이 높은 산지 소유역이다. 경안천, 무심천 대표시험유역은 트사의 이동 등에 따른 관측시설의 과도한 변동으로 효과적인 관측을 수행하지 못하여 신뢰성있는 流量의 관측자료가 거의 없다. 본 이론의 타당성을 얻기 위해 많은 지점의 관측자료가 필요하며, 1976 IHP 보고서에 수록된 최초의 관측자료의 신뢰성을 인정하고 資料로 채택하였다.

남한강 水系의 평창강, 금강 水系의 보청천 및 낙동

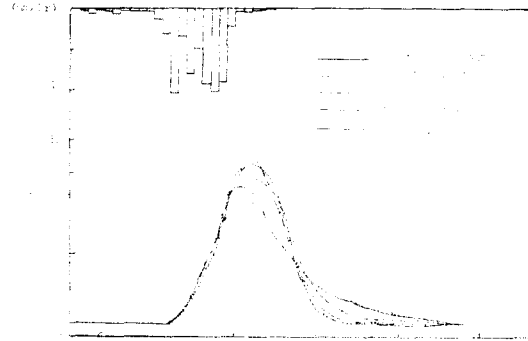


Fig. 8. Comparison of Predicted and Observed Peak Discharge for the Kyung-an River Basin.

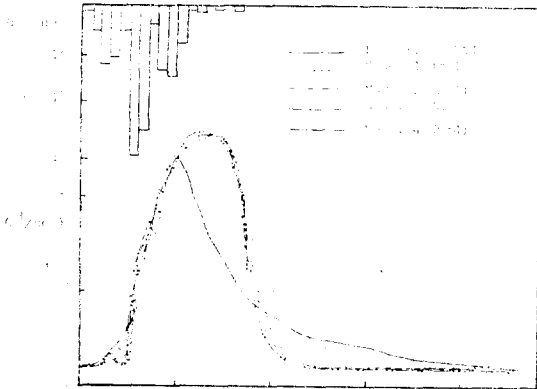


Fig. 9. Comparison of Predicted and Observed Peak Discharge for the Musim River Basin.

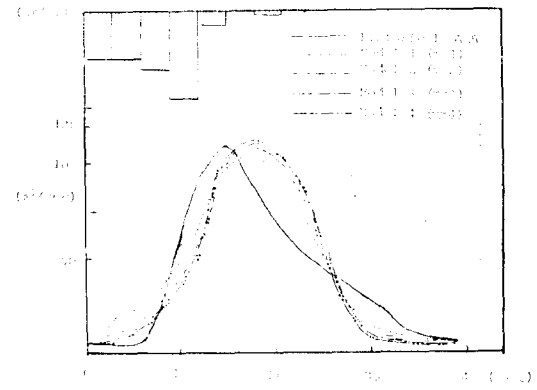


Fig. 10. Comparison of Predicted and Observed Peak Discharge for the Wi River Basin.

강 水系의 위천 대표유역은 流域面積이 692.2 km², 482.6 km² 및 472.5 km²이고, 流路延長이 77.2 km, 53.9 km 및 42.83 km이다. 보고서에 수록된 地形法則의 分析결과에 의하면 Horton의 地形法則이 잘 적용

표 1. 관측치와 계산치의 비교

유역	구분 발 년월일	유역면적 (km ²)	하천 연장비	α	저수지수 (m)	첨두유량 (관측치 : m ² /sec)	도달시간 (관측치 : hr)	첨두유량 (계산치 : m ² /sec)	도달시간 (계산치 : hr)
무심천	76/8/27	20.	0.417	0.13	1	11.0	10	10.773	15
				0.35	2			12.112	14
				0.46	3			12.312	14
				0.53	4			12.373	13
	76/8/24	"	"	0.012	1	9.3	15	11.076	23
				0.011	2			10.688	20
				0.011	3			11.589	25
				0.011	4			11.379	26
경안천	76/8/26	9.2	0.876	0.04	1	8.18	8	7.276	11
				0.07	2			8.999	11
				0.09	3			9.969	10
				0.1	4			10.457	10
	76/8/2	"	"	0.04	1	17.88	9	13.055	13
				0.06	2			14.088	13
				0.18	3			15.782	12
				0.08	4			15.850	12
평창강		140.45	0.225	0.07	1	134.9	18	146.465	24
				0.07	2			142.073	24
				0.07	3			135.514	24
				0.07	4			123.970	24
		92.93	0.225	0.31	1	57.5	27	51.053	30
				1.0	2			53.753	30
				1.0	3			54.290	30
				1.0	4			54.628	30
보청천		351.58	0.391	0.03	1	65.0	21	67.032	19
				0.04	2			61.492	15
				0.07	3			107.756	15
				0.07	4			127.241	15
위천		302.125	0.457	1.0	1	105.68	15	97.854	18
				1.0	2			104.436	18
				1.0	3			107.731	18
				1.0	4			109.583	18

되는 5次的 山地河川 流域이다.

流量관측은 1982년도부터 수행되었으며, 현재 1982년도의 보고서만 입수한 관계로 82년도 資料의 分析으로 한정하였다.

水文曲線 解析을 위한 有效雨量의 산정은 Φ -index 방법을 사용하였고 본 방법의 적용성을 위해 실측치와 비교한 것이 「그림 8, 9, 10」이다. 분석자료에 대한 결과

의 비교가 「표 1」과 같다.

6. 結 論

本 研究는 지형기후학적 이론을 선형저수지 모델에 適用시켜 하천기하학등의 地形法則을 水文應答의 직접 변수로 결합시키고자 하였다. 이를 위하여 Bras et al

의 지형기후학적 순간단위도 이론을 Sukekawa의 洪水流出 모델에 適用시키는 方法을 利用하였다. 本研究의 實用性을 檢討하기 위하여 한강수계의 경안천, 평창강과 금강수계의 보청천, 무심천 및 낙동강수계의 위천 대표시험유역의 時間流量資料를 適用하였으며 얻어진 結果는 다음과 같다.

(1) 지형기후학적 순간단위도 이론을 선형저수지 모델에 적용시켜 地形因子를 變數로 結合시킨 水文應答函數를 구성하였으며, 실측치와 비교한 결과 재현성이 높았다.

(2) 流域을 $m(1\sim 4)$ 개의 저수지로 가정할 때 저수지數에 따라 단위도의 특성이 달라지며, 分析結果 $m=2$ 인 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

(3) 流域面積의 大小에 따라 저수지 數가 결정되는 것이 아닌 것으로 판단되며, 河川次數 等에 따라 그 기준이 결정될 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 流域內의 等價粗도가 土地利用狀態 등에 따라 규정될 수 있으면, 都市化에 따른 水文應答變化를 적절히 재현할 수 있다.

(5) 河川水系網이나 地相學의 特性을 표현하는 하천기하학적 표현 方法이나 地形法則의 개발에 따라, 물리적 특성이 고려된 水文應答函數를 구성할 수 있다.

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) P.S. Eagleson ; "Dynamic Hydrology" McGraw-Hill, 1970.
- 2) V.T. Chow ; "Handbook of Applied Hydrology" McGraw-Hill 1964.
- 3) I.R. Itrube and J.B. Valdes ; "The Geomorphologic Structures of Hydrologic Response" Water Resources Research Vol.15, No. 6, pp. 1409~1420, 1979.
- 4) J.B. Valdes et al ; "A Rainfall-Runoff Analysis of the Geomorphologic IUH" Water Resources Research Vol.15, No. 6, pp. 1421~1434, 1979.
- 5) I.R. Itrube et al ; "Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interrelation Between the Geomorphologic IUH and the Storm

- Characteristics" Vol. 15, No. 6 ; pp. 1435~1444, 1979.
- 6) C.T. Wang et al. ; "A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph From Geomorphology" Water Resources Research, Vol.16, No. 5, pp. 855~862, 1980.
- 7) V.K. Gupta et al. ; "A Geomorphologic Synthesis of Nonlinearity in Surface Runoff" Water Resources Reserach, Vol.17, No. 3, pp. 545~554, 1981.
- 8) C. Hebson et al. ; "A Derived Flood Frequency Distribution Using Horton Order Ratios" Water Resources Research, Vol.18, No. 5, pp. 1509~1518, 1982.
- 9) R.L. Bras et al. ; "A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph" Water Resources Research, Vol.18, No. 4, pp. 877~886, 1982.
- 10) I.R. Itrabe et al. ; "On the Climatic Dependence of the IUH: A Rainfall-Runoff Analysis of the Nash Model and the Geomorclimatic Theory" Water Resources Research, Vol.18, No. 4, 887~903, 1982.
- 11) E.D. Waymire et al. ; "On the Formulation of an Analytical Approach to Hydrologic Response and Similarity at Basin Scale" Journal of Hydrology, 65, pp. 951~123, 1983.
- 12) R.L. Bras et al. ; "The Linear Channel and Its Effect on the Geomorphologic IUH" Journal of Hydrology, 65, pp. 175~208, 1983.
- 13) R.Rosso et al. ; "Nash Model Relation to Horton Order Ratio" Water Resources Research Vol. 20, No. 7, pp. 914~920, 1984.
- 14) R.Rosso ; "Salla Taratura Della Risposta Inrolgia in base Ar Caratteri Morfologici Della Rete Idrografica" Idrotecnica, 1, pp. 19~27, 1983.
- 15) J.R. Cordova et al ; "Geomorphoclimatic Estimation on Extreme Flow Probabilities" Journal of Hydrology, 65, pp. 159~173, 1983.
- 16) E.D. Wood et al ; "Catchment Geomorphology and the Dynamics of Runoff Contributing Areas" Journal of Hydrology, 65, pp. 139~158, 1983.
- 17) 鮮川登, 北川善廣 ; "都市化流域의 洪水流出モデル" 日本土木學會論文集, 第325號, pp. 51~59, 1982.
- 18) 鮮川登, 北川善廣 ; "線形貯水池モデルに基づく流

- 出解析法”第27回水理講演會論文集, pp. 29~35, 1983.
- 19) N.Sukekawa and Y.Kitagawa : “*A Rainfall-Runoff Model for Assessing the Effects of Urbanization on Flood Runoff*” Transactions of JSCE, Vol.14, pp. 214~216, 1982.
- 20) M.P.Wanielista, ; “*Stormwater Management, Quantity and Quality*” ANN ARBOR SCIENCE, 1978.
- 21) 건설부 ; “國際水文開發計劃 (IHP) 代表流域研究調查報告書” 1976, 1982.