

<論 文>

小流域의 洪水流出計算을 위한 單一 線型貯水池 模型의 適用

Application of A Single Linear Reservoir Model for
Flood Runoff Computation of Small Watersheds

金 哉 螢*

Kim, Jae Hyung

尹 龍 男**

Yoon, Yong Nam

Abstract

The purpose of this study was to investigate the applicability of Single Linear Reservoir (SLR) model for runoff computations of small river basins in Korea.

In the existing watershed flood routing methods the storage coefficient (K), which is the dominant parameter in the model, has been proposed to be computed in terms of the watershed characteristics. However, in the present study, the rainfall characteristics in addition to the watershed characteristics were taken into account in the multiple regression analysis for more accurate estimation of storage coefficient. The parameters finally adopted for the regressions were the drainage area, mean stream slope of the watershed, and the duration and total effective amount of rainfalls.

To verify the applicability of SLR model the computed results by SLR model with K determined by the regression equation were compared with the observed hydrographs, and also with those by other runoff computation methods; namely, the Clark method, Nakayasu's synthetic unit hydrograph method and Nash model. The results showed that the present SLR model gave the best results among these methods in the case of small river basins, but for the watersheds with significant drainage area the Clark method gave the best results.

However, it was speculated that the SLR model could also be accurately applied for flood computation in large watersheds provided that the regression for storage coefficients were made with the actual data obtained in the large river basins.

要 旨

本 研究는 小河川流域으로 부터의 洪水流出計算을 위한 單一 線型貯水池 模型의 適用 妥當性을 調査하기 위한 것이다. 지금까지의 流域追跡模型에서는 模型의 支配變數인 貯溜常數(storage coefficient)를 流域特性因子와의 相關關係式으로 부터 결정하여 사용하는 것이 보통이었으나 本 研究에서는 流域特性因子 뿐만 아니라 降雨特性因子도 相關關係에 포함시켜 複合回歸分析으로 關係式을 얻어 貯溜常數를 결정할 수 있도록 하였다. 複合回歸式에 의해 계산된 貯溜常數를 사용하여 單一 線型貯水池 模型으로 計算한 洪水流出水文曲線을 實測 水文曲線과 비교함으로써 單一 線型貯水池 模型의 妥當性을 검토하였으며 其他 流出模型인 Clark 方法, Nash 模型 및 Nakayasu의 綜合單位 圖法에 의한 洪水流出計算方法 等에 의한 結果와도 비교 검토 하였다.

* 高麗大學校

** 高麗大學校 工大 教授

本研究의 결과로 單一線型貯水池 模型은 流域面積이 작은 경우에 대체로 정확한 결과를 주나 流域面積이 커지면 正確性이 떨어지고 오히려 Clark 方法에 의한 流出計算이 實測值에 더 가까운 결과를 줄 수 있을 것이다. 그러나 前述한 바 貯溜常數를 위한 複合回歸式을 排水面積이 큰 流域의 資料로 부터 導出하여 사용하면 큰 流域의 洪水流出 計算을 위해서도 單一線型貯水池 模型을 適用할 수 있을 것으로 판단되었다.

1. 序 論

流出-貯溜에 대한 연구는 여러 학자들에 의하여 많은 진보를 가져왔다.

Zoch⁽¹⁾는 土壤內에서의 임의시각에 있어서 流出率은 그 시각에 있어서의 토양내에 남아있는 貯溜量에 비해 한다고 보아 單一線型貯水池로 가정하였다.

그 후 Clark⁽²⁾는 河道貯溜를 單一線型貯水池로 가정하여 時間-面積 曲線의 追跡결과로부터 瞬間單位流量圖(instantaneous unit hydrograph, IUH)를 유도하였다.

그 후 Dooge⁽³⁾와 Nash⁽⁴⁾ 등은 單一線型貯水池를 n 개의 線型貯水池 系列로 보는 Nash 模型을 제안하였으나 계산상의 正確도와 간편성 때문에 單一線型貯水池 模型(Single Linear Reservoir Model, SLR)의 사용이 더 활발하였다.^(5,6,7,8,9,10,11,12)

本研究에서는 SLR 모형에 있어서의 單一變數인 貯溜常數 K 의 보다 正確한 산정에 중점을 두었으며 이를 위하여 流域의 特性因子와 降雨의 特性因子들을 고려한 多重回歸分析을 실시하였다. 회귀 분석에는 漢江水系에서 운영되어온 建設部의 國際水文開發計劃(International Hydrological Program, IHP) 代表試驗流域인 半月 1, 2號 流域 및 平昌江의 상안미, 백옥포, 장평리, 이목정 流域과 錦江水系에서 운영되었던 無心川代表流域等 7個 小流域의 資料를 사용하였다.

SLR 모형의 妥當性を 검증하기 위해 회귀분석에 포함되지 않은 漢江水系의 慶安川 代表流域과 분석에 포함된 平昌江의 小流域인 백옥포 流域의 자료에 회귀분석된 식으로부터 구한 K 를 적용하여 適用性을 검토하였으며 동시에 잘 알려진 Nash 模型, Clark 方法, Nakayasu(中安)의 綜合單位圖法⁽¹³⁾을 위의 두 流域의 자료에 적용하여 SLR 模型의 결과와 비교 분석하였다.

2. 理論的 背景

2.1 單一線型 貯水池 模型

線型貯水池 概念으로부터

$$S = KQ \dots\dots\dots (1)$$

水文學的 連續方程式은

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

식 (1), (2)로부터

$$I - Q = K \cdot \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, K =貯溜常數(hr), I =流入量(有効雨量), Q =流出量, S =貯溜量을 각각 나타내주고 있다.

식 (3)을 적분하고 $Q=0$ ($t=0$ 일 때)를 이용하면

$$Q(t) = I(t) \cdot (1 - e^{-t/k}) \dots\dots\dots (4)$$

有効雨量이 끝나는 시간, 즉, $t=t_R$ 일때의 流出量을 Q^* 라고 하면 식 (3)은

$$-Q = K \cdot \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

와 같이 되고, 여기서 $t'=t-t_R$ 이다. 初期條件($t'=0$ 일때 $Q=Q^*$)를 적용해서 식 (5)를 적분하면

$$Q(t') = Q^* \cdot e^{-t'/k} \dots\dots\dots (6)$$

식 (4)와 (6)은 각각 流出水文曲線의 상승부와 하강부의 각 시각별 증거를 나타낸다.

流入量 I 가 순간적으로($t_R=0$) 貯水池의 貯溜量 S^* 를 채우는 경우에는 식 (1)과 (6)을 결합시키면

$$S^* = KQ^*, \quad Q^* = \frac{S^*}{K}$$

$$Q(t) = \frac{S^*}{K} \cdot e^{-t/k} \dots\dots\dots (7)$$

單位流入量 또는 單位貯溜量($S^*=1$)에 대한 瞬間單位流量圖는 다음과 같다. 즉,

$$h(t) = \frac{1}{K} \cdot e^{-t/k} \dots\dots\dots (8)$$

單位流入量 I 에 대한 持續時間 Δt 의 單位水文曲線은 식(4)와 (6)에 의해서 산정가능하며, 또한 식(4)를 만족시킬 수 있는 조건인 Δt -hr 單位流量圖의 초기증거를 0으로 하고 지속시간 Δt 가 單位流量圖의 定義를 가질 수 있도록 충분히 작다면 IUH의 적용에 의해서도 산정이 가능하다.

한편, 식 (2)는 다음과 같은 형태로 바꿔볼 수 있다.

$$\frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} \dots\dots\dots (9)$$

식 (1)과 (9)를 결합하고 정리하면

$$Q_2 = \frac{\Delta t}{2k + \Delta t} (I_1 + I_2) + \frac{2k - \Delta t}{2k + \Delta t} \cdot Q_1$$

$$= C_1(I_1 + I_2) + C_2 Q_1 \dots\dots\dots (10)$$

여기서, 첨자 1, 2 는 각각 區間 Δt 의 始點과 終點을 나타내며

$$C_1 = \frac{\Delta t}{2k + \Delta t} \dots\dots\dots(11)$$

$$C_2 = \frac{2k - \Delta t}{2k + \Delta t} \dots\dots\dots(12)$$

有效雨量柱狀圖의 모양은 막대그래프의 형태(즉, 平均 縱距의 형태)로 나타내어지므로 막대그래프의 時間區間을 持續時間 Δt 로 선정한다면 식(10)에서 $I_1 = I_2$ 이며 식(10)은 다음과 같이 된다. 즉,

$$Q_2 = 2 C_1 I_2 + C_2 Q_1 \dots\dots\dots(13)$$

식 (11~13)은 SLR 모형을 적용하기 위하여 실제로 사용하는 식들이며, 이 식들에 의한 결과는 식(4)와 (6)에 의해서 산정한 결과와 같은데 식(4)와 (6)에 의해서 구하는 것보다 손쉽게 구할 수가 있다.

2.2 Nash 模型

이 模型은 유역이 식 (1)을 만족시키는 n 개의 線型 貯水池로 構成되어 있다고 가정하였다. 첫번째 貯水池가 瞬間的으로 滿水되어 두번째의 貯水池로 流出되고, 두번째 貯水池로부터 세번째 貯水池로 流出되고 이와 같은 과정을 계속해서 마지막 n 번째 貯水池를 통과하는 流出量이 그 流域出口에서의 流出量이라고 생각하고 流出量을 구하면,

$$Q_n = \frac{1}{K_n \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K_n}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/K_n} \dots\dots\dots(14)$$

여기서, $T(n)$ 은 n 의 Gamma function 이며 식(14)는 n 개의 線型貯水池를 통해 追跡하여 얻은 瞬間單位流量圖의 縱距를 나타내어 주게 된다.

식(14)에 의한 계산을 위해서는 K_n 과 n 을 구해야 하는데 근사적으로 다음 식(15)의 관계를 따르므로 이 관계를 이용하여 試行錯誤的으로 특정 유역의 實測 降雨-流出 資料에 적용시켜 가장 알맞는 K_n, n 를 선정하여 그 流域에 적용할 수 있다. 즉,

$$T_L = K_n \cdot n \dots\dots\dots(15)$$

여기서, T_L = 遲滯時間(hr)이다.

2.3 Nakayasu(中安)의 綜合單位圖法

이 方法은 降雨-流出 資料가 없는 地點에 대해 그 流域의 特性因子들을 사용하여 單位圖를 合成하고 이를 이용하여 設計洪水水文曲線 또 尖頭洪水流量을 決定하는 방법이다.

Nakayasu 綜合單位圖는 上昇部와 下降部로 나누어서 작도되는데 持續時間 t_0 (hr)인 R_0 (mm)의 有效雨量으로 인한 單位圖는 다음식에 의해서 결정된다. 즉,

上昇部 曲線, $Q/Q_P = (t/t_p)^{2.4} \dots\dots\dots(16)$

下降部 曲線,

$0.3 \leq Q/Q_P \leq 1.0$ 일때,

$$Q/Q_P = (0.3) \frac{t-t_p}{t_k} \dots\dots\dots(17)$$

$(0.3)^2 \leq Q/Q_P \leq 0.3$ 일때,

$$Q/Q_P = (0.3) \frac{t-t_p+0.5t_k}{1.5t_k} \dots\dots\dots(18)$$

$Q/Q_P \leq (0.3)^2$ 일때,

$$Q/Q_P = (0.3) \frac{t-t_p+1.5t_k}{2t_k} \dots\dots\dots(19)$$

여기서, Q_P 는 尖頭流量을 의미하며 單位圖 아래의 總面積, 즉, 直接流出容積은 總有效雨量 $0.2778 R_0 A$ 와 같다는 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_P = \frac{0.2778 R_0 A}{0.3t_p + t_k} \dots\dots\dots(20)$$

여기서 尖頭流量 到達時間인 t_p , 遲滯時間 t_g 와 減水時間 t_k 를 구하는데 Nakayasu 는 流域特性因子와 연관시켜 다음과 같은 식들을 제안하였다.

$$t_g = 0.21 L^{0.7} (L < 15 \text{ km}) \dots\dots\dots(21)$$

$$t_g = 0.4 + 0.058 L (L \geq 15 \text{ km}) \dots\dots\dots(22)$$

$$t_k = 0.47 (AL)^{0.25} \dots\dots\dots(23)$$

$$t_p = 0.8 t_0 + t_g \dots\dots\dots(24)$$

여기서 A = 流域面積(km²), L = 最長流路延長(km)이다.

2.4. Clark 方法

이 方法은 우선 時間-面積 曲線을 設計雨量柱狀圖에 적용하여 流入水文曲線을 얻게 되는데 다음의 식에 의한다. 즉,

$$I_i = 0.2778 \sum_{i=1}^n R_i A_i \dots\dots\dots(25)$$

식(25)에서 구한 I_i 가 流域의 流出口 地點에 위치하는 假想的 貯水池에 流入된다고 보고 식(11)~(13)에 의해서 貯水池追跡을 하여 流出水文曲線을 얻는 方法으로 貯溜常數 K 의 결정을 위해 Clark⁽¹²⁾와 Linsley⁽¹⁴⁾는 다음식을 각각 제안하였다. 즉,

$$K = \frac{cL}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(26)$$

$$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(27)$$

여기서, K = 貯溜常數(hr), L = 最長流路長(km), A = 流域面積(km²), S = 平均河床傾斜이며, c 와 b 는 常數로서 각각 0.5~1.4, 0.01~0.03 의 값을 갖는다.

2.5. SCS 方法에 의한 有效雨量의 算定

이 方法은 美國의 土壤保全局⁽¹⁵⁾(U.S. Soil Conservation Service, SCS)에서 開發한 것으로 遮斷, 地面貯溜, 浸透모형들을 전부 연결시켜 하나의 모형으로 만든 것으로 蒸發散을 제외한 모든 損失을 하나의 初期損失로 고려하는 모형이다.

이 方法에서는 流出數(CN)을 導入하여 降雨-直接

流出 관계를 土壤의 種類, 土地利用狀態, 水文學的 條件의 函數로 표시해준다. 실제로 有效雨量을 산정하는데 SCS에서 채택하고 있는 식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \dots\dots\dots(28)$$

여기서 Q=有效雨量(mm), P=總雨量(mm)이며 S는 流域保溜水量(mm)으로 다음 식에 의해서 구한다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots\dots\dots(26)$$

여기서 CN은 平均流出數로 土壤의 種類, 土地利用狀態 및 水文學的 條件에 의해 결정된다.

2.6 貯溜常數 K의 決定方法

SLR模型에 있어서 變數는 K 밖에 없으므로 이 모형의 적용에 있어 가장 중요한 點은 精確한 K의 결정이다. 일반적으로 K는 遲滯時間 TL과 같다고 보아지고 있으며 TL을 구하는데는 다음과 같이 方法들이 있다.

1) $K = TL_1 \dots\dots\dots(30)$

여기서, TL1=有效雨量의 重心과 直接流出量 重心사이의 時間差(hr)이다.

2) $K = TL_2 \dots\dots\dots(31)$

여기서, TL2=有效雨量의 重心과 尖頭流量 發生時間과의 時間差(hr)이다.

3) $K = TL_3 = \alpha \cdot q_m^2 \dots\dots\dots(32)$

이 方法은 Boyd et al⁽¹⁶⁾에 의해 제안된 方法으로 TL1과 平均直接流出量(qm: mm/hr)을 各流域에 相關시켜 TL1을 간단히 구하는 方法이다.

여기서, $q_m = P_E / T_D \dots\dots\dots(33)$

여기서, PE(mm)=總直接流出量이며 TD(hr)=直接流出 基底時間이다.

4) $K = T_{Lm} \dots\dots\dots(34)$

여기서, T_{Lm}(hr)=各 流域의 平均遲滯時間이다.

3. 資料

本 分析에 사용된 資料는 建設部의 IHP 代表試驗流域 調查報告書¹⁷⁾로부터 얻어졌으며 前述한 바와 같이 分析에 사용된 代表試驗流域은 半月 1號와 2號流域, 錦江의 無心川流域 및 平昌江의 上安米, 백옥포, 장평리, 이목정 등의 7個小流域이며 分析結果의 檢定을 위해 사용된 流域은 漢江의 慶安川 代表流域과 平昌江의 백옥포 代表流域이다.

3.1. 流域特性因子

위에서 언급한 8個 代表試驗流域의 流域特性因子인 流域面積(A), 最長流路延長(L) 및 平均河床傾斜(S)를 요약하면 表 1.과 같다.

Table 1. 小流域別 流域特性因子

流 域	A (km ²)	L (Km)	S
반월 1호(성포리)	1.64	1.59	0.0260
반월 2호(장상리)	1.44	1.05	0.0360
무 심 천	19.86	4.60	0.0175
경 안 천	9.25	5.00	0.0179
상 안 미	394.84	48.65	0.0069
백 옥 포	145.04	21.30	0.0096
장 평 리	104.44	22.20	0.0117
이 목 정	47.40	10.30	0.0250

3.2 分析된 豪雨事象의 特性因子

本 分析을 위해 선택된 降雨一流出事象은 전부 28個 事象으로서 小流域別로 보면 半月 1號流域이 5個, 半月 2號流域이 4個, 無心川 流域이 4個, 上安米 流域이 3個, 백옥포 流域이 4個, 장평리 流域 및 이목정 流域이 各各 1個이며 分析結果의 檢定에 사용된 慶安川 代表流域이 2個이며 豪雨日時 및 規模는 參考文獻¹⁸⁾에 상세하게 수록하였다.

本 分析에 사용된 豪雨事象의 特性因子는 降雨의 持續時間(hrs)과 期間동안의 總雨量(mm) 및 總有效雨量(mm)으로서 降雨의 持續時間과 總雨量은 自記雨量 記錄紙로 부터 직접 결정이 가능하였으며 總 有效雨量은 各 豪雨事象에 상응하는 流出水文曲線으로 부터 地下水減水曲線¹⁹⁾에 의해 基底流量을 분리하여 直接流出容積을 구한 후 이를 流域面積으로 나누어 얻었다.

3.3 到達時間-面積 柱狀圖 資料

Clark 方法에 의한 流出計算에 필요한 到達時間-面積柱狀圖(time-area histogram)는 SLR模型의 檢定을 위해 선정된 경안천, 백옥포 유역에 대하여 1:50,000 地形圖上에서 Kirpich 到達時間 公式²⁰⁾을 사용하여 等時間線을 그린 후 얻었다.

4. 貯溜常數 K 값의 決定

本 研究에서는 2.6節에서 언급한 바 있는 K의 4가지 결정방법 중에서 (1)과 (3)의 方法을 택하여 比較·檢討한 후 다시 더 精確한 K의 결정을 위해 TL2와 降雨特性因子인 降雨持續時間(TD,hr), 總有效雨量(PE, mm), 流域特性因子인 流域面積(A,km²), 平均河床傾斜(S)間에 多重回歸分析을 실시하였다.

1) $K = TL_1$ 의 경우

반월 1, 2호, 무심천의 3개 유역, 13개 강우사상에 대하여 TL1을 K로 보아 SLR 모형에 적용하여 妥當性

을 시험하였으며 그 결과는 다음 그림 1~4와 表 2.에 나타내었다. 그림 1~4는 각각 가장 좋은 결과, 가장 나쁜 결과, 보통인 결과, 여러 개의 尖頭流量을 갖는 경우를 나타내주고 있다. 이와같이 $K=T_{L1}$ 을 적용시킨 결과는 尖頭流量은 전반적으로 실측치보다 작았으며 尖頭發生時間과 流出水文曲線의 形狀은 거의 일치하였다.

2) $K=T_{L1}=\alpha \cdot q_m^\beta$ 의 관계를 이용했을 경우

Table. 2. $K=T_{L1}$ 일 경우의 SLR 모델에 의한 결과와 實測值의 比較

降雨事象 (No.)	K(= T_{L1}) (hrs)	尖頭流量 (by SLR) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	尖頭流量差 (%)
1	11.30	1.382	1.731	-20.16
2	6.07	2.585	2.723	- 5.07
3	5.53	3.321	2.688	+23.55
4	5.53	1.151	1.339	-14.04
5	6.32	2.059	2.369	-13.09
6	13.72	1.459	2.715	-46.25
7	4.94	7.812	9.097	-14.13
8	6.90	3.140	3.100	+ 1.29
9	3.53	3.230	3.662	-11.80
10	10.22	3.462	3.716	- 6.84
11	7.26	1.671	1.921	-13.01
12	3.54	2.161	1.640	+24.20
13	6.47	2.098	1.994	+ 5.22

이 관계를 利用하기 위하여 q_m (mm/hr)과 T_{L1} (hr)間에 單純回歸分析을 실시했으며 그 결과는 다음과 같다. 즉,

$$K=T_{L1}=5.913 \cdot q_m^{-0.0242} \dots \dots \dots (35)$$

윗식을 表 2.의 13개 강우사상에 대해 SLR 모델을 적용한 결과는 다음 表 3.과 같으며 尖頭流量의 誤差가 상당히 컸으며 誤差의 方向(+ 또는 -)도 일정하지 않아서 이 방법에 의한 K값의 적용은 非合理的이라고 판단되었다.

Table. 3. $K=T_{L1}=\alpha q_m^\beta$ 에 의한 K를 SLR 모델에 適用시킨 경우의 結果比較

降雨事象 (No.)	$K=\alpha q_m^\beta$ (hrs)	尖頭流量 (by SLR) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	尖頭流量差 (%)
1	5.91	2.233	1.731	+29.00
2	5.84	2.637	2.723	- 3.16
3	5.83	3.216	2.688	+19.64
4	6.06	1.073	1.339	-19.87

5	5.93	2.155	2.369	- 9.03
6	5.93	2.578	2.715	- 5.05
7	5.68	7.152	9.097	-21.38
8	5.83	3.472	3.100	+12.00
9	5.98	2.264	3.662	-38.18
10	5.81	4.343	3.716	+16.87
11	5.92	1.861	1.921	- 3.12
12	5.96	1.658	1.740	- 4.71
13	5.88	2.223	1.994	+11.48

3) T_{L2} 를 流域特性因子와 降雨特性因子를 고려하여 回歸分析한 경우

表 2.와 그림 1~4에서 보는 바와 같이 T_{L1} 을 K로 사용하여 SLR 모델에 적용한 결과는 尖頭到達時間이나 水文曲線의 形狀은 거의 일치하나 尖頭流量이 전반적으로 작게 산정되었다.

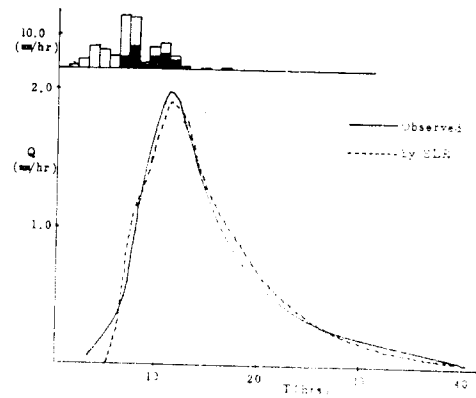


Fig. 1. 무심천 유역(1976.8.27.0400) 降雨에 의한 直接流出水文曲線

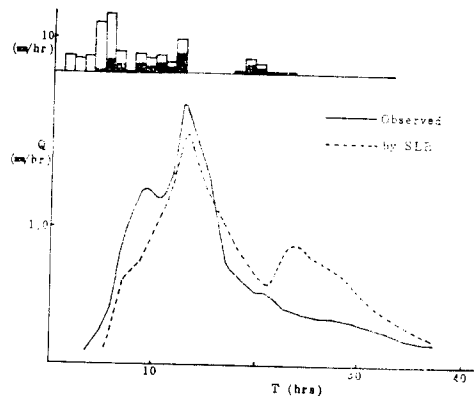


Fig. 2. 무심천 유역(1976.8.5.0500) 降雨에 의한 直接流出水文曲線

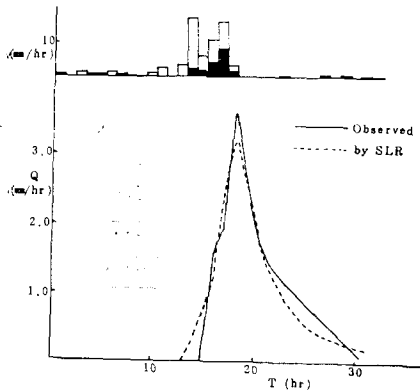


Fig. 3. 반월 2 호 유역(1981. 8. 17. 17:00) 降雨에 의한 直接流出水文曲線

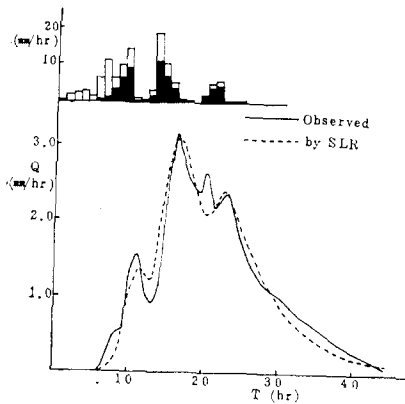


Fig. 4. 반월 2 호(1981. 7. 11. 11:00) 降雨에 의한 直接流出水文曲線

尖頭流量을 조금씩 높여주기 위해서는 약간 작은 K를 적용해야 할 필요가 있으므로 T_{L2} 를 각 流出水文曲線으로부터 구하여 回歸分析에 사용하였다. 우선 $K = T_{L2}$ 를 구하는데 기존의 經驗公式들과 같이 流域特性因子만을 고려한 回歸分析을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같이 낮은 相關係數(r)를 보였다. 즉,

$$K = T_{L2} = 2.569 \cdot A^{-0.0012} \cdot S^{-0.2463} \dots\dots\dots(36)$$

$$r = 0.3752$$

이와같이 流域特性因子만을 고려한 회귀분석의 결과는 좋지 않으므로 回歸分析에는 流域特性因子인 A (km^2), S 와 降雨特性因子인 T_D (hr), P_E (mm)로 포함시켰으며, 회귀분석의 결과는 식(37)에, 이의 적용 결과는 表 4.에 표시되어 있다.

$$K = T_{L2} = 0.6588 \cdot A^{0.0346} \cdot S^{-0.2474} \cdot T_D^{0.3397} \cdot P_E^{0.0338}$$

$$\dots\dots\dots(37)$$

$$r = 0.9698$$

表 4.에서 볼 수 있듯이 식(37)에 의한 K를 SLR 모형에 적용한 결과는 전반적으로 실측치와 10%이내의 誤差를 보였으며 이는 전술한 K의 決定方法들 보다 우리나라 小流域에 適用性이 더 나은 方法임을 알 수 있다.

Table. 4. 式(37)에 의한 K를 SLR 模型에 적용시킬 경우의 結果와 實測值와의 比較

降雨事象 (No.)	K(式(37)) (hrs)	尖頭流量 (by SLR) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	尖頭流量差 (%)
1	8.55	1.743	1.731	+ 0.69
2	5.90	2.806	2.723	+ 2.96
3	6.42	3.096	2.688	+13.18
4	6.33	1.287	1.339	- 7.62
5	6.05	2.296	2.369	- 3.08
6	7.86	2.447	2.715	- 9.87
7	5.08	7.691	9.097	-15.46
8	6.15	3.385	3.100	+ 8.41
9	6.47	2.154	2.599	-14.96
10	7.86	4.043	3.716	+ 8.08
11	6.22	1.963	1.921	+ 2.14
12	6.90	1.526	1.668	- 8.51
13	5.49	2.329	1.994	+ 6.34

따라서 경안천, 백옥포유역에 SLR 모형을 적용시켜 檢定을 하는데 K를 산정하기 위한 方法으로는 식(37)을 적용하여 산정하였다.

5. 直接流出量의 算定과 他模型과의 比較・檢討

本節에서는 식(36)을 이용하여 회귀분석에 포함되지 않은 경안천유역의 76. 8.26. 1800 (No.14), 76.8.2. (No.15) 강우사상과 회귀분석에 포함된 백옥포유역의 85.5.12. 0800 (No.19), 85.7.10.0500 (No.20), 85.8.10. 1100 (No.21) 降雨事象들에 대하여 SLR 모형을 적용시켰으며 Nash 모형, Nakayasu 방법, Clark 방법도 적용하여 이들의 결과를 比較・檢討하였다.

5.1 有効雨量柱狀圖의 決定

전술한 바와 같이 本研究에서는 SCS 方法에 의해 有効雨量을 산정하였다. 우선 AMC-I, II, III 條件과 流域의 地形學的 條件에 따라 CN을 결정하고 이에 의해 S를 구하고 식(28)에 의해서 累加有効雨量을 구한 후에 各 時間別 有効雨量을 결정하였다. 위의 계산을 위한 AMC-I, II, III 條件과 CN值, S의 계산 결과는

다음 表 5.에 나타내었다.

5.2 Nakayasu(中安) 方法의 적용을 위한 變數의 決定

Table 5. 5個 降雨事象에 對한 CN值 및 S值

降雨事象(No.)	AMC 條件	CN	S
14	AMC-III	79.30	66.30
15	AMC-III	79.30	66.30
19	AMC-III	82.97	52.02
20	AMC-II	68.60	116.30
21	AMC-III	82.97	52.02

Nakayasu의 綜合單位圖를 구하기 위해서는 t_p, t_k, t_y, Q_p 의 결정이 필요하며 이들은 식 (20)~(24)에 의해 산정하였으며 그 결과는 表 6.과 같다.

Table 6. Nakayasu 綜合單位圖에서의 t_p, t_g, t_k, Q_p 值

流域	t_g (hr)	t_p (hr)	t_k (hr)	Q_p (mm/hr)
경안천	0.65	1.50	1.23	0.364
백옥포	1.91	2.67	3.67	0.224

5.3 Nash 모형의 적용을 위한 n 와 K_n 의 決定

本 研究에서는 各 流域의 n 값을 구하기 위하여 경안천유역의 No.14 降雨事象과 백옥포유역의 No.19 降雨事象에 대해서 $n=1\sim5$ 를 식 (14), (15)에 적용시켜 試行錯誤的으로 n 값을 결정하였으며, 그결과 경안천, 백옥포유역 모두 $n=4$ 가 산정되었다. $n=4$ 일때 各 降雨事象의 K_n 값은 다음 表 7과 같다.

Table 7. Nash 모형의 適用을 위한 K_n 과 n 值

降雨事象(No.)	流域	K_n (hr)	n
14	경안천	2.763	4
15	"	3.406	4
19	백옥포	3.409	4
20	"	2.667	4
21	"	2.099	4

5.4 SLR 모형과 其他 모형에 의한 直接流出量의 算定 및 比較

앞에서 결정한 各種 變數들에 의하여 경안천, 백옥포유역의 5개 降雨事象에 대하여 SCS方法에 의하여 有效雨量柱狀圖를 결정하고 直接流出量을 산정하였으며 계산 결과는 그림 5~그림 9와 表 8~表 11.에 나타

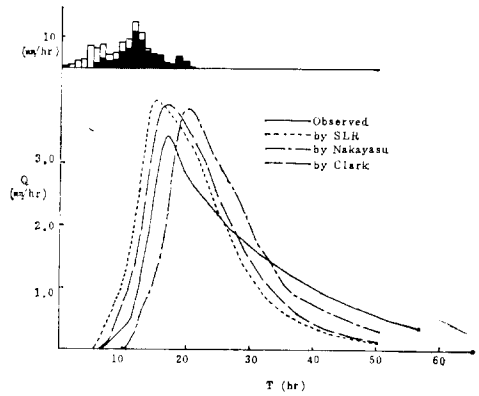


Fig. 5. No. 19 降雨事象에 의한 直接流出水文曲線 (백옥포 流域)

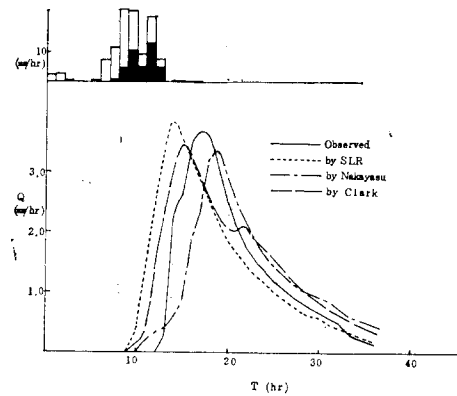


Fig. 6. No. 20 降雨事象에 의한 直接流出水文曲線 (백옥포 流域)

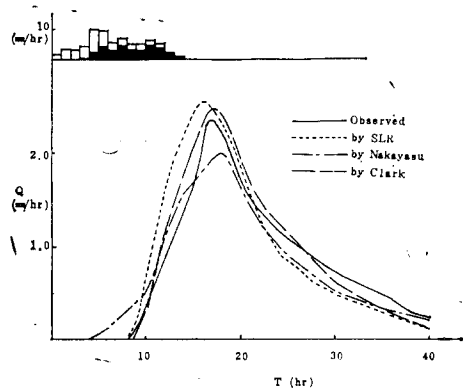


Fig. 7. No. 21 降雨事象에 의한 直接流出水文曲線 (백옥포 流域)

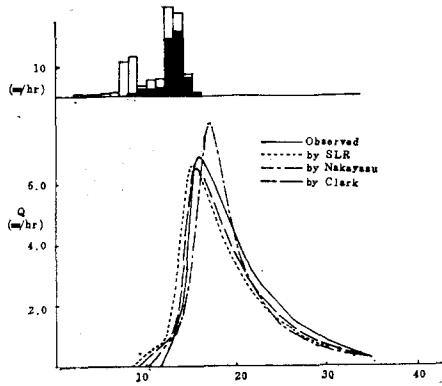


Fig. 8. No. 14 降雨事象에 의한 直接流出水文曲線 (慶安川 代表流域)

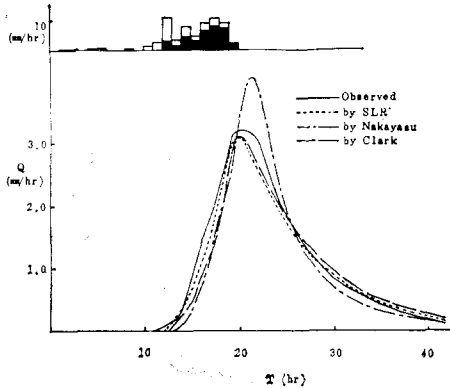


Fig. 9. No. 15 降雨事象에 의한 直接流出水文曲線 (慶安川 代表流域)

表 8. SLR 模型에 의한 直接流出量의 算定 結果

降雨事象 (No.)	流 域	尖頭流量 (SLR) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	誤 差 (%)
14	경 안 천	6.852	6.958	- 1.523
15	"	3.134	3.183	- 1.536
19	백 옥 포	3.984	3.427	+16.253
20	"	3.805	3.687	+ 3.200
21	"	2.575	2.353	+ 8.620

表 9. Nash 模型에 의한 直接流出量의 算定 結果

降雨事象 (No.)	流 域	尖頭流量 (Nash) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	誤 差 (%)
14	경 안 천	6.700	6.958	- 3.71
15	"	3.395	3.183	+ 6.24
19	백 옥 포	3.409	3.427	- 0.53
20	"	2.880	3.687	-21.89
21	"	2.660	2.353	+11.54

表 10. Clark 方法에 의한 直接流出量의 算定 結果

降雨事象 (No.)	流 域	尖頭流量 (Nash) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	誤 差 (%)
14	경 안 천	6.594	6.958	- 5.23
15	"	3.107	3.183	- 2.39
19	백 옥 포	3.932	3.427	+14.74
20	"	3.423	3.687	- 7.16
21	"	2.487	2.353	+ 5.69

表 11. Nakayasu(中安)의 單位圖法에 의한 直接流出量의 算定 結果

降雨事象 (No.)	流 域	尖頭流量 (Clark) (mm/hr)	尖頭流量 (實測) (mm/hr)	誤 差 (%)
14	경 안 천	8.609	6.958	+19.18
15	"	4.143	3.183	+23.17
19	백 옥 포	3.862	3.427	+11.26
20	"	3.351	3.687	+ 9.11
21	"	1.987	2.353	-15.55

내었다. 이들로부터 볼 수 있듯이 SLR 모형은 流域面積이 작은 경안천유역에서는 가장 좋은 결과를 보이거나 流域面積이 큰 백옥포 유역에서는 Clark 모형이 더 좋은 결과를 보이고 있다. 이는 Rao et al⁽¹⁰⁾의 研究에서의 SLR 모형은 流域面積이 작은 유역(5 mi² 이하)에 적합하다는 결과와도 일치하고 있다. 그러므로 流域面積이 작은 流域에서는 SLR 모형을, 큰 유역에서는 Clark 方法에 식(37)에 의한 K를 적용하는 것이 합당하다고 할 수 있다. 또한 큰 유역에 대한 實測資料들에 의해서만 回歸分析을 실시한다면 큰 유역에 대해서도 SLR 모형은 좋은 결과를 보일 것으로 기대된다.

그리고 其他 模型에 의한 直接流出重의 산정 결과들과 비교해 볼 때 SLR 모형은 他模型에 비해서도 상당히 좋은 결과를 보이고 있다.

5.5 各 因子의 變化에 따른 SLR 模型의 銳敏度

本節에서는 各 特性因子(A, S, T_d, P_E)의 값에 誤差가 있을 경우 식(37)에 의한 K값의 變化가 어떠한지, 또한 K를 變化시킴에 따라 SLR 模型에 의한 流出計算의 결과가 얼마나 敏感하게 變化하는가를 검토하기로 한다. 우선 각 因子를 20% 變化시켰을 때의 K의 예민도를 表 12.에 나타내었다.

表 12.에서 알 수 있듯이 各 因子의 誤差에 의한 K값의 變化程度는 별로 크지 않으므로 實測된 資料가 어느정도의 誤差를 포함한다 하더라도 상당히 精確한 K의 산정이 가능하다.

表 12. 各 因子의 誤差에 의한 K 值의 變化

因 子	因子의 誤差(%)	K 值의 誤差(%)
A (km ²)	+20	+0.63
S	+20	-4.41
T _D (hr)	+20	+6.39
P _E (mm)	+20	+0.32

한편, K 값의 變化에 따른 SLR 모형에 의한 流出量의 變化程度를 알아보기 위하여 경안천유역의 No. 14, No. 15 降雨事象에 대하여 K를 20% 변화시켜서 SLR 모형에 의한 유출량의 변화정도를 알아보았으며 다음 表 13.에 그 結果를 표시하였다.

表 13. K의 變化에 따른 尖頭流量의 變化程度

降雨事象(No.)	K의 變化率(%)	尖頭流量의 變化(%)
14	+20	-14.32
14	-20	+12.85
15	+20	-12.05
15	-20	+11.53

表 13.에서 볼 수 있듯이 K가 커짐에 따라 尖頭流量은 감소하며 K가 작아짐에 따라 增大하는 경향을 보이며 K가 20% 변화함에 따라 尖頭流量은 12~15% 정도의 변화를 보인다. 表 12.와 表 13.을 連結시켜서 보면 各 特性因子가 20% 정도 변화할 때 K의 變化率은 최대 6.39% 정도이고 이에 대한 尖頭流量의 變化程度는 3.7~4.6%에 지나지 않을 것임을 짐작할 수 있다. 따라서 SLR 모형은 K 값의 결정을 위한 因子값의 變化에 그다지 敏感하지 않음을 알 수 있다.

VI. 結 論

本 研究에서는 간단한 洪水流出 模型인 SLR 모형의 우리나라 小流域들에 대한 適用性을 검토하였으며 연구결과를 종합한 결론은 다음과 같다.

1) 貯溜常數 K를 구하기 위한 回歸分析을 行하였으며 그 결과는 相關係數 $r=0.970$ 으로서 流域의 特性因子뿐만 아니라 降雨의 特性因子 또한 K의 결정에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

2) 回歸分析된 相關關係式으로부터 구한 K를 이용하여 SLR 모형을 적용시킨 결과들로부터 SLR 모형은 우리나라 小流域들에도 적용성이 좋은 모형이라고 볼 수 있다.

3) SLR 모형을 적용시킨 결과는 流域面積이 작은 流

域에서는 Clark 方法보다 더 나은 결과를 보여주고 있으며 流域面積이 큰 流域에서는 Clark 方法보다는 좋지 않은 결과를 보인다. 그러므로 流域面積이 작은 小流域에는 SLR 모형을, 큰 流域에는 Clark 方法을 本 研究에서 回歸分析된 K를 이용하여 적용하는 것이 합당하다고 본다.

4) 큰 유역에 대한 實測資料들에 의해서만 回歸分析을 실시하여 K를 산정하고 SLR 모형을 적용시킨다면 큰 유역에 대해서도 좋은 결과를 보일 것으로 類推된다.

5) 各 因子들의 오차에 따른 K의 변화정도와 K의 변화에 따른 SLR 모형의 결과는 그 銳敏度(sensitivity)가 작으므로 各 因子들이 약간의 誤差를 포함한다해도 상당히 정확한 결과를 보일 수 있다.

參 考 文 獻

- Zoch, R.T., "On the Relation between Rainfall and Stream Flow," Monthly Weather Review, Vol. 62, 1934.
- Clark C.O., "Storage and the Unit Hydrograph," Trans. ASCE, Vol.110, 1945.
- Dooge, J.C., "A General Theory of Unit Hydrograph," Journal, Geophysical Research, Vol. 64, No.1, 1959.
- Nash, J.E., "Systematic Determination of Unit Hydrograph Parameters," Journal, Geophysical Research, Vol.64, No.1, 1959.
- Crawford, N.H. and Linsley R.K., "Digital Simulation in Hydrology, Stanford Watershed Model-IV," Technical Report No.89, Stanford California, Department of Civil Engineering, Stanford University, 1966.
- James, L.D., "An Evaluation of Relationship between Streamflow Patterns and Watershed characteristics through the Use of OPET," Research Report No.36, Water Resources Institute, University of Kentucky, Lexington, 1970.
- Holtan, H.N. and Lopez, N.C., "USDAHL-73 Revised Model of Watershed Hydrology," U.S. Dept of Agriculture, Plant physiology Institute, Report No.1, 1973.
- Pedersen, J.T., "Runoff Simulation by the Single Linear Reservoir Model," Thesis presented to the University of California at Davis, Calif.

- in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, 1978.
10. Rao, R.A., Delleur, J.W. and Sarma, P.B.S., "Conceptual Hydrologic Models in Urbanizing Basins," Journal, Hydraulics Div., ASCE, Vol. 98, HY 10, 1972.
 11. Sarma, P.B.S, Delleur, J.W. and Rao, A.R., "A Program in Urban Hydrology, Part II : An Evaluation of Rainfall-Runoff Models for Small Watersheds and the Effects of Urbanization on Runoff," Purdue University Water Resource Research, Technical Report No.9, Purdue University, W. Lafayette, Ind., 1969.
 12. Pedersen, J.T., Peters, J.C., and Helweg, O.J., "Hydrographs by Single Linear Reservoir Model," Journal, Hydraulics Div., ASCE, Vol.106, No. NY 5, 1980.
 13. 建設部, 河川施設基準(河川編), 1980, pp. 420—422.
 14. Linsley, R.K., "Application of the Synthetic Unitgraph in the Western Mountain States," Transaction, AGU, 24th Annual Meeting, 1936.
 15. U.S. Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Department of Agriculture, 1972.
 16. Boyd, M.J., Pligrim, D.H. and Cordery, I., "A Storage Routing Model Based on Catchment Geomorphology," Journal of Hydrology, Vol.42, Elsevier Scientific Publishing Co., 1979.
 17. 建設部, 國際水文開發計劃(IHP) 代表試驗流域 研究調查報告書, 1975, 1976, 1981, 1984, 1985.
 18. 金栽螢, 單一線型貯水池模型에 의한 洪水流出計算, 碩士學位論文, 高麗大學校 大學院 土木工程科, 1985.
 19. Wilson, E.M., Engineering Hydrology, English Language Book Society and Macmillan Co., 1983.
 20. Kirpich, Z.P., "Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds," Civil Engineering, Vol.10, No.6, ASCE, 1940.