

降雨—流出解析의 基礎와 應用(V報)

—無次元單位圖에 依한 設計洪水量的 推定—

李 淳 赫*

I. 緒 論

各種 水工構造物의 設計에 있어서는 本 講座 IV報에서도 言及한바와 같이 洪水時의 尖頭流量인 設計 洪水量的 推定이 先行되어야함은 周知의 事實이다. 이를 解決하기 위한 方法으로는 合理式을 爲始한 各種 經驗式과 頻度解析方法 및 單位流量圖法으로 大別할 수 있다. 여기에서 合理式에 依한 尖頭流量의 推定은 既IV報의 講座에서 이미 言及되었으며 頻度分析方法是 長期間에 걸친 流量資料가 있어야만 하는 條件때문에 이의 使用에 대한 制限性이 있게 된다. 마지막으로 單位流量圖法은 複雜한 水文循環過程을 單純化시킨 經驗式에 反해 流出量의 時間的 分布를 나타내는 理論的인 妥當性과 함께 實務에 活用結果가 좋은 點으로 미루어 本 報에서는 無計測流域에서도 使用 가능한 여러가지 方法의 合成單位流量圖法中 SCS無次元單位圖法과 筆者가 試圖한 線形模型에 依한 無次元單位圖法을 紹介하고자 한다. 既約된 五回分의 講座로 降雨—流出解析의 基礎를 마무리 짓기에는 너무나 무리였음을 痛感하며 次期에 機會가 있다면 勿다 多面面들을 補充하기로 하고 一但 5회에 걸친 連載로 끝을 맺고자 한다.

II. 合成單位流量圖의 定義

單位流量圖라 함은 어느 流域에 一定單位時間동안 均一한 降雨強度로 내리게 되는 1cm 또는 1inch의 單位有効雨量에 依해 나타나는 直接流出水文曲線이다. 이러한 單位圖의 誘導를 爲해서는 降雨와 함께 流出의 資料가 同時에 必要하게 되며 特히 降雨는 時間的, 空間的으로 均等하게 分布되어야 하며 獨立的인 豪雨로서 降雨持續時間은 짧고 流域面積은 작을수록 좋다.

上記한 降雨와 流出資料를 가지고 該當 觀測點에 대한 單位圖의 誘導가 可能하지만 實際的으로는 降雨와 流出의 測定이 全히 되어 있지 않은 流域에 대해서 設計洪水量 決定을 爲해 單位圖를 必要로 할 경우가 대단히 많다. 이러한 問題를 解決하기 爲하여 他 流域에서 얻은 流域의 크기, 傾斜, 河川長과 같은 流域特性들과 尖頭流量, 尖頭流量發生時間, 基底時間과 같은 單位圖의 構成要素間의 關係式을 使用함으로써 未計測流域에 對한 單位圖의 合成을 可能케 한다. 이러한 目的을 爲해 求해진 單位圖를 合成單位圖(Synthetic unit hydrograph)라 한다. 一般으로 單位圖의 合成은 尖頭流量과 發生時間, 基底時間 및 遲滯時間의 關係式으로 可能하다. 이러한 單位圖의 主要 合成方法으로서는 Snyder方法, SCS方法, Clark 및 Nash의 瞬間單位流量圖法이 있다. 이中 Snyder方法에 依해 우리나라의 漢江, 錦江, 洛東江의 中·大流域을 상대로 合成한 單位流量圖의 結果가 發表¹⁾되었으며 筆者는 우리나라 主要 四大江의 上流 小流域을 對象으로 瞬間單位圖를 誘導하므로써 小流域에 對한 單位圖의 合成을 可能케 하였다²⁾.

마지막으로 本 講座의 主題인 SCS方法의 無次元單位圖法과 線形 模型을 基本으로한 筆者에 依해 開發된 無次元單位圖法에 關해 考察해보기로 한다.

III. SCS 無次元 單位圖法

이 方法은 美國 農務省의 土壤保全局¹⁾(Soil Conservation Service)에 依해 提示된 方法으로서 原來는 水文曲線이 그림 5-1에서 보여주는바와 같이 삼각형의 形態를 갖게 된다는 假定下에 單位圖의 合成을 다음과 같이 試圖하였다. 그림 5-1에서와 같이 單位圖下의 面積은 直接流出量의 總面積과 같으므로

$$Q = \frac{1}{2} q_p (t_p + t_r) \dots\dots\dots (5-1)$$

여기에서 Q : 直接流出量의 總容積(in),
 q_p : 尖頭流出量(in/hr)
 t_p : 尖頭流出量到達時間(hrs)
 t_r : 減水時間(hrs)

(5-1)式으로부터

$$q_p = \frac{Q}{t_p} \left[\frac{2}{1+t_r/t_p} \right] \dots\dots\dots (5-2)$$

(5-2)式의 괄호에 있는 項을 K 로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$q_p = \frac{KQ}{t_p} \dots\dots\dots (5-3)$$

여기에서 in/hr의 單位를 ft^3/sec 로 하며 流域面積($mile^2$)과 時間 T (hrs)를 넣으므로써 다음의 一般式이 된다.

$$q_p = \frac{645.33KAQ}{t_p} \dots\dots\dots (5-4)$$

여기에서 q_p : 尖頭流出量(cfs)

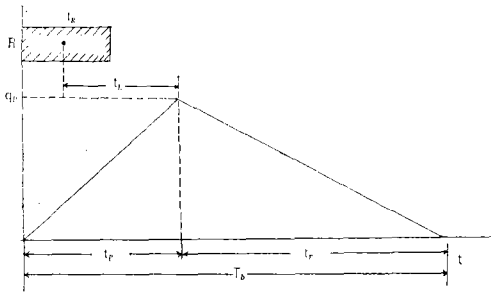


그림 5-1. SCS方法에 依한 單位圖合成

또한 SCS의 實驗結果에 依해서

$$t_p = 1.67t_r \dots\dots\dots (5-5)$$

이 提示되었으므로 이로서 (5-2)式에 依據 $K=0.75$ 가 된다.

K 의 값을 (5-4)式에 代入하면

$$q_p = \frac{484AQ}{t_p} \text{ (cfs)} \dots\dots\dots (5-6)$$

이 된다.

그림 5-1에 依하여 尖頭流量到達時間, t_p 는

$$t_p = \frac{1}{2} t_R + t_L \dots\dots\dots (5-7)$$

여기에서 t_R : 有効降雨의 持續期間(hrs)

t_L : 遲滯時間(hrs)

그리고 SCS의 發表에 依하면 流域의 遲滯時間, t_L 과 洪水到達時間, t_c 와의 關係는 다음의 式으로 發表되었다¹¹⁾.

$$t_L = 0.6t_c \dots\dots\dots (5-8)$$

(5-8)式을 (5-6)式에 代入하면

$$q_p = \frac{484AQ}{\frac{1}{2} t_R + 0.6t_c} \dots\dots\dots (5-9)$$

가 된다.

이로서 (5-7) 및 (5-6)式이나 (5-9)式에 依하여 有効降雨의 持續期間이 t_R 인 單位圖를 求할 수가 있다. (5-7)式에서 나타난 遲滯時間은 流域面積의 크기에 따라 다르며 우리나라 主要 水系別 中大流域의 遲滯時間에 關한 經驗公式을 보면 表 5-1과 같다⁹⁾.

表-5-1. 流域의 遲滯時間에 關한 經驗公式

流域名	t_L	備考
漢江	$1.44(L.L_C)^{0.3040}$	$t_R=2hr$
錦江	$0.1141(L.L_C)^{0.6155}$	$t_R=2hr$
洛東江	$0.253(L.L_C)^{0.4171}$	$t_R = \frac{t_p}{3}$

一便筆者⁹⁾가 우리나라 主要 四大江의 上流 小流域($84.3 \sim 470.2km^2$)에서 一律的으로 適用할 수 있는 經驗公式을 誘導한바 $t_L = 3.228A^{0.906}L^{-1.298}$ 과 같이 나타났다. 또한 SCS에서 發表한 結果에 依하면 遲滯時間은 主要 流域面積과 關聯성이 큰것으로 나타났다. 例로 美國 Texas주에서는 $t_L = 1.44A^{0.6}$ 으로 Ohio주는 $t_L = 0.54A^{0.6}$ 으로 發表하였다. 前述한 (5-6)과 (5-7) 및 (5-9)式에 依해 任意의 有効降雨持續時間, t_R 에 대한 單位圖를 作成하는데 도움이 되기 위해 SCS는 美國內 여러 地方에 對한 大小 流域으로부터 單位流量圖를 分析하여 流域의 크기나 形狀 等의 流域特性에 關係없이 使用可能한 表 5-2 및 그림 5-2와 같은 無次元 單位圖를 提示하였다¹¹⁾. 이

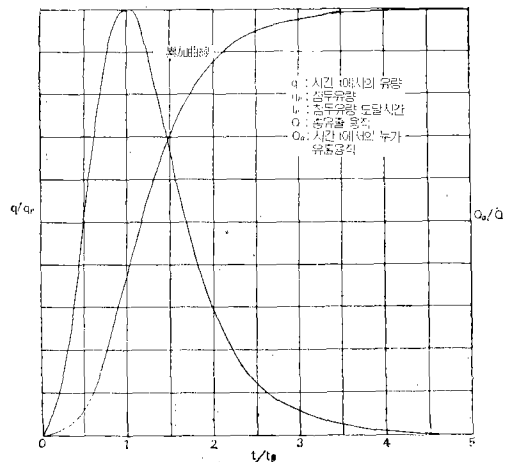


그림 5-2. SCS 無次元單位圖와 累加曲線

表-5-2. SCS 無次元單位圖와 累加曲線の 比

t/t_p	q/q_p	Q_a/Q
0.0	0.000	0.000
0.1	0.030	0.001
0.2	0.100	0.006
0.3	0.190	0.012
0.4	0.310	0.036
0.5	0.470	0.065
0.6	0.660	0.107
0.7	0.820	0.163
0.8	0.930	0.228
0.9	0.990	0.300
1.0	1.000	0.375
1.1	0.990	0.450
1.2	0.930	0.522
1.3	0.860	0.589
1.4	0.780	0.650
1.5	0.680	0.700
1.6	0.560	0.751
1.7	0.460	0.790
1.8	0.390	0.822
1.9	0.330	0.849
2.0	0.280	0.871
2.2	0.207	0.908
2.4	0.147	0.934
2.6	0.107	0.953
2.8	0.077	0.967
3.0	0.055	0.977
3.2	0.040	0.984
3.4	0.029	0.989
3.6	0.021	0.993
3.8	0.015	0.995
4.0	0.011	0.997
4.5	0.005	0.999
5.0	0.000	1.000

는 橫座標가 t/t_p 로, 縱座標가 q/q_p 로 作成되였으며 上記한 式들로부터 q_p 와 t_p 가 求해지면 最終的으로 單位圖의 合成이 可能하게 된다.

IV. 線形模型에 依한 無次元 單位圖法

1. 無次元 單位圖方程式의 誘導

Nash는 流域全體가 一聯의 貯水池로 構成되어 있다고 假定하여 水文曲線을 誘導하기 爲한 概念的 模

型(Conceptual model)을 提案하였다. 이 模型에 依한 貯溜量과 流出量의 線形關係 追跡으로⁷⁾

$$q = \frac{2.78AR}{K\Gamma(n)} e^{-t/K} (t/k)^{n-1} \dots\dots\dots (5-10)$$

$$\text{或은 } q = \frac{2.78AR}{K\Gamma(n)} (t/k)^{n-1} e^{-t/K} \dots\dots\dots (5-11)$$

여기에서 q : 流出量(m^3/sec)
 t : 直接流出始作後 經過時間(hrs)

V : 流出客積(m^3)
 R : 總直接流出量(cm)
 K : 貯溜常數(hrs)
 n : 形狀媒介變數

(5-10)式에서 單位客積, V 에 對한 單位水深의 單位流量曲線에 있어서 時間分布는

$$q(t) = \frac{1}{K\Gamma(n)} e^{-t/K} (t/k)^{n-1} \dots\dots\dots (5-12)$$

(5-12)式을 t/k 에 關해 微分해서 0으로 놓으므로서 尖頭流量到達時間, t_p 가 誘導된다.

$$\text{即 } \frac{1}{K\Gamma(n)} e^{-t/K} [(t/k)^{n-2}(n-1) - (t/k)^{n-1}] = 0$$

$$t/k = n-1, \quad t = t_p \text{일 때}$$

$$t_p = (n-1)K \dots\dots\dots (5-13)$$

(5-13)式에서

$$K = \frac{t_p}{n-1} \dots\dots\dots (5-14)$$

(5-14)式을 (5-11)式에 代入하면

$$q = \frac{2.78AR}{t_p} \frac{(n-1)^n}{\Gamma(n)} [(t/t_p) e^{-t/t_p}]^{n-1} \dots\dots\dots (5-15)$$

(5-15)式에서 $t = t_p$ 일 때에

$$q_p = \frac{2.78AR}{t_p} \frac{(n-1)^n}{\Gamma(n)e^{n-1}} \dots\dots\dots (5-16)$$

여기에서 R 은 總直接流出量으로 單位圖에 있어서 1이다. q/q_p 와 t/t_p 의 無次元比로서 나타내는 無次元單位圖는 (5-15)式과 (5-16)式에 依해서 關係式을 나타낼 수 있다.

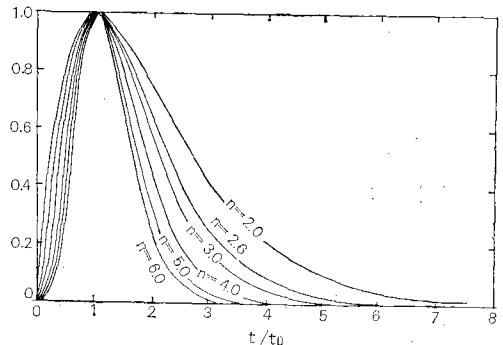


그림. 5-3. n을 달리한 無次元單位圖의 樣相

即 (5-15)式을 (5-16)式으로 나누면

$$q/q_p = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{n-1} [e^{-(n-1)}] \left(\frac{t}{t_p}\right)^{-1} \dots\dots\dots (5-17)$$

이 된다. (5-17)式은 n 을 媒介變數로 하는 無次元 單位圖를 爲한 方程式으로 n 值를 各各 달리했을 때의 無次元 單位圖는 그림 5-3과 같다.

2. 貯溜常數, K 와 流域特性間의 關係

貯溜常數는 流出量 算定뿐 아니라 尖頭洪水量 到達時間 算定에 必要한 媒介變數이다. 우리나라 主要 四大江 上流部의 小流域(84.3~470.2km²)을 對象으로 moment method에 依해 求한 貯溜常數와 流域特性間에 經驗公式 誘導를 試圖한바 河川長과 河川傾斜에 關聯하여 다음의 (5-18)式과 같이 나타냈다”.

$$K = 0.12(L/\sqrt{S}) \dots\dots\dots (5-18)$$

3. 形狀媒介變數, n 와 流域特性間의 關係

形狀媒介變數, n 은 線形模型에 依한 無次元 單位圖 誘導에 必須不可缺한 要素로 이 역시 上述한 貯溜常數와 같이 moment method에 依해 求하였으므로 이는 流域面積, 河川長, 河川重心長 및 河川傾斜 等의 河川特性들과 複合回歸關係를 나타내는 (5-19)式으로 誘導되었다”.

$$n = 49.2A^{1.461}L^{-2.202}Lca^{-1.207}S^{-0.112} \dots\dots\dots (5-19)$$

以上에서 求한 無次元 單位圖 誘導를 爲한 方程式과 이 方程式에 內包된 貯溜常數, 形狀媒介變數 및 尖頭流量到達時間에 關한 相關式의 利用으로서 所期하는 流域에서의 無次元單位圖 誘導가 可能하게 된다.

V. 無次元 單位圖의 應用例

[例題 1] 流域面積이 85mile²이고 遲滯時間이 4時間이며 有効降雨의 持續時間이 2時間인 流域에서 SCS의 無次元單位圖法에 依하여 2時間 單位圖를 誘導하라.

[解] 1) 尖頭流量到達時間을 (5-7)式에 依해 求한다.

$$t_p = \frac{1}{2}t_R + t_L = \frac{2}{2} + 4 = 5 \text{ hrs}$$

2) 尖頭流量 q_p 를 (5-6)式에 依據하여 求한다.

$$q_p = \frac{484AQ}{t_p} = \frac{484 \times 85 \times 1}{5} = 8,228 \text{ ft}^3/\text{sec}$$

3) SCS 無次元 單位圖의 t/t_p 에 對한 q/q_p 의 比를 利用하여 2時間 單位圖의 時間과 流量을 求하던 表 5-3, 및 그림 5-4과 같다.

[例題 2] M 流域에 있어서 流域面積은 112km², 形狀媒介變數, n 의 값은 4.0, 貯溜常數, K 의 값은

表-5-3. SCS 無次元單位圖에 依한 2時間 單位圖誘導

t/t_p (1)	q/q_p (2)	時間 (1)×5hrs (3)	流量 (2)×8,228 (4)	t/t_p (1)	q/q_p (2)	時間 (1)×5hrs (3)	流量 (2)×8,228 (4)
0	0.000	0	0	1.7	0.460	8.5	3,785
0.1	0.030	0.5	247	1.8	0.390	9.0	3,209
0.2	0.100	0.1	823	1.9	0.330	9.5	2,715
0.3	0.190	1.5	1,563	2.0	0.280	10.0	2,304
0.4	0.310	2.0	2,551	2.2	0.207	11.0	1,703
0.5	0.470	2.5	3,867	2.4	0.147	12.0	1,210
0.6	0.660	3.0	5,430	2.6	0.107	13.0	880
0.7	0.820	3.5	6,747	2.8	0.077	14.0	634
0.8	0.930	4.0	7,652	3.0	0.055	15.0	453
0.9	0.990	4.5	8,146	3.2	0.040	16.0	329
1.0	1.000	5.0	8,228	3.4	0.029	17.0	239
1.1	0.990	5.5	8,146	3.6	0.021	18.0	173
1.2	0.930	6.0	7,652	3.8	0.015	19.0	123
1.3	0.860	6.5	7,076	4.0	0.011	20.0	91
1.4	0.780	7.0	6,418	4.5	0.005	22.5	41
1.5	0.680	7.5	5,595	5.0	0.000	25.0	0
1.6	0.560	8.0	4,608				

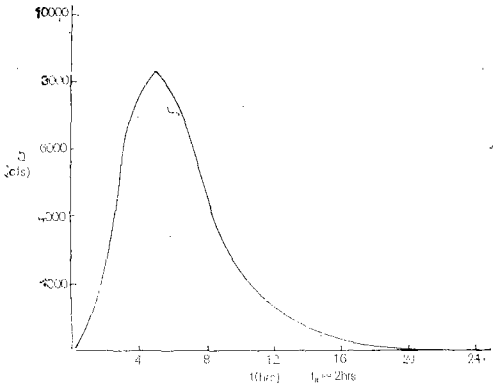


그림. 5-4. SCS無次元單位圖法에 의한 2시간 單位圖誘導

2 이며 有效降雨의 持續時間은 2時間이다. 無次元 單位圖方程式(線形模型)에 依해서 이 流域에 對한 無次元 單位圖와 이에 依한 2時間 單位圖를 誘導하라.

[解] 1) 주어진 n 의 값과 함께 t/t_p 의 비율 0.1 에서 大略 5까지 q/q_p 의 값을 (5-17)式인 $q/q_p = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{n-1} [e^{-(n-1)\left(\frac{t}{t_p}-1\right)}]$ 에 代入하여 t/t_p 에 따른 q/q_p 의 값을 算定한다. 算定된 結果는 表 5-4 및 그림 5-5와 같다.

表-5-4. 時間比에 따른 無次元單位圖 縱距

t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p
0.1	0.008	1.4	0.802
0.2	0.064	1.5	0.720
0.3	0.174	1.6	0.637
0.4	0.334	1.8	0.479
0.5	0.510	2.0	0.345
0.6	0.681	2.2	0.240
0.7	0.821	2.4	0.162
0.8	0.923	2.6	0.107
0.9	0.982	2.8	0.061
1.0	1.000	3.0	0.044
1.1	0.984	3.5	0.013
1.2	0.941	4.0	0.008
1.3	0.878	4.5	0.001

2) 尖頭流量의 到達時間을 (5-13)式에 依해 求한다.

$$t_p = (n-1)K = (4-1) \cdot 2 = 6\text{hrs}$$

3) 尖頭流量, q_p 를 (5-16)式에 依해 求한다.

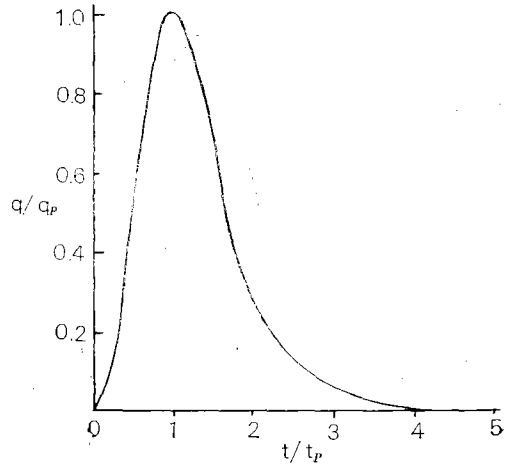


그림. 5-5. 無次元單位圖의 作成

$$q_p = \frac{2.78AR(n-1)^n}{t_p \Gamma(n) e^{n-1}} = \frac{2.78 \times 112 \times 1(3)^4}{6 \times \Gamma(4) \cdot e^3} = \frac{25,220.16}{723.08} = 34.9 \text{m}^3/\text{sec}$$

4) 表 5-4의 無次元 單位圖의 t/t_p 와 q/q_p 를 利用하여 2時間 單位圖의 時間과 流量을 求한 結果는 表 5-5 및 그림 5-6과 같다.

表-5-5. 無次元單位圖(線形模型)에 依한 2시간 單位圖誘導

t/t_p	q/q_p	時間 (1) × 6hrs (3)	流量 (2) × 34.9 (4)
0	0	0	0
0.1	0.008	0.6	0.3
0.2	0.064	1.2	2.2
0.3	0.174	1.8	6.1
0.4	0.334	2.4	11.7
0.5	0.510	3.0	17.8
0.6	0.681	3.6	23.8
0.7	0.821	4.2	28.7
0.8	0.923	4.8	32.2
0.9	0.982	5.4	34.3
1.0	1.000	6.0	34.9
1.1	0.984	6.6	34.3
1.2	0.941	7.2	32.8
1.3	0.878	7.8	30.6
1.4	0.802	8.4	27.9
1.5	0.720	9.0	25.1
1.6	0.637	9.6	22.2
1.8	0.479	10.8	16.7
2.0	0.345	12.0	12.1
2.2	0.240	13.2	8.4

2.4	0.162	14.4	5.7
2.6	0.107	15.6	3.7
2.8	0.061	16.8	2.1
3.0	0.044	18.0	1.5
3.5	0.013	21.0	0.5
4.0	0.008	24.0	0.3
4.5	0.001	27.0	0.04
5.0	0	30.0	0.0

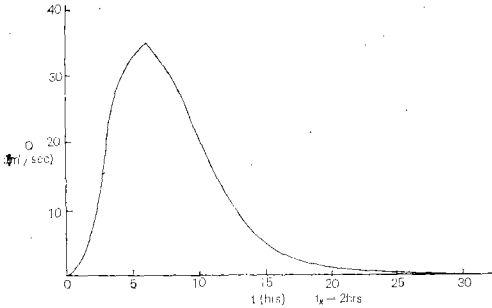


그림. 5-6. 無次元單位圖에 의한 2시간 單位圖의 誘導

參 考 文 獻

1. A.J. Raudikivi: Hydrology, Pergamon Press, pp.222~241.
2. A.T. Hjelmfelt and J.J. Cassidy: Hydrology for Engineers and planners, ISU Press, pp. 107~113.

3. D.M. Gray: Handbook on the principles of the Hydrology, WIC Publication pp.8.36~8.47.
4. E.F. Schulz: Problems in applied Hydrology, W.R.P. pp.325~331.
5. E.M. Wilson: Engineering Hydrology, Macmillian pp.95~128.
6. 李淳赫: 韓國主要水系の 小流域에 對한 瞬間單位圖 誘導에 關한 研究(I), 韓國農工學會誌, Vol.19, No.1, pp.18~33.
7. _____: 線形模型에 依한 小流域에 있어서의 無次元單位圖 誘導에 關한 研究, 韓國農工學會誌, Vol.23, No.3, pp.78~87.
8. 建設部: 洪水量推定을 爲한 合成單位流量圖 誘導의 研究調查報告書, pp.245~248.
9. P.S. Eagleson: Dynamic Hydrology, McGraw Hill, pp.325~348.
10. R.K. Linsley and et al: Hydrology for Engineers, McGraw Hill, pp.218~229.
11. SCS, U.S. Department of Agriculture: Hydrology, pp.16.1~16.25.
12. Ven Te Chow: Handbook of Applied Hydrology, McGraw Hill, pp.21-41~21-46.
13. Warren Viessman, J.W. Knapp and G.L. Lewis: Introduction to Hydrology, Harper & Row, pp.134~144.

<끝>