

中間流 모델에 의한 小流域의 流出解析*

趙 弘 濟

土木工學科

(1984. 4. 30 접수)

〈요 약〉

流域內 降雨—流出의 水文응답은 斜面길이의 分布특성으로 나타내어 진다. 流域의 地形特性은 洪水到達時間으로 표현되며, 洪水到達時間에 확률밀도함수를 적용시키면 降雨—流出응답함수인 순간단위도를 구성할 수 있다. 浸透地域의 流出率, 洪水到達時間 및 尖頭流量은 先行降雨量, 地形因子등에 의해 결정되며, 응답함수에 의해 유도되는 직접유출수문곡선은 유효강우량의 산정方法에 따라 그 재현정도가 달라진다.

본 논문에서는 Horton의 침투능 eq.을 이용한 유효강우량 산정법에 의해서 유출기본방정식을 제구성하였고, 이 방정식에 의한 직접유출수문곡선의 재현성을 검토하였다.

Runoff Analysis of Small Basins by the Interflow Model

Hong-Je, Cho

Department of Civil Engineering

(Received April 30, 1984)

〈Abstract〉

The hydrologic response function in watershed is expressed by the distribution function of slope length. The characteristic of topographical factors is represented to the concentration time, and the instantaneous unit hydrograph is derived which is hydrologic response function by the application of probability density function.

The method of calculation of effective rainfall should play important roles in the transformation process from hydrologic response function to hydrograph.

In this paper, the Horton's infiltration equation is used as method of calculation of effective rainfall, a new response function of runoff process is derived and is tested by comparing the observed and estimated values.

I. 序 論

流域內의 斜面에 내린 降雨은 物理的 현상에 의해서 斜面流를 형성하며, 河道는 斜面에 流入한 徑流 흐름을 出口까지 도달시킨다. 따라서 流域은 斜面과 河道로 구성되며 降雨 流出의 변환 System을 형성한다. System을 해석하는 Dynamic 기법중에는 연속방정식과 운동방정식을 이용한 특성곡선법

이 있으며,¹⁾²⁾ Wooding³⁾이 유역의 모델화에 이용하였다. 그는 流域의 형상을 구형으로 가정하고 斜面과 河道의 길이와 경사 및 조도계수등 수리적, 지형적제량을 평균치로 사용함으로써 地形因子의 特性을 충분히 고려하지 못하였다. 流域內의 흐름에 있어서 확산과 분산은 流速의 시간적, 공간적 불균일성에 의해서 일어나며 단순히 평균유속으로는 설명이 곤란하다. 또한 유출과정에 있어서 地形量과 수리특성의 分布는 중요한 역할을 한다.

* 이 논문은 1983년도 문교부 학술연구조성비에 의한 것임.

自然流域內的 流出은 流域을 구성하는 토질의 종류에 따라 浸透효과 및 斜면의 흐름특성이 결정되나 植生과 낙엽등으로 地表面이 덮여 있어 모든 降雨은 일시적으로 浸透流量을 形成한다.³⁾⁴⁾ 流域內的 流出特性은 流域의 浸透能, 先行降雨 및 토지이용상태등에 좌우되며 직접유출량 및 有效雨量의 산정방법에 따라 流出率 및 尖頭流量 등이 크게 영향을 받는다.

조⁵⁾가 발표한 中間流出모델에 의한 유출해석 방법을 기초로해서, 유효우량산정방법에 따른 직접유출 水文曲線 및 尖頭流量의 재현정도를 비교분석하기 위해서 Horton의 浸透能 eq.⁶⁾을 사용하여 기본방정식을 재구성하였으며, 기본이론을 보완하고자 한다.

II. 地形因子가 洪水流出에 미치는 영향

流域이 자연상태인 경우 降雨은 植生등에 의해 차단되고 地面에 도달한 降雨은 地面의 滲透저유, 浸透등에 의한 손실을 제외한 나머지가 河川으로 직접유출하며 주거지역이나 포장된도로 배수시설이 잘 정비된 지역등에 내린 降雨은 배수구를 통해서 河川에 到達하므로 洪水의 尖頭流量이 증가된다. 流域의 都市化에 따른 尖頭流量의 증대에 대한 문제는 都市化 前後의 降雨 流出의 관측자료에 의해서 비교 검토되어야 한다.

1. 유출고

山地流域의 雨量과 流量의 관측자료를 사용한 尖頭流出高와 洪水到達時間內的 雨量과의 관계를 표시한 것이 「그림 2-1」이다. 都市化 流域의 관측자

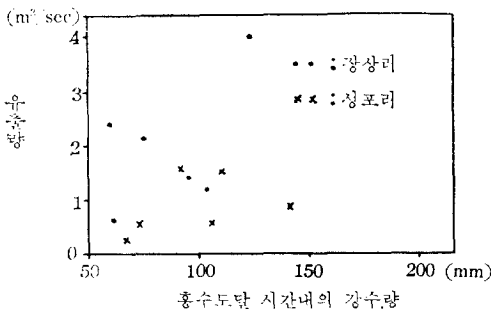


그림 2-1 유출량과 홍수도달시간내의 강우량의 관계

료가 없어서 비교하지는 못하였으나 流域의 都市化는 尖頭流出量을 증대시킬 것이다. 尖頭流出高에 영향을 미치는 主 原因은 流出率, 先行降雨量 및 洪水到達時間 등이다.

2. 유출율

「그림 2-1」에서 사용한 河川流域에서 구한 유출율과 총우량의 관계를 도시한 것이 「그림 2-2」이다. 총우량의 증가에 따라 流出率도 증가하며, 비교된 두 流域의 토지이용상태나 토양의 구성비등이 서로 비슷하여 그 유출특성도 유사하게 발생 한다. 유출율의 크기는 雨量과 流量의 관측오차, 직접유출량 산정 방법에 따라 地形, 地質, 先行降雨 및 降雨分布등의 영향을 받는다. 浸透流域은 都市化에 따라 流出率의 변화가 민감하며 비 침투지역은 그 효과가 뚜렷하지 못하다.

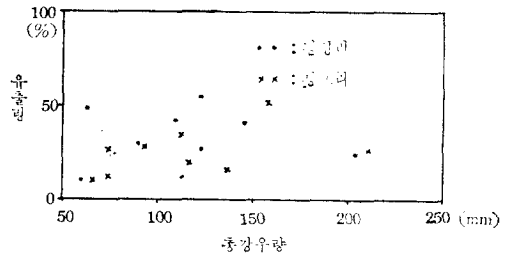


그림 2-2 유출율과 총강우량의 관계

3. 선행강우

自然地域의 浸透率과 流出率은 先行降雨에 의한 현재 토양의 함수상태에 따라 크게 좌우되며 그 관계를 도시한 것이 「그림 2-3」이다. 先行降雨로서 5日 先行降雨量을 사용하였으며 浸透地域에 있어서 流出率과의 상관관계가 뚜렷하다.

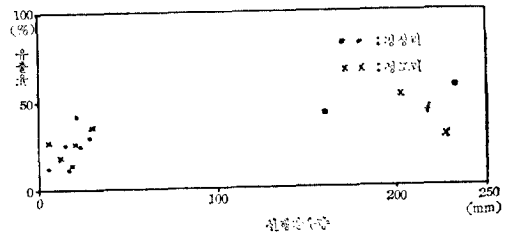


그림 2-3 유출율과 선행강우량과의 관계

4. 홍수도달시간

洪水到達時間은 流域의 면적크기, 형상, 지질, 토지이용상태 및 降雨強度등과 밀접한 관계가 있으며 그 특성들의 모든 효과는 洪水到達時間으로 집약되어 표현된다. 토지이용상태에 따라 분류한 자연침투지역의 홍수도달시간과 홍수도달시간내의 降雨強度와의 관계가 「그림 2-4」이다.

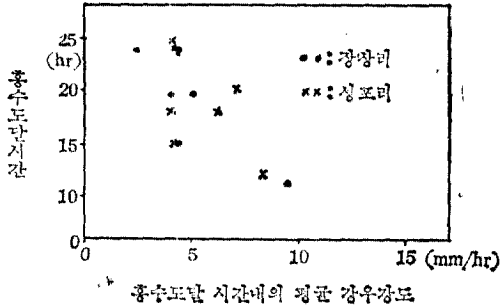


그림 2-4 홍수도달시간과 홍수도달시간내의 평균 강우강도

III. 流出의 基本式

降雨—流出의 변환과정은 일정한 것이 아니라 各流域의 地形, 地質등의 물리적 특성에 따라 각각 다양하게 발생한다. (그림 3-1 참조)

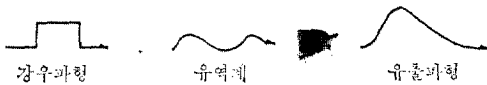


그림 3-1 수문곡선의 형성

1. 순간단위도와 유출방정식

선형계(linear System)에 대한 기본방정식은 충격함수기(Dirac Delta function)으로부터 유도될 수 있다. Delta 함수는 (3-1), (3-2)식과 같은 특성을 가진 분포함수로 나타내어진다.

$$\delta(t-t_0) = 0 \quad t \neq t_0 \text{ 일때} \quad (3-1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 \quad (3-2)$$

(3-2)식의 Delta 함수는 순간적인 충격에 대해 어떤 특정한 반응을 나타내며 정확한 수학적 표현은 (3-3)식과 같다.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (3-3)$$

시정수 불변의 선형계에 있어서 (3-3)식은 (3-4)식과 같이 나타내어진다.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (3-4)$$

「그림 3-1」과 같은 유역변환계에 물리적 특성을 고려하면 降雨流出과정은 (3-4)식을 이용해서 (3-5)식과 같이 정의 할 수 있다.⁸⁾

$$Q(t) = A \int_0^t H(\tau)r_e(t-\tau)d\tau \quad (3-5)$$

단, $H(\tau) = 0 : \tau \leq 0$

$H(\tau)$ 는 핵(Kernel) 함수로서 순간단위도를 의미하며 r_e 는 유효 강우량이다.

2. 中間流出 모델⁹⁾

斜면의 모양이 투수성이 낮은 재료로 구성되어 있거나 구릉지, 산지지형에서 표층이 낙엽등으로 피복되어 있는 경우 降雨의 浸透효과는 아주 크다. 이와 같은 경우 斜면의 흐름은 Darcy 법칙이 성립되는 포화침투류로서 洪水流出모델을 구성할 수 있다.⁴⁾

1차원 부정류로서 연속방정식¹⁰⁾은 (3-6)식과 같다. (그림 3-2 참조)

$$\frac{\partial(\lambda h)}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (3-6)$$

$$r_e = (r-f)\cos\theta \quad (3-7)$$

여기서,

h : 수심 θ : 사면의 경사각

f : 침투강도 r : 강우강도

λ : 공극율 r_e : 유효강우강도

운동방정식은 (3-8)식으로 나타낼 수 있다.

$$h = \alpha q^m \quad (3-8)$$

여기서, q : 사면 단위폭당유량

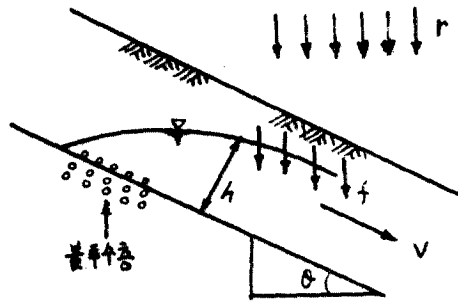


그림 3-2 중간유출 모델

α, m : 사면류경수

가정에서 사면의 흐름이 Darcy 법칙을 따른다고 하였으므로 사면류경수 α, m 은 (3-9)식과 같이 표현된다.

$$\alpha = 1/k \sin \theta = 1/k \cdot i, \quad m = 1 \quad (3-9)$$

k : 투수계수 $i = \sin \theta$: 사면경사

1차원 1개의 사면에 (3-6)~(3-9)식을 적용시켜 기본방정식을 유도하면 (3-10)식과 같다. (ref. 6 참조)

$$Q(t) = A \int_0^{\infty} U(T) r_s(t-\tau) d\tau \quad (3-10)$$

$$U(\tau) = \int_0^{\infty} \varphi(T) / T dT = 1.0 \quad (3-11)$$

(3-11)식의 $U(T)$ 는 핵함수로서 순간단위도이며, 사면에서의 유출해석은 到達時間의 분포함수인 $\varphi(T)$ 의 해석으로 집약된다.

Ⅶ. 浸透能을 고려한 流出解析

1. 유효우량 계산

유효우량을 계산하는 方法에는 降雨에 유출계수를 곱하는 유출계수법, 降雨強度에서 浸透量을 빼는 浸透法이 있다. 流出係數法은 유역이 浸透地域이나 불투수지역의 구분없이 적용되나 주로 都市流域의 流出解析에, 浸透法은 流域의 대부분이 침투지역인 경우에 적합한 것으로 알려져 있다. 浸透法을 사용하는 경우 (4-1)식과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} r_s &= r - f & ; r > f_p \\ &= 0 & ; r < f_p \end{aligned} \quad (4-1)$$

여기서, f_p : 침투능

降雨에 의한 地表流出이 존재할 때 浸透는 계속적으로 일어나며 식(3-7)에 적용되는 浸透能은 (4-2)식이 된다.

$$\begin{aligned} f &= f_p & ; h \geq 0 \\ &= 0 & ; h < 0 \end{aligned} \quad (4-2)$$

(4-2)식을 (3-10)식에 대입하면 (4-3)식으로 나타내어진다.

$$Q(t) = A \int_0^{\infty} \int_0^T \{r(t-\tau) - f(t-\tau)\} \cos \theta d\tau \cdot \frac{\varphi(T)}{T} dT \quad (4-3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f(t) &= f_p(t) & ; \int_0^T \{r(t-\tau) - f(t-\tau)\} d\tau \geq 0 \\ &= 0 & ; \int_0^T \{r(t-\tau) - f(t-\tau)\} d\tau < 0 \end{aligned}$$

기본식 (3-10)에서 流出 System은 선형이다.

반면에 (4-3)식에는 浸透速度가 고려되어 降雨과 流出이 비선형이 된다. 즉 降雨-流出의 비선형성은 降雨의 洪水流出과 地下水流出의 분리과정에 기인한다.

2. 최적해법에 의한 유출해석

(3-10)식이나 (4-3)식으로 유출해석을 시행하기 위해서는 到達時間의 분포 $\varphi(T)$ 가 정의 되어야 한다. Hirano¹⁾²⁾, Yamada³⁾ 등에 의하면 到達時間의 분포가 대수정규분포, 감마분포로 설명될 수 있다. 여기서 $\varphi(T)$ 를 대수정규분포로 가정하면 (4-4)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left\{ -\frac{(X - \bar{X})^2}{2\sigma_x^2} \right\} \quad (4-4)$$

단, $x = \log_{10} T$

$$\sigma_x = \log_{10} \sigma_T$$

(4-3)식에 의해 침투능을 고려한 유출해석을 위해 침투능 eq.으로 Horton³⁾의 경험공식인 (4-5)식을 사용하였다.

$$f_s = f_c + (f_0 - f_c) e^{-jt} \quad (4-5)$$

여기서, f_0 : 초기침투능

f_c : 중기침투능

j : 정수

(4-4), (4-5)식을 (4-3)식에 대입하면 \bar{X} , σ_x , f_c , f_0 및 j 등 5개를 Parameter로 하는 Parametric Model이 된다.

비선형다변수함수의 Parameter에 대한 최적화를 위해서 Simplex 법을 이용하여 비-1值的 조건으로 표현하면 (4-6)식과 같이 나타내어진다.

$$f(\bar{X}, \sigma_x, f_c, f_0, j) = \sum (Q_0 - Q_c)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (4-6)$$

단, $\bar{X} \geq 0$, $\sigma_x \geq 0$, $f_c \geq 0$, $f_0 \geq 0$, $j \geq 0$

여기서, Q_0 : 관측우량 Q_c : 계산우량

V. 적용에 및 검토분석

본 연구의 수치예를 위하여 사용된 資料는 IHP 보고서(건설부)¹¹⁾에 수록된 반월지역의 성포리 및 장상리 대표시험유역의 것이다. 유역면적은 1.635 km² 및 1.442km²이며, 降雨와 流量은 1979~1982년의 관측치와 분석치를 사용하였다. 유역의 토지 이용상태는 산지지역이 약 72%, 78%이며, 토양

표 5-1 관측치와 계산치와의 비교

유역	구분		Q_{max} (obs.) (m^3/sec)	Peak Time (obs.) (hr)	Q_{max} (Horton's eq.) (m^3/sec)	Peak Time (obs.) (hr)	Q_{max} (ϕ -index) (m^3/sec)	Peak Time (obs.) (hr)
	발생 연월일							
성포리	81. 7. 1		0.918	20	0.681	21	0.696	22
	81. 7. 5		1.577	11	1.542	13	1.545	13
	81. 7. 11		1.512	18	1.387	16	1.371	16
장상리	81. 7. 5		3.991	13	3.245	14	3.519	14
	81. 7. 11		1.523	19	1.316	21	1.360	21
	81. 9. 24		0.772	15	0.722	15	0.656	16

구성비는 SCS 분류에 따르면 투수성이 높은 토양이 약 70%, 74%로서 투수성이 높은 山地小地域으로 판단된다. 流域의 地形學의 特性에 의하면 中間流出 모델을 적용시킬 수 있다.

유효강우량의 산정 方法에 따라 水文曲線의 재현성에 크게 영향을 미친다. ϕ -index 법은 降雨초기의 침투손실량이나 강우진행도중의 浸透能의 변화를 적절히 표현하지 못하지만, 浸透能 eq.은 이와 같은 실제현상을 보다 적절히 표현할 수 있어 합리적인 재현 수단이 된다.

이 방법에 대한 효과를 비교분석하기 위해서 유효우량을 ϕ -index 법에 의해서 계산한 결과와 침투능을 고려한 유출방정식인 (4-4)식을 물리적인 미분 부여하는 최적해법에 의해서 계산한 결과를 나타낸 것이 그림 5-1, 2과 표 5-1 이다.

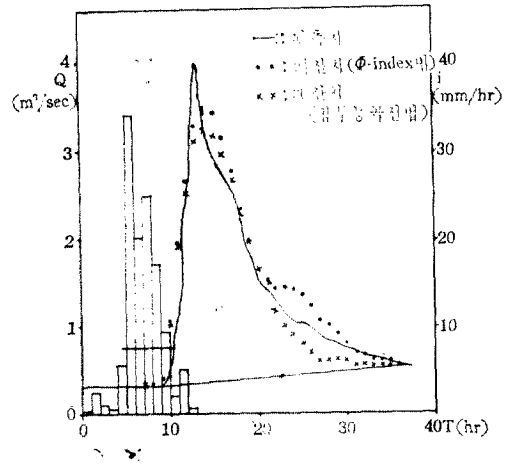


그림 5-2 관측치와 계산치의 비교 (장상리 81/7/5 홍수)

두 방법에 의한 직접유출 水文曲線의 재현 결과 尖頭流量은 크게 차이가 없고 水文曲線의 구성양상에 다소 차이를 보인다. (ϕ -index 법은 ref.6 참조)

Ⅵ. 結 論

1. 山地浸透流域은 流出率, 洪水到達時間, 尖頭流量 등이 先行降雨量 및 地形因子의 特性에 따라 지배된다.
2. 응답함수는 到達時間의 차를 및도함수로서 정의되며, 그것은 순간단위도를 나타낸다.
3. 선형계로 가정한 流域에 대한 降雨一流出의 비선형성은 유효우량의 산정법에 기인한다.
4. 浸透能 eq.을 이용한 유출방정식의 降雨一流出에 대한 재현성은 그 정도가 높으며, 실제현상을 합리적으로 표현할 수 있다.

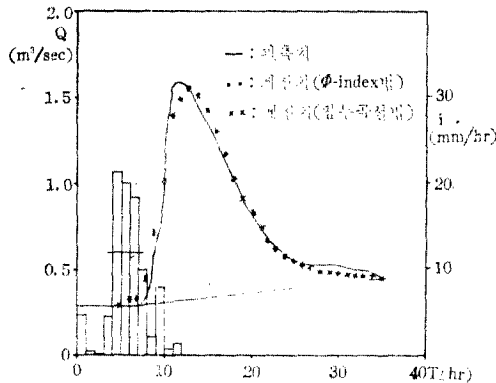


그림 5-1 관측치와 계산치의 비교 (성포리 81/7/5 홍수)

계산치와 관측치의 비교에 의하면 본 방법에 의한 직접유출 수문곡선의 재현성이 높다는 것을 알 수 있다.

参 考 文 献

1. 平野宗夫 “山地小河川における 流出過程について” 日本土木學會論文集, 第308號, pp.69~77, 1981.
2. 平野宗夫外 1人 “到達時間の 分布を 考慮した流出解析” 第22回 日本水理講演會論文集, pp.197~202, 1978.
3. 山田正 “時定數の スピクジルを用いる山地小流域の 洪水流出解析”, 日本土木學會論文集, 第314號 pp.87~97, 1980.
4. 角屋 睦 “丘陵山地流域モデルと洪水流出モデル” 京都大學防災研究所年報, 第21號 B-2, pp.219~232, 1978.
5. Wooding, R.A. “A Hydraulic Model for the Catchment-Stream Problem, I~IV.”, Journal of Hydrology, Vol3, pp.254~267, 1965.
6. 李元煥, 趙弘濟 “斜面の 特性과 洪水到達時間の 分布特性을 고려한 山地小流域의 流出解析,” 大韓土木學會論文集, 第3卷, 第4號, pp.59~70, 1983.
7. Arfken, “Mathematical Method for Physics.,” 2nd ed. pp.290~295, 1977.
8. 金再韓 “선형수문제의 해석 근사해법,” 大韓土木學會誌, Vol.29, No.4, pp.111~122, 1981.
9. V. T. Chow “Handbook of Applied Hydrology.,” 1964.
10. P. Eagleson., “Dynamic Hydrology.,” McGraw-Hill, pp.325~368, 1971.
11. 建設部, “IHP 국제수문조사보고서,” 1978~1982.