線型流出模型의 媒介變數推定

Parameter Identification for Linear Runoff Model

尹 泰 勳*
Yoon, Tae Hoon
全 時 永**
Chun, Si Young

Abstract

The parameters of Nash's conceptual model of Instantaneous Unit Hydrograph, n and k, are estimated by the moment method from the rainfall and runoff data in 18 watersheds of drainage area ranging 53.7 to 1,361 sq. km. Then, these parameters are represented in terms of watershed characteristics by F-test and multiple correlation method. The unit hydrgraphs by this study are compared with the unitgraphs obtained from the recorded runoff data and agreements are good. The results imply that unit hydrgraphs in ungaged watersheds can be derived by watershed characteristics only through Nash's model.

要 旨

概念流出模型인 模型의 媒介變數 n, k는 流域面積이 53.7~1,361 km^{2}의 범위에 있는 18개 유역의 降雨—流出資料로부터 모멘트방법에 의하여 推定된다. 이들 n, k는 F-test와 더불어 複合相關方法에 의하여 流域特性 因子들만의 함수로 유도된다. 유도된 媒介變數들은 漢江, 錦江 및 洛東江流域에 적용하여 계산된 水文曲線과 實際資料로부터 유도한 水文曲線은 비교적 잘 맞았으며, 이는 流域特性만으로 未計測小流域의 降雨—流出解析의 可能함을 시사한다.

1. 序 論

基文水文系는 空間과 時間的으로 分布된 入力(降雨)—出力(流出)에 기여하는 여러 成分으로 구성되어 있다. 이러한 水文系중 가장 간단한 系는 降雨—流出사이의 관계를 確定論的 lumped 線型 時間獨立系로 표현하는 것이다.

일반적으로 流出過程의 模擬技法은 概念模型에 기초를 두며 이러한 模型의 하나가 線型貯水池 流出模型에 의한 瞬間單位圖이다. 瞬間單位圖란 流域전체에 걸쳐 瞬間的이고 均等하게 발생된 單位有效雨量에 의한 流出水文曲線으로 정의된다. 本 硏究에서는 有効降雨와 流域特性因子들로부터 瞬間單位圖의 媒介變數가 되는 貯水池의 數 n와 貯溜常數 k를 單位圖의 基本假定

* 正會員·漢陽大學校 工科大學 敎授, 土木工學科
** 正會員·漢陽大學校 大學院 博士課程

인 線型性을 도입한 回旋積分으로부터 구할 수 있다. 媒介變數 n와 k는 解析方法에 따라 모멘트에 의한 방법, Laplace 變換에 의한 방법 및 流域特性因子들간의 複合回歸分析에 의한 방법으로 유도된 相關式으로부터 구할 수 있다.

複合回歸分析으로부터 유도된 상관식에 流出資料가 없는, 즉 未計測 小流域의 流域特性因子들을 적용하여 降雨—流出에 필요한 瞬間單位圖의 媒介變數 n와 k를 推定함으로서 未計測小流域의 降雨—流出解析은 가능하다.

2. 線型流出模型 理論

2.1. 模型의 成分

線型貯水池 流出模型에 의한 流域의 貯溜量 S는 流出量 Q에 線型關係를 나타내는 貯溜方程式으로 주어진다.

$$S=kQ \quad \cdots\cdots(1)$$

여기서 k는 時間次元을 갖는 貯溜常數로 線型系에서는 遲滯時間과 같다. 貯溜量의 時間變化率은 다음과 같이 표현된다.

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

(1)식을 시간 t에 관하여 미분하여 (2)식에 대입하면 다음과 같은 線型微分方程式을 얻는다.

$$I-Q=k\frac{dQ}{dt} \quad \cdots\cdots(3)$$

(3)식을 積分한 후 流入量 I가 常數이고 경계조건 $t=0$, $Q=0$을 적용하여 Q에 관하여 풀면

$$Q(t)=I(t)[1-e^{-t/k}] \quad \cdots\cdots(4)$$

(4)식은 시간 t가 無限大로 접근함에 따라 流出量 $Q(t)$는 平衡狀態에 달하여 결국 流入量 $I(t)$와 같게됨을 알 수 있다.

有效降雨量이 流出이 시작해서부터 시간 t_1에서 멈추었다면 (3)식으로 주어진 流出量은 시간 $t>t_1$에서 다음과 같이 표현된다.

$$-Q(\tau)=k\frac{dQ}{d\tau} \quad \cdots\cdots(5)$$

여기서, $\tau=t-t_1$이다.

(5)식을 변형하여 시간 $\tau=0$일 때 유량 $Q=Q_1$에 관하여 微分을 하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$Q(\tau)=Q_1e^{-\tau/k} \quad \cdots\cdots(6)$$

(4)식과 (6)식은 각각 水文曲線의 增水部와 減水部를 정의한다. $t_1=0$에서 瞬間的으로 流出量 Q_1이 貯溜量 S_1을 채운다면 (1)식은 $S_1=kQ_1$이 되어 (6)식은 다음과 같이 표현된다.

$$Q(t)=\frac{S_1}{k}e^{-t/k} \quad \cdots\cdots(7)$$

瞬間入力 또는 $S_1=1$을 도입하면 線型貯水池 流出模型에 의한 瞬間單位圖 (7)식은 다음과 같이 된다.

$$u(t)=\frac{1}{k}e^{-t/k} \quad \cdots\cdots(8)$$

또 (3)식을 流出量 Q에 대하여 풀면

$$Q=e^{-t/k}\left[\frac{1}{k}\int Ie^{t/k}+\text{const.}\right] \quad \cdots\cdots(9)$$

(9)식은 $I=f(t)$의 函數型이 주어지면 解析的 또는 數學的으로 解를 구할 수 있다[18]. (8)식은 流入量 I가 瞬間的으로 이루어지는 경우 流入函數 I에 Dirac-Delta 함수를 도입하여 Laplace 變換으로 얻은 결과[14]와 같다.

2.2. 模型의 公式化

n개로 이루어진 槪念的인 線型貯水池 流出模型이 Nash[7,8,9,10]에 의하여 제안되었다. Lumped parameter system에서 出力函數 $y(t)$는 回旋積分으로 표현된다.

$$y(t)=\int_0^{t^*<t_0}u(0,\ t-\tau)x(\tau)d\tau$$

$$=\sum_{\tau=1}^{N}u(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad \cdots\cdots(10)$$

여기서 $u(0,\ t-\tau)$는 核函數(kernel function) 혹은 瞬間單位圖(IUH), $x(\tau)$는 入力函數, τ는 時間變數이다.

流域의 水文學的 解析에서 일반적인 문제는 旣知의 함수 $y(t)$와 $x(\tau)$로부터 未知의 $u(\tau)$의 함수형을 유도하는 것이다. 또 (10)식은 시간 t에서 直接流出水文曲線의 縱距를 나타내며 시간 t^*의 한계는 $t\leqq t_0$일 때 $t^*=t$이고, $t>t_0$일 때 $t^*=t_0$이다. 첫번째 貯水池로부터의 流出量은 (8)식으로 표현되며 n번째 貯水池를 통과하

는 流出量 Q_n은 다음과 같이 표현된다.

$$u(t)=\frac{1}{k\Gamma(n)}\left(\frac{t}{k}\right)^{n-1}e^{-t/k} \cdots\cdots\cdots(11)$$

여기서 $\Gamma(n)$은 因數가 n인 Gamma 함수이다.

(11)식은 流域全域에 걸쳐서 瞬間的으로 내린 單位有效雨量에 의하여 同一한 線型貯水池를 통하여 流出되는 瞬間單位圖의 縱距를 표시한다. 또 (11)식에서 流出模型의 媒介變數들은 n와 k이고, n는 一連의 線型貯水池, 流出模型의 貯溜要素 혹은 貯水池의 數를 의미하며 形狀係數라 부른다[15]. 적절한 水文曲線을 얻기 위하여 n값은 1보다 커야만 하고 流域의 形狀에 좌우되며 또 정확한 n의 수는 流域特性에 따라 변화한다. 媒介變數 k는 遲滯時間變數이고 주로 水路의 形狀에 좌우된다. k는 같은 유역에서도 降雨强度에 따라 그 값이 변화하나 그 변화폭은 크지 않는 것으로 알려져 있다. Dooge[6]도 Nash와 유사한 방법으로 (11)식을 유도한 바 있다.

3. 瞬間單位圖의 媒介變數推定

瞬間單位圖의 媒介變數 n와 k의 推定은 모멘트理論이나 Laplace 變換을 적용함으로서 가능하다. 이들 媒介變數들은 實測된 降雨—流出資料로부터 구할 수 있다. 그러나 降雨—流出資料가 없는 小流域에서는 불가능하지만 複合回歸分析으로부터 유도된 相關式에 流域特性 因子들을 적용하여 降雨—流出에 필요한 媒介變數를 推定함으로써 가능하다.

3.1. 모멘트理論에 의한 方法

모멘트理論에 의한 方法의 目的은 入力函數, 衝擊應答函數 및 出力函數간의 모멘트관계를 세우는 것이다. 面積重心에 관하여 유도된 식[2,8,9], 을 座標移動하여 原點에 관한 모멘트식을 구하는 것이 필요하다. 이러한 함수들간의 관계를 식(10)과 같이 回旋積分으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q(t)=\int_0^t R(t)u(t-\tau)d\tau \cdots\cdots\cdots(12)$$

여기서, τ는 시간변수이다.

$u(t)$는 衝擊應答系의 特性函數이며, 流域系에서는 이러한 함수가 瞬間單位圖로 나타난다.

原點에 관한 $Q(t)$, $R(t)$ 및 $u(t)$ 함수의 n次 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$M_Q^{(n)}=\int_0^\infty t^nQ(t)dt \cdots\cdots\cdots(13)$$

$$M_R^{(n)}=\int_0^\infty t^nR(t)dt \cdots\cdots\cdots(14)$$

$$M_U^{(n)}=\int_0^\infty t^nu(t)dt \cdots\cdots\cdots(15)$$

(12)식을 (13)식에 대입한 후 數學的인 變換을 정리하면 다음과 같은 二項定理에 관한 식으로 표현된다.

$$M_Q^{(n)}=[M_U+M_R]^{(n)} \cdots\cdots\cdots(16)$$

여기서, n는 모멘트의 次數이다.

(15)식에 $n=1$을 대입한 瞬間單位圖의 1차 모멘트식은 다음과 같다.

$$M_U^{(1)}=\frac{1}{k^n(n-1)!}\int_0^\infty t^ne^{-t/k}\,dt \cdots\cdots(17)$$

(17)식을 積分하여 정리하면 다음과 같다.

$$M_U^{(1)}=nk=m_1 \cdots\cdots\cdots(18)$$

또 (18)식을 $n=1$일 때 (16)식에 대입하면

$$M_U^{(1)}=M_T^{(1)}-M_R^{(1)}$$

$$=nk \cdots\cdots\cdots(19)$$

(19)식, 즉 瞬間單位圖의 1차 모멘트식은 原點에서 瞬間單位圖의 重心까지의 시간과 같다[1,3,9,10].

같은 方法으로 瞬間單位圖의 2차 모멘트식은 다음과 같다.

$$M_Q^{(2)}=n(n+1)k^2=m_2$$

혹은

$$M_Q^{(2)}=M_Q^{(1)}-M_R^{(1)}-2nkM_R^{(2)}$$

$$=n(n+1)k^2 \cdots\cdots\cdots(20)$$

(13)식에 표현된 3개의 함수들 간의 원점모멘트에 관한 일반식은 Laplace 變換에 의하여서도 얻어진다. 식 유도에 관한 자세한 내용은 참고문헌 4에 의하여 주어진다. 여기서는 瞬間單位圖의 1차, 2차 모멘트식인 (21)식과 (22)식만 간단히 표현한다.

$$\left|\frac{d\bar{U}(s)}{ds}\right|_{s=0}=nk=m_1 \cdots\cdots\cdots(21)$$

$$\left|\frac{d^2\bar{U}(s)}{ds^2}\right|_{s=0}=n(n+1)k^2=m_2 \quad \cdots(22)$$

Laplace 變換에 의하여 얻은 (21)식, (22)식은 모멘트이론에 의하여 얻은 (19)식, (20)식과 같은 結果를 준다.

3.2. 複合相關에 의한 方法

瞬間單位圖의 媒介變數들과 流域特性因子들간의 相關式은 다음과 같이 표현된다.

$$F=a_1A^{a_2}L^{a_3}L_{ca}^{a_4}S^{a_5} \quad \cdots(23)$$

여기서 F는 Nash 模型의 媒介變數 n 혹은 k인 從屬變數, A는 流域面積, L은 流路延長, L_{ca}는 流域의 重心까지의 流路延長, S는 流路의 平均傾斜인 獨立變數, a_1, a_2, a_3, a_4 및 a_5는 回歸分析에 의하여 결정되는 常數들이다.

(23)식의 양변에 對數를 취한 후 왼쪽항을 y_i, 오른쪽항의 각각을 새로운 變數 X_1, X_2, X_3 및 X_4로 치환하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$y_i=b_1+b_2X_{1,i}+b_3X_{2,i}+b_4X_{3,i}+b_5X_{4,i} \quad \cdots(24)$$

Nash 模型의 媒介變數 n 혹은 k의 推定値를 y_i'라 하면 (24)식에서 常數 $b_1, b_2 \cdots b_5$는 推定된 y_i' 값과 實測한 y_i 값과의 차이인 誤差를 이용하여 最小自乘法에 의하여 구할 수 있다.

$$\sum R_i^2=\sum(y_i'-y_i)^2 \quad \cdots(25)$$

(25)식은 모든 資料가 均等한 信賴度를 갖는 경우로 간주한 식이므로 加重因子를 사용하지 않으며 (25)식이 最小가 되기 위하여서는 각각의 常數들에 대하여 偏微分을 하면,

$$\frac{\partial}{\partial b_i}(R_i^2)=0 \quad \cdots(26)$$

(26)식을 다음과 같은 行列的으로 쓰면 편리하다.

$$[A]\cdot[B]=[C]$$

여기서

$$[A]=\begin{bmatrix} N & \sum X_{1,i} & \sum X_{2,i} & \sum X_{3,i} & \sum X_{4,i} \\ \sum X_{1,i} & \sum X_{1,i}^2 & \sum X_{1,i}X_{2,i} & \sum X_{1,i}X_{3,i} & \sum X_{1,i}X_{4,i} \\ \sum X_{2,i} & \sum X_{1,i}X_{2,i} & \sum X_{2,i}^2 & \sum X_{2,i}X_{3,i} & \sum X_{2,i}X_{4,i} \\ \sum X_{3,i} & \sum X_{1,i}X_{3,i} & \sum X_{2,i}X_{3,i} & \sum X_{3,i}^2 & \sum X_{3,i}X_{4,i} \\ \sum X_{4,i} & \sum X_{1,i}X_{4,i} & \sum X_{2,i}X_{4,i} & \sum X_{3,i}X_{4,i} & \sum X_{4,i}^2 \end{bmatrix},$$

$$[B]=\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} \quad \text{그리고} \quad [C]=\begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_iX_{1,i} \\ \sum y_iX_{2,i} \\ \sum y_iX_{3,i} \\ \sum y_iX_{4,i} \end{bmatrix}$$

이러한 경우, 行列 $[B]$를 回歸常數 vector라 한다. 이러한 회귀상수벡터는 數値解法을 이용하면 쉽게 구할 수 있다. (23)식에 대한 결과는 4장에서 기술된다.

4. 實際資料에 의한 比較分析

Nash[9]는 流域面積이 4.8~859 mi^2의 범위에 있는 영국의 90개 流域에서 實測된 降雨—流出資料로부터 n=2.08~5.55, k=1.52~14.35를 얻었으며, 流出資料가 없는 流域의 流出解析을 위하여 流域特性因子들인 流域面積 A, 地表面傾斜 OLS 및 流路延長 L로부터 瞬間單位圖의 媒介變數 n와 k를 구할 수 있는 1차, 2차 모멘트식으로 표현된 相關式 $m_1=27.6A^{0.3}OLS^{-0.3}$, $m_2=0.41L^{-0.1}$를 유도하여 실제의 水文曲線과 비교하였으며, Singh[15]는 流域面積이 0.5 ha~3,055 ha의 범위에 있는 미국의 38개 유역에서 流域特性因子들과 瞬間單位圖의 媒介變數들간의 相關式에 目的函數를 이용한 最適化技法을 도입하여 최적화된 변수들의 값 n=1.31~18.33, k=0.356~45.84를 얻어 실제의 水文曲線과 비교하였고, Wu[16]는 流域面積이 2.86~100 m_i^2의 범위에 있는 Indiana주의 21개 유역에서 實測된 降雨—流出資料로부터 n=1.9~10, k=1.04~43을 얻었으며, 流域特性因子들인 流域面積 A, 流路延長 L 및 流路의 平均傾斜 S와 貯溜常數 k 및 尖頭時間 t_p간의 相關分析에서 k=780$A^{0.937}$

$L^{-1.474}S^{-1.473}$, $t_p=31.42\,A^{1.085}L^{-1.233}S^{-0.668}$ 인 相關式을 유도하여 水文曲線의 設計에 이용할 수 있는 기초를 마련하였다. 이상에서 얻은 n 값과 k 값의 범위는 각각 $n=1.31\sim18.33$, $k=0.356\sim48.54$ 이다.

本 硏究는 流域面積이 53.7～1,361 km² 의 범위에 있는 漢江, 錦江 및 洛東江 水系, 18개 流域의 降雨—流出資料[19,20,21]에 直接流出量은 地下水減水曲線法, 有效降雨量은 ϕ 一指數法을 적용해서 얻은 값을 資料로 사용하였으며, 각각 流域의 流域特性因子들은 표 1과 같다.

표 1. 流域特性因子

	流域	流域面積 (km²)	流路延長 (km)	流域의 重心까지의 거리 (km)	流路의 平均傾斜 (m/km)
漢江	평창강 No. 3	382.1	44.13	20.65	18.42
	평창강 No. 5	105.8	23.00	12.10	29.22
	평창강 No. 6	55.9	14.50	6.90	41.66
	문막	1361.0	88.10	36.60	2.30
	횡성	433.0	47.30	12.00	4.70
	반월성	266.0	31.25	11.40	1.82
錦江	보청천 No. 1	475.6	49.00	22.50	3.20
	보청천 No. 2	346.5	30.30	11.00	3.19
	보청천 No. 3	72.5	19.20	10.20	7.80
	보청천 No. 4	79.5	16.80	4.50	4.69
	보청천 No. 5	53.7	13.00	4.80	5.55
洛東江	위천 No. 2	302.1	40.65	17.10	19.70
	위천 No. 6	151.1	21.80	8.90	56.90
	이안	189.9	45.30	25.00	4.40
	가장	149.4	21.10	8.60	5.50
	창리	924.6	66.90	28.00	4.70
	예인	1329.2	132.50	50.50	4.10
	임하	1360.5	97.20	42.00	2.40

(23)식으로 표현된 瞬關單位圖의 媒介變數들인 n 혹은 k와 流域特性因子들과의 相關分析으로부터 유도된 相關式은 각각 (27)식, (28)식과 같다.

$$n = 0.271\,W_n$$
$$W_n = L^{0.264}\,S^{-0.276} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (27)$$
$$k = 45.169\,W_k$$
$$W_k = L^{-0.945}\,L_{ca}^{0.689}\,S^{0.180} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (28)$$

표 2. 瞬間單位圖의 媒介變數

流域	Gamma 函數因數 n		貯溜常數 k	
	Nash 模型	複合相關	Nash 模型	複合相關
평창강 No. 3	3.23	2.22	7.22	4.94
평창강 No. 5	1.37	1.65	7.67	6.87
평창강 No. 6	1.36	1.32	10.30	*
문막	3.22	4.73	6.20	*
횡성	2.16	*	6.98	*
반월성	3.22	3.84	2.92	2.99
보청천 No. 1	3.82	3.70	4.28	3.46
보청천 No. 2	4.64	3.26	3.82	3.33
보청천 No. 3	2.98	2.26	5.83	5.71
보청천 No. 4	5.98	*	3.35	3.36
보청천 No. 5	2.20	2.24	4.19	4.62
위천 No. 2	4.76	*	1.57	*
위천 No. 5	1.00	1.35	5.21	6.60
이안	2.86	3.32	2.92	4.24
가장	2.30	2.55	4.75	4.36
창리	4.40	3.61	2.54	3.21
예인	5.35	4.50	2.29	2.47
임하	4.24	4.80	2.90	2.64

* 複合相關分析으로부터 제외됨.

Nash 模型, (27)식 및 (28)식으로부터 계산된 n와 k값은 표 2와 같다.

표 2에서 주어진 流域特性因子들과 n 혹은 k와의 複合相關式 유도에 대한 단계별 統計的 F-test 값(F_c)들과 표로부터 얻은 F값(F_T)들은 표 3에 주어졌다.

回歸分析(複合回歸分析 혹은 多重回歸分析)을 하는 과정에서 독립변수의 항을 얼마나 포함시켜야 가장 알맞는 回歸方程式을 얻을 수 있을까 하는 문제는 相關係數(複合相關係數 혹은 多重相關係數)나 統計的 F-test 방법에 의하여 종속변수에 대한 독립변수의 寄與度를 판정함으로써 해결된다. 이러한 판정의 목적은 回歸分析에서 포함된 항에 의하여 발생되는 경제성이나 數式의 복잡성 등 때문이다. 독립변수의 항을 증가시키거나 독립변수의 次數를 증가시키면 相關係數는 증가하므로 복잡성을 고려하지 않고 相關係數만에 의한 기여도판정은 타당성이 적다. 반면에 統計的 F-test는 回歸分析에서 추가되는

표 3. Nash 模型의 媒介變數들에 관한 統計的 F test

단계	Gamma 函數因數 (n)			貯 溜 常 數 (k)		
	추가되어야 할 변수	分散分析에 의한 F값	표로부터 얻은 F값	추가되어야 할 변수	分散分析에 의한 F값	표로부터 얻은 F값
1	S (流路의 平均傾斜)	14.847	4.67	S	6.007	4.75
2	L (流路延長)	5.631	4.75	L	6.018	4.84
3	A (流域面積)	0.002	4.84	L_{ca}	5.299	4.96
4	L_{ca} (流域의 重心까지의 거리)	0.000	4.96	A	1.567	5.12

變數(여기서는 流域特性因子)의 回歸直線에 대한 기여도가 낮은 것을 統計的으로 결정하기 위하여 사용될 수 있으며 기여도가 낮은 變數는 回歸方程式으로부터 제외시킬 수 있다. 이러한 방법은 다음과 같이 기술된다.

F값은 표 3에서 주어진 바와 같이 (29)식에 의하여 각각 回歸分析단계마다 계산되었다.

$$F=\frac{(SSR_1-SSR_2)/P}{MSE_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

여기서 SSR_1은 全體模型(full model)의 回歸에 의한 자승의 합(regression sum of square), SSR_2는 變數가 제외되었을 때 감소된 模型(reduced model)의 回歸에 의한 자승의 합, P는 제외된 變數의 數, 그리고 MSE_1은 전체모형에 대한 回歸直線으로 설명할 수 없는 평균자승오차(mean squared error)이다.

回歸의 각 단계마다 계산된 F값은 $F_{0.05}(P, n-k-1)$값[6]에 의하여 표로부터 얻은 값과 비교하여 기여도에 대한 판정을 할 수 있다. 여기서 n은 標本의 크기, k는 回歸에 의한 自由度(degree of freedom), 0.05는 본 연구에서 채택된 有意水準(significance level)이다. 기여도에 대한 판정은 독립변수의 추가로 인하여 F_C가 F_T보다 작은 값이 된다면 變數의 추가로 인한 回歸直線에 대한 기여도는 작으므로 그 變數는 제외시키고 그렇치 않으면 포함시킨다.

표 3에서 보는 바와 같이 n에 대하여 流域面積 A와 流路重心長 L_{ca}는 $F_C<F_T$, 즉 기여도가 상당히 작으므로 두 變數는 제외시키고 얻은 相關式이 앞에서의 (27)식이고 같은 방법으로 k에 대하여 流域面積 A는 $F_C<F_T$이므로 이 變數를 제외시키고 얻은 相關式이 (28)식이다. 이 때 變數의 추가로 인한 相關係數의 증가(2.3%)는 있었으나 前述한 바와 같이 기여도에 대한 판정이 F-test에 의하여 되었다. (27)식에서 流路延長 L과 流路傾斜 S로 정의되는 流域特性因子 W_n과 瞬間單位圖의 媒介變數 n를 전대수지에 프랏트한 것이 그림 1이고, (28)식에서 流路延長 L, 流路重心長 L_{ca} 및 流路傾斜 S

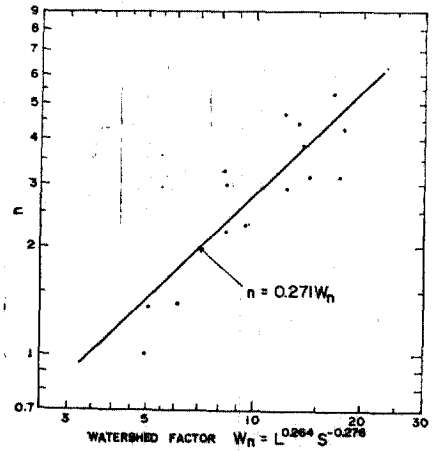

그림 1. Relation Between n and Watershed Factor W_n

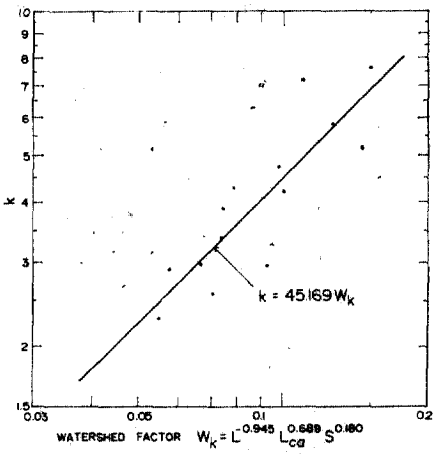

그림 2. Relation Between k and Watershed Factor W_k

로 정의되는 流域特性因子 W_k와 瞬間單位圖의 媒介變數 k를 전대수지에 프랏트한 것이 그림 2이다.

그림 1과 2에서 사용된 자료는 實測된 降雨—流出資料로부터 얻은 n값과 k값은 각각 n=1.60~5.98, k=1.57~10.30의 범위이고, 複合回歸分析에 의하여 얻은 값은 각각 n=1.35~4.80, k=2.47~6.87의 범위이다. (27)식과 (28)식의 複合相關係數는 각각 0.8813과 0.8551로 비교적 높은 相關을 보여 주었다. 이것은 流域特性因子들이 Nash 模型의 媒介變數들인 n와 k에 密接한 關係가 있음을 시사하는 것이다.

실제 유역에서 實測된 流出水文曲線으로부터 유도된 단위도, Nash 模型의 단위도 및 유도된 단위도의 結果는 그림 3, 4와 같다.

그림 3과 4에 나타난 바와 같이 實測値로부터 유도된 單位圖, Nash 模型의 單位圖 및 本研究에서 유도된 單位圖와 비교하면 그림 3에서는 실측치로부터 유도된 단위도의 尖頭値보다 다소 크게 나타났다. 이것은 集中豪雨가 아닌 豪雨이거나 모멘트이론의 적용에서 入力과 出力資料인 有效降雨量과 直接流出水文曲線의 始點이 一致하지 않음으로서 야기된 것으로 판단되며 그림 4에서는 비교적 잘 맞는다.

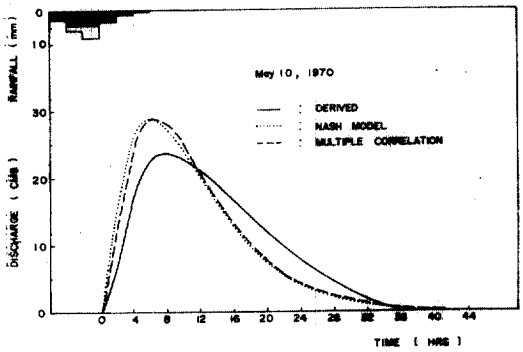

그림 3. 4-hour Derived and Synthetic Unit Hydrograph (Gajang)

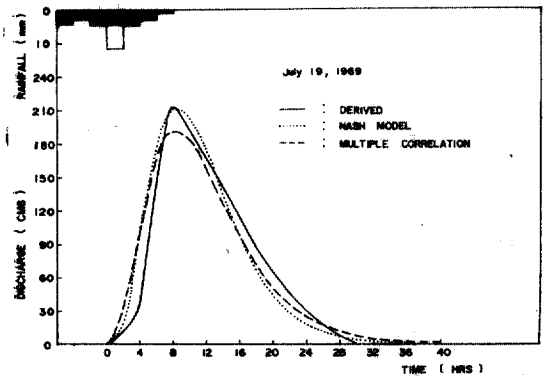

그림 4. 4-hour Derived and Synthetic Unit Hydrograph (Changri)

5. 結 論

流域面積이 53.7~1,361 km²의 범위에 있는 18개 流域의 實測된 降雨—流出資料로부터 구한 Nash의 槪念模型의 媒介變數 n와 k를 複合相關分析과 F-test에 의하여 流域特性因子만의 項으로 推定하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

瞬間單位圖의 媒介變數 n와 k는 複合相關에 의한 방법과 統計的 F-test에 의하여 $n=0.271 L^{0.264}S^{-0.276}$, $k=45.169 L^{-0.945}L_{ca}^{0.689}S^{0.180}$을 얻었으며, 이들의 相關係數는 각각 0.8813과 0.8551로 비교적 높다. 有效降雨量과 直接流出水文曲線의 始點이 一致한 流域에서 實測値에 의한 單位圖, Nash의 槪念模型 및 複合相關方法에 의하여 合成된 單位圖를 프랏트한 결과 비교적 잘 맞는다. 本 研究의 流出模型은 未計測小流域의 降雨—流出解析의 도구로서 가능성을 제시한다.

參 考 文 獻

1. Chow, V.T., "*Handbook of Applied Hydrology*", McGraw-Hill Inc., Copy Right, 1964.
2. Diskin, M.H., "Moment of Input, Output and Impulse Response Functions of Linear Systems about Arbitary Points", *Water Resources Res.* Vol. 4(4), pp. 275~735, Aug., 1968.
3. Diskin, M.H., "The role of Lag in Quasi-Linear Analysis of the Surface Runoff System", *Proceedings of the Second International Symposium in Hydrology.* Fort Collins, Colorado, U.S.A. Sep. 11~31, pp. 133~144, 1972.
4. Diskin, M.H.' "A Laplace Transform Proof of the Theorem of Moments for Instantaneous Unit Hydrograph", *Water Resources Res.* Vol. 3(2), pp. 385~388, 1967.

5. Dooge, J.C.I., "A general Theory of the Unit Hydrograph", *J. Geophs. Res.* vol. 64(2), pp. 241~256, 1959.
6. Kleinbaum, D.G. and Kupper, L.L., "*Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*", Duxbury Press, 1978.
7. Nash, J.E., "Determing Runoff from Rainfall", *Proc. Inst. Civil Engrs.* Vol. 10, pp. 163~184, June, 1958.
8. Nash, J.E., "Systematic Determination of Unit Hydrograph Parameters", *J. Geophs. Res.* Vol. 64(1), pp. 111~115, Jan., 1959.
9. Nash, J.E., "A Unit hydrograph Study, with Particular to Brith Catchments", *Proc. Inst. Civil Engrs.* Vol. 17, pp. 249~282, 1960.
10. Nash, J.E., "*The Form of the Instantaneous Units Hydrograph*", C.R. et Rapport Assn. Intemat. Hydro. IUGG, Toront,, 1957, Gentbrugge, Tome 111, pp. 114o~121, 1958.
11. O'connor, K.M. and Nash, J.E., "Comment on 'A Laplace Transform of Moments' by M.H. Diskin", *Water Resources Res.* Vol. 4(3), pp. 675~677, June, 1968.
12. Rao, R.A. and Delleur, J.W., "Conceptual Hydrologic Models for Urbanizing Basin", *Journal of the Hydraulics Division. ASCE,* HY 7, 1972.
13. Rao, R.A. and Delleur, J.W., "Some of Extensions of Linear Systems Analysis in Hydrology", *Proceedings of the Second International Symposium in Hydrology.* Fort Collins, Colorado, U.S.A. Sep., 11~13, pp. 117~132, 1972.
14. Raudikivi, A.J., "*Hydrology*" (An Advanced Introduction to Hydrological Process and Modeling), Pergamon Press, 1979.
15. Singh, V.P., and Shelburne, K.L., "*Use of Topographic International Conference on Water Resources Engineering*", BANG-KOK, THALLAND 10~13, Jan., 1978.
16. Wu, I.P., "Design Hydrographs for Small Watersheds in Indiana", *J. Hyd. Div. ASCE,* HY 6, 1963.
17. Wylie, C.R., "*Advanced Engineering Mathematics*", McGraw-Hill Inc., forth edition, 1975.
18. Yevjevich, V.M., "Analytical Integration of the Differential Equation for Water Storage", *J. Res. Nat.* Bureau of Standards, 63B(1), 1959.
19. 建設部, "漢江洪水豫報流出 및 常數分析報告書," 1980. 1981.
20. 建設部, "洪水量推定을 위한 合成單位流量 圖誘導의 硏究調査報告書," 1974.
21. 建設部, "國際水文開發計劃(IHP) 代表流域硏究調査報告書," 1983.

(接受 : 1986. 2. 1)