

都市化에 따른 雨水流出의 量的決定

全 炳 浩*

Jun, Byong Ho

1. 序 論

어느 流域에 대한 水文學的 特性을 究明하기 위해서 나 또는 水工構造物의 設計에 있어서 降雨와 流出間의 關係를 樹立하는 것은 極히 必要로 하게되며, 그 必要性은 都市化 地域의 增加와 함께 더욱 增加되어진다.

이들 關係 樹立에는 表1에서 보는바와 같이 세가지 形態의 경우를 考慮할 수 있으나, 이중 都市化 流域에 普遍的으로 使用되어지는 것은 都市化 形狀과 降雨形態가 주어졌을 경우 該當流域에서 發生되는 流出量을 決定하는 것이다.

表 1. 解析類型

| Type of Problem | Input | System | Output |
|-----------------|-------|--------|--------|
| Production | √ | √ | ? |
| Identification | √ | ? | √ |
| Detection | ? | √ | √ |

都市化 流域에 대한 降雨一流出關係의 解析은 合理式 및 修正合理式 方法, 概念의 方法, 到達時間—集水面積曲線 方法(특히 RRL Method), 運動波(Kinematic Wave) 模型 및 背水와 逆流效果까지를 고려한 數學的模型等이 많은 研究者들에 의하여 試圖되었으나 本考에서는 概念的模型과 運動波模型에 의한 降雨一流出關係를 살펴 보고자 한다.

2. 都市流域의 流出特性

流域의 都市化가 進行됨에 따라 自然狀態의 流域이었을 때에 比하여 가장 特徵的인 變化는 不透水 面積이 增加되는 것이며, 이에 따라 同一 降雨의 경우에도 尖頭流量과 流出容積이 增加하게 되며 尖頭流量 發生時間이 減少하고, 基底時間이 減少하는等 流量水文曲線이 현저히 變化하게 된다.

이와같은 현상을 몇몇 研究者들의 研究結果로 살펴

보면 다음과 같다.

Takao Ikuse et al⁽⁵⁾가 實施한 研究의 경우 Tama New Town에 있는 Bessho流域(流域面積 1.123km²)과 Nagayama流域(流域面積 0.0281km²)의 경우, 都市化된 Nagayama流域(아스팔트지역 21.8%, 콘크리트 지역 13.8%, 잔디지역 64.4%)이 都市化가 이루어지지 않은 Bessho流域(농장 17.36%, 숲 78.97%, 주택지 3.67%)에 比하여 流出容積은 降雨 100mm 일 경우 略2倍가 되었으며, 遲滯時間은 1/4 程度로 줄었고, 尖頭流量은 略5倍가 된다고 報告하고 있다.

또한 Fumio Yoshino⁽⁴⁸⁾는 日本內 60個의 自然狀態의 流域과 16個의 完全히 開發된 小流域에서 收集된 水文資料를 分析해본 結果, 都市化된 地域이 自然狀態 流域에 比해 到達時間(time of concentration)이 1/7 程度로 減少한다는 結論을 얻었다.

美國 13個 流域에 대한 Rao et al.⁽⁹⁾의 研究에서는 流域 面積에 대한 都市化가 이루어진 面積의 比를 U로 나타내고 U에 1을 더한 값(1+U)를 都市化 係數라 定義하여 이 都市化 係數에 따른 流量水文曲線의 變化和 尖頭流量의 變化, 尖頭流量 發生時까지의 時間變化等을 調査한 結果 都市化 係數가 1.5 즉, 流域面積의 50%程度 減少되고, 尖頭流量은 10~120% 程度 增加되는 것으로 나타났다.

Miller & Viessman⁽⁸⁾은 美國內의 Oakdale流域(流域面積 12.9에이커, 不透水 面積比率 55%)을 비롯한 4個 流域에 대한 研究에서 降雨가 1.5in. 以下일 때 流出量은 不透水 面積比率과 有効雨量에 의해 豫見될 수 있다고 보고, 다음과 같은 豫報方程式을 提示하였다.

$$R = 1.165 (I - 0.17) Pa \dots\dots\dots (1)$$

여기서 R은 流出量(inches), Pa는 有効雨量(inches), I는 流域面積에 대한 不透水 面積比(%)이다.

* 陸軍士官學校 助教授

3. 流出過程

流出過程은 降雨가 始作되면서 始作되어 遮斷, 蒸發, 蒸散, 浸透, 表面流出 등으로 그 地域을 떠날때 끝나며, 地面에 내린 降雨는 蒸發散, 浸透, 貯溜 등의 損失量을 제한 超過降水量에 의해 表面流出이 이루어진다.

基本的인 流出過程은 自然狀態의 流域이나 都市流域이 同一하나 都市地域은 不透水 面積이 크므로 透水 地域이 대부분인 自然狀態의 地域과는 다소 그 特性이 다르다. 透水 地域에 내린 降雨의 경우는 浸透 및 貯溜에 의한 물의 損失이 重要한 意味를 가지며, 流出 推定의 正確性은 이들 損失部分 推定의 正確性에 크게 依存된다. 그러나 駐車場, 道路等과 같이 不透水 表面에 내린 設計 技術者들의 關心對象인 降雨에 대하여는 浸透와 地表貯溜量은 全体 流出에 비하여 극히 미미한 影響을 미치므로 일반적인 不透水 地表에 대한 流出解析에 있어서는 이들의 影響은 무시된다.

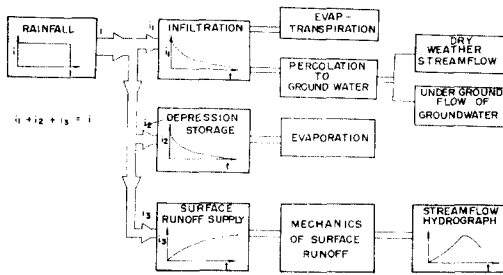


그림 1. 流出過程

都市化가 一部分만 이루어져 있을 경우에는 都市化가 안된 地域 즉 透水地域의 浸透 및 表面貯溜(depression storage)를 고려하여야 하는바, 浸透量은 Horton 公式,⁽¹⁰⁾Horton의 修正公式,⁽⁷⁾ Philip 公式,⁽¹⁰⁾Smith 解析方法⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾等을 使用하여 計算할 수 있다.

表面貯溜에 대한 研究를 살펴보면 Horton⁽³⁾은 平坦한 地域에 대한 表面貯溜高는 3.2 ~ 19 mm, 풀밭이나 숲과 같은 自然狀態의 地域에는 12.7 ~ 38.1 mm를 挾하였고, Chen & Shubinski⁽²⁾는 不透水 表面에 대해서는 1.59 mm를, 透水 表面에 대해서는 6.35 mm를 挾하여 不透水 地表의 面積比率이 P인 流域의 平均貯溜量을 $(6.35 - 4.76P)$ mm로 計算하였다. 不透水 地表에 대한 表面貯溜의 考慮는 앞에서 言及한 바와 같이 設計 降雨에 대하여는 무시될 수 있으나, 그리 크지 않은 降雨流出 解析에 대하여는 특히 도움을 줄 수 있는 것으로 思料된다.

4. 流域形狀 (Watershed Geometry)

降雨로 부터 流出에 이르는 過程은 많은 因子들의 相互作用으로 인하여 複雜한 系를 形成하게된다. 模擬實驗에 의한 流出模型을 構成하는 데는 正確性和 經濟性과의 比較로 부터 가장 實現性이 많은 模型을 構成하여야 하는바, 이를 위하여는 系에 影響을 주는 各種 因子의 妥當性있는 單純化가 必要하다. 따라서 自然流域의 幾何學的, 地形學的 複雜性을 單純化시키고 解析의 便易를 圖謀하기 위하여 流域의 形態를 다음과 같은 몇가지로 区分하여 解析하는 것이 試圖되었으며, 이들 模型의 選択은 降雨-流出間의 關係 樹立을 위한 該當 流域의 形狀 및 解析 方法에 따라 이루어져야 할 것이다.

現在 使用되고 있는 流域形狀의 單純化 方式을 살펴보면 다음과 같다.

가. 水斂模型 (Converging Model)⁽¹⁷⁾ : 流域을 Cone 形態로 取扱하여 解析하는 方法으로 Woolhiser와 Singh

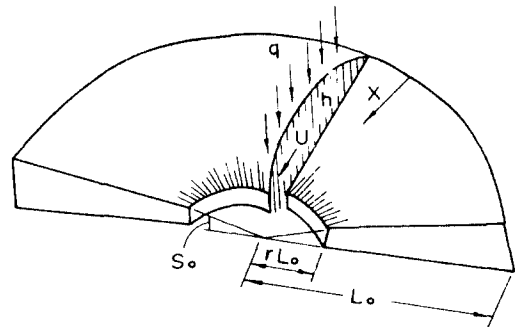


그림 2. 收斂模型

나. V模型⁽¹⁶⁾ : 流域을 두개의 矩形平面과 하나의 水路로 이루어지는, 즉 V形態로 取扱하여 解析하는 方法으로 Wooding 模型이라고도 부른다.

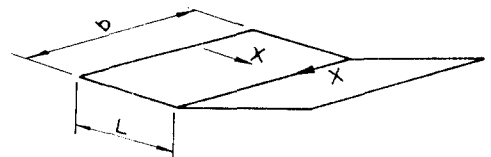


그림 3. V 模型

다. 複合模型 (Composite Model)⁽¹⁴⁾ : 收斂模型과 Wooding模型의 結合된 形態의 流域으로 보아 解析하는 方法으로 Singh에 의하여 試圖된 模型이다.

라. Cascade模型⁽¹⁾⁽⁶⁾ : 流域을 矩形平面과 水路들의 構成으로 解析하는 方法이며, 이때 矩形平面과 水路

는 各各 均一한 表面과 表面特性을 갖는 区域들로 假定되었다. 이 模型은 Brakensieck과 Kibler & Woolhiser에 의하여 試圖된 模型이다.

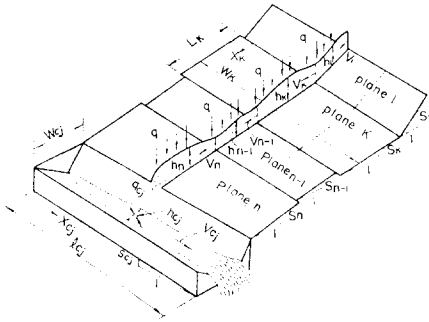


그림 4. Cascade 模型

5. 概念的模型 (Conceptual Model)

한 流域으로 부터의 流出을 流域의 貯水池와 河道의 貯溜作用을 받아 流域出口에서의 流出量으로 나타난다고 보고 流域 全体를 一聯의 貯水池와 河道로 構成되어 있다는 假定下에 다음 式으로 表示되는 貯溜方程式에 基礎를 두고 解析하는 方法이다.

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

여기서 I, Q는 임의 區間으로 흘러 들어오는 流入量과 흘러 나가는 流出量을 各各 表示하며, S는 貯溜量을 나타낸다.

이 概念的 模型에는 다음과 같은 線型(linear) 및 非線型(non linear) 方法을 들 수 있다.(7)

- Linear Relation $S = KQ$
- Exponential Relation $S = KQ^n$
- Demand Rate Proportional Relation $S = KQ \frac{dQ}{dt}$
- Exponential Demand Rate Proportional Relation $S = KQ^n \frac{dQ}{dt}$
- Prasad Relation $S = K_1Q + K_2 \frac{dQ}{dt}$

여기서 K는 貯溜常數(storage coefficient)이다.

本考에서는 많이 使用되어지는 線型關係(linear relation)를 利用한 몇가지 方法의 概要만을 紹介하려 한다.(9)(12)

가. 1 個 線型 貯水池 模型(single linear resevoir model)

流域을 하나의 貯水池로 보고 解析하는 方法으로, 이 模型에 대한 瞬間單位圖의 縱距는 다음 式으로 表示한다.

$$h(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \dots\dots\dots (3)$$

流入量으로 有效降雨量 I(t)가 주어질 경우 流出量 Q(t)는

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) \frac{1}{K} e^{-(t-\tau)/K} d\tau \dots\dots\dots (4)$$

貯溜常數 K는 時間의 函數이며, 有效降雨量 柱狀圖의 質量重心(mass center)과 直接流出 水文曲線의 重心(減水 曲線上的 變曲點)間의 時間 間隔으로 定義되는 遲滯時間 T_r과 같은 값을 갖는다.

都市化 流域에 대하여 K를 決定하기 위한 方法으로 Sarma, Rao & Delleur⁽¹²⁾는 다음과 같은 經驗式을 提案하였다.

$$K = 0.831 A^{0.458} (1 + U)^{-1.662} Pe^{-0.267} Tr^{0.371} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 A는 流出面積(mi²), L은 主流의 延長(miles), S는 河道의 平均傾斜, U는 不透水 面積比率, (1 + U)는 都市化 係數, Pe는 總有效 降雨量(inches)이고, Tr은 降雨 持續期間(hours)이다.

나. Nash 模型

貯溜常數 K_n을 갖는 n個의 線型 貯水池의 Cascade로 構成되는 概念的 模型으로 Nash에 의해 提案되었다.

이 模型에 대한 瞬間單位圖의 縱距는 다음 式으로 表示된다.

$$h(t) = \frac{1}{K_n} \frac{e^{-t/K_n}}{P(n)} (t/K_n)^{n-1} \dots\dots (6)$$

여기서 P(n)은 n의 冪函數이다.

常數 K_n과 n은 有效降雨量과 直接 流出量 分布의 두 瞬間으로 부터 求할 수 있는 값으로 降雨 形態에 따라 變化되나 Sarma, Rao & Delleur⁽¹²⁾는 다음과 같은 經驗式을 提案하였다.

$$nK_n = Tr \dots\dots\dots (7)$$

$$K_n = 0.575 A^{0.389} (1 + U)^{-0.622} Pe^{-0.106} Tr^{0.222} \dots\dots\dots (8)$$

다. 2 個 線型 貯水池 模型(two linear reservoir model)

이 模型은 Holtan & Overton⁽⁴⁾에 의해 提案된 模型으로 Nash 模型에서 n = 2인 特殊경우이다.

以上の 概念的 模型은 流域을 貯水池의 構成으로 解析한 것이며, 이외에도 Clark 模型이라 불리는 1 個의 線型 貯水池-水路模型(single linear reservoir-linear near channel model)⁽¹²⁾도 開發되고 있다.

6. 運動波 模型 (Kinematic Wave Model) ⁽⁶⁾⁽¹¹⁾⁽¹³⁾

均一한 地表面上에서나 또는 水路에서의 물의 흐름은, 흐름의 狀態가 空間的 時間的으로 變化하는 非定常流 (spatially varied unsteady flow) 로 特性지어지며, 이 흐름의 解析을 위한 側流入 (lateral inflow) 에 대한 1 方向 흐름의 連統方程式은

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (vh)}{\partial X} = q \dots\dots\dots (9)$$

여기서 h = 흐름의 깊이, q = 側流 (降雨), t = 時間, v = 平均流速, X = 上流端으로 부터의 距離이다.

運動量 方程式은

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial X} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_o - S_f) - \frac{g}{h} v \dots\dots\dots (10)$$

여기서 g = 重力加速度, S_o = 河床傾斜, S_f = 摩擦傾斜이며, 이 方程式의 첫째 항은 加速度, 둘째 항과 셋째 항은 運動에 너지와 位置에 너지의 變化, 넷째 항은 摩擦과 重力 그리고 마지막 항은 本流에 의하여 側流에 가해지는 運動量에 各各 關係를 갖는 항들이다.

地表面이나 水路에서의 運動波 흐름은 重力에 의한 흐름方向 分力과 摩擦力이 같아질 때 이루어지는데 이것은 에너지 항과 速度항이 重力과 摩擦效果에 비하여 무시될 경우이다. 그러므로 運動量 方程式은 다음 形態로 表示된다.

$$S_o = S_f \dots\dots\dots (11)$$

一般的으로 流速을 水深의 函數로 表示하면 다음과 같다.

$$v = \alpha h^{N-1} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 α 와 N 은 表面粗度와 形狀에 의해 決定되는 變數이며, 넓은 矩形平面이나 水路에 대하여 Manning 公式을 適用할 경우 $\alpha = \frac{1.49}{n} \sqrt{S_o}$, $N = \frac{5}{3}$ 이고, chezy 公式을 適用할 경우 $\alpha = C \sqrt{S_o}$, $N = \frac{3}{2}$ 의 값을 갖는다.

이제 式(9)에 式(12)를 適用하면

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha h^N)}{\partial X} = q \dots\dots\dots (13)$$

式(13)을 運動波 方程式이라 하며, 單純化된 初期條件과 境界條件을 適用하여 解松의으로 풀이할 수 있다.

表面流出의 偏微分 方程式인 式(13)의 解를 求하기 위해서는 有限差分法 (finite difference method) 을 適用한으로서 近似解를 얻을 수 있다.

7. 結 論

都市化 流域은 自然流域에 비하여 그 面積이 작은 경우가 많고, 流域의 表面特性이 보다 均一하므로, 自然流域에 適用되는 많은 模型들을 準用할 수 있으며, 電子計算機의 使用으로 解析의인 方法도 많이 發展되고 있다. 우리나라와 같이 直接流出量의 記錄이 거의 없는 實情에서는 都市化가 計劃 또는 進行中인 流域뿐만 아니라, 都市化가 完全히 이루어진 流域에 대하여도 降雨 入力과 流域의 形狀等을 因子로 하여 流出量을 決定하는 것이 特히 必要하며, 流出의 量的 決定을 위한 模型들의 研究 및 開發이 이루어져야 할 것이다.

References

1. Brakensiek, D.L., "A Simulated Watershed Flow System for Hydrograph Prediction: A Kiematic Application." Paper No. 3, Proc. of the International hydrology Symposium, Fort Collins, Colorado, 1967.
2. Chen, C.W., and Shubinski, R.P., "Computer Simulation of Urban Storm Water Runoff." J. Hydraul. Div., HY2, pp. 289-301, 1971.
3. Chow, V.T., "Section 20, Hydrology of Urban Areas." Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1964.
4. Holtan, H.N., and Overton, D.E., "Storage Flow Hysteresis in Hydrograph Synthesis." J. Hydrol., Vol. 2, pp. 309-323, 1964.
5. Ikuse, T., Mimura, A., Takeuchi, S., and Matsushita, J., "Effects of Urbanization on Run-off Characteristics." IAHS-AISH Publication No. 117, Tokyo Symposium, pp. 377-385, 1975.
6. Kibler, D.F., and Woolhiser, D.A., "The Kinematic Cascade as a Hydrologic Model." Hydrology paper No. 39, Colorado, State University, Fort Collins, Colorado, 1970.
7. McCarthy, J.R., "Conceptual Analysis of Rainfall and Runoff Data with a Hybrid Computer." Water Resour. Res., Vol. 8, No. 4, pp. 942-955, 1972.
8. Miller, C.R., and Viessman W., Jr., "Runoff Volumes from Small Urban Watersheds." Water Resour. Res., Vol. 8, No. 2, pp. 429-434, 1972.
9. Rao, R.A., Delleur, J.W., and Sarma, P. B. S., "Conceptual Hydrologic Models for Urbanizing Basins." J. Hydraul. Div., HY7, pp. 1205-1220, 1972.
10. Rodda, J. C., "Facets of Hydrology." John Willey & Sons, PP. 199-227, 1976. <32 로 계속>