한국환경위생학회지, 제21권 제1호 (1995)
Kor. J. Env. Hlth. Soc., Vol. 21, No. 1, pp. 29~38 (1995)

最適 用水 供給量 算定을 爲한 推計學的 貯水容量 모델

張仁洙 · 朴定奎* · 兪一濬*
忠州産業大學校 環境工學科, 大田專門大學 環境管理科

Stochastic Reservoir Model for the Estimation of Optimal Water Supply

In-Soo Chang, Jung Kyoo Park* and Il Jun Yu*
Department of Environmental Engineering, Chungju National University
Department of Environmental Management, Teajon Junior College

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the present methodology for the estimation of optimal water supply from an impounding reservoir. The stochastic reservoir storage model presented in this paper is believed to be rational in that the probability of reservoir depletion (return period) is to be calculated for the various monthly demands and storage capacities. The monthly flows are used to derive the reservoir storage capacity-monthly demand-probability curves at Dalcheon damsite and Hongcheon damsite in Han river basin.

Keywords : 마코프 過程 (Markov process), 遷移確率行列 (Transition probability matrix), 最適 用水供給量 (Optimal water supply), 推計學的 貯水用量 모델 (Stochastic reservoir storage model).

I. 序　　論

오늘날 急速한 經濟發展 및 人口增加 그리고 都市化의 進展 등으로 인하여 各種 用水需要가 急增하게 되었으며 이에 따라 用水의 安定된 供給問題가 심각하게 提起되고 있다. 그런데 우리나라의 年平均 降水量은 1,274 mm로서 世界平均의 1.3倍나 되는 비교적 풍부한 量이지만 이 降水量의 2/3가 洪水期인 6~9月에 集中 降下하므로 自然河川으로부터 直接 取水하는 方法으로는 渴水期의 用水需要를 充足시킬 수 없는 어려운 實情에 놓여 있다. 이를 解消하는 方法으로서 貯水池를 만들어 洪水期의 풍부한 물을 일단 貯留했다가 渴水期에 各種 利水目的의 用水 需要를 充足시키고 있다. 그런데 지금까지 貯水池의 施工方法은 많은 發展을 하여 왔지만 貯水池容量에 따른 最適 用水供給量의 決定問題는 經驗에 바탕을 둔 技術的 判斷에 의존해 왔다. 즉 貯水池容量과 用水 供給量의 關係는 지금까지 주로 累加曲線法으로 分析하였는데 이 技法으로 算定된 필요 貯水容量은 分析에 使用된 流量資料의 길이가 增加하면 필요 貯水容量도 增加하는 등 未備點이 많아 最適의 分析法이 아닌 것으로 判明되었다.[1]

本 硏究에서는 貯水池로부터 貯水池 容量 및 確率에 따른 最適 用水供給量을 決定하기 위하여 推計學的 貯水容量 모델을 誘導하였으며 北漢江 支流인 洪川江의 洪川댐 建設 豫定地點과 南漢江 支流인 達川의 達川 水位標 地點에 用水供給用 貯水池를 建設한다고 假定하고 모델을 適用 檢討하였다.

II. 모델의 基本理論

1. Markov 過程

時點에 따라 변하는 시스템(system)의 狀態 變化를 離散的인 時間單位에 대하여 생각하고 시스템이 취할 수 있는 狀態의 數가 有限하여 N개의 狀態空間(state space)을 가진다고 할 때 時點 t에서의 시스템의 狀態 X_t는

$$X_{t,i} \quad (i=1,2,3,\cdots, n) \tag{1}$$

이면, 條件附確率(conditional probability)의 概念을 사용하여 Markov 過程의 特性을 나타내는 式은 다음과 같다.

$$\Pr(X_{t+1}=j|X_1=i_1,\ X_2=i_2,\ \cdots\cdots,\ X_t=i)$$
$$=\Pr(X_{t+1}=j|X_t=i) \qquad (2)$$

즉 Markov 過程이란 시스템이 하나의 狀態에서 다른 狀態로 바뀔 確率이 오직 直前 狀態에만 의존하는 確率的 過程이다.

모든 $t \geq 0$에 대하여

$$\Pr(X_{t+1}=j|X_t=i)=\Pr(X_1=j|X_0=i)=P_{ij} \qquad (3)$$

가 성립되는 것을 특히 Markov連鎖(Markov chain)라고 하며, 遷移確率(transition probability) P_{ij}는 時間에 대하여 獨立的이다. Markov連鎖에서는 行(row)의 確率 Vector의 合이 1임을 나타내는 다음 式이 성립하며,

$$\sum_{j=1}^{n} P_{ij}=1 \qquad (4)$$

P_{ij}로 만들어지는 $n \times n$行列, 즉 $P=[P_{ij}]$가 遷移確率行列(transition probability matrix)이다. 時點 t에서의 狀態가 i일 確率 $\Pr(X_t=i)$를 $\pi_i(t)$라고 表示하면 $\pi_i(1)$이 주어졌을 때 $\pi_i(2)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\pi_i(2)=P_{ij} \sum_{i=1}^{n} \pi_i(1) \qquad (5)$$

윗 式은 行列形式으로 표시하면 더욱 간편하게 된다. 즉 $\Pi(t)=[\pi_i(t)]$라 하면

$$\Pi(2)=P \cdot \Pi(1) \qquad (6)$$

이며, 일반적으로

$$\Pi(t+1)=P \cdot \Pi(t) \qquad (7)$$

가 된다. 그리고 P^n은 n개 P의 곱이라 하면

$$\Pi(t+n)=P^n \cdot \Pi(t) \qquad (8)$$

의 관계가 성립한다.

따라서 $\Pi(t)$를 알고 있을 때 $t+n$에서의 狀態 $\Pi(t+n)$을 P^n에 의하여 계산할 수 있으며, P^n을 n-段階 遷移確率行列(n-step transition probability matrix)라 한다. 또 P^n의 元을 P^n_{ij}이라 하면 時點 t에서는 다음 式이 성립한다.[2-5]

$$P^n_{ij}=\Pr(X_{t+n}=j|X_t=i) \qquad (9)$$

2. 모델의 展開

用水供給用 貯水池의 容量分析에 遷移確率行列을 適用하여 다음과 같은 推計學的 貯水容量 모델을 誘導할 수 있다.

給水用 貯水池의 貯留狀態를 分析하기 위하여 물收支方程式을 세우면 式(10)과 같다.

$$S_{t+1}=S_t+X_t-Y_t \qquad (10)$$

여기서, S_t, S_{t+1} = t 및 t+1 月初의 貯水池 貯水量

X_t = t月의 貯水池 月流入量

Y_t = t月의 貯水池 用水供給量

貯水池 貯水容量을 Fig. 1과 같이 k개의 zone으로 나누고 1개의 zone이 Z units일 때 貯水池의 貯留狀態(S)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

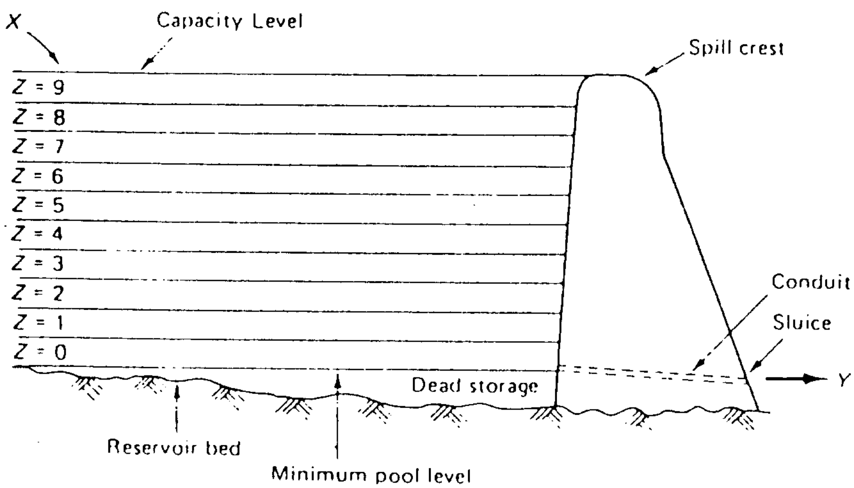

Fig. 1. Storage states of reservoir.

$S=O \rightarrow 0$ state (reservoir empty)

$0<S\geq Z \rightarrow 1$ state

$Z<S\geq Z \rightarrow 2$ state

.　　.

.　　.

.　　.

$(k-1)Z<S<KZ \rightarrow K$ state

$S=KZ \rightarrow k+1$ state (reservoir full)

年初 貯水池 貯留狀態에 대한 年末 貯水池 貯留狀態를 물收支方程式을 適用하여 구할 수 있으며, 이것으로부터 遷移確率行列 T를 구하면 式(11)과 같다.

$$\begin{array}{cc} & \text{年初 貯水池 貯留狀態(j)} \\ \text{年末 貯水池 貯留狀態(i)} & \begin{array}{c|ccccc} & 0 & 1 & \cdots & K & K+1 \\ \hline 0 & q(0,0) & q(0,1) & \cdots & q(0,k) & q(0,k+1) \\ 1 & q(1,0) & q(1,1) & \cdots & q(1,k) & q(1,k+1) \\ 2 & q(2,0) & q(2,1) & \cdots & q(2,k) & q(2\,k+1) \\ & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ k & q(k,0) & q(k,1) & \cdot & q(k,k) & q(k,k+1) \\ k+1 & q(k+1,0) & q(k+1,1) & \cdots & q(k+1,k) & q(k+1,k+1) \end{array} \end{array} = T \qquad (11)$$

여기서, q(i, j)를 條件確率의 槪念을 사용하여 나타내면 아래 式과 같다.

$$q(i,j)=\Pr(S_{t+1}=i \mid S_t=j) \qquad (12)$$

여기서, $0\leq q(i,j)\leq 1$ $(i,j=0,1,2,\ldots,k)$

또 列(column)의 確率 Vector의 合이 1임을 나타내는 式(13)도 성립한다.

$$\sum_{i=0}^{k+1} P(i,j)=1 \qquad (13)$$

위와 같은 條件下에서 어떤 單位期間 終點에서의 각 貯水池 貯留狀態에 존재하는 確率은

$$\begin{bmatrix} P'_0 \\ P'_1 \\ P'_2 \\ \vdots \\ P'_K \\ P'_{K+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(0,0) & q(0,1) & \cdots & q(0,k) & q(0,k+1) \\ q(1,0) & q(1,1) & \cdots & q(1,k) & q(1,k+1) \\ q(2,0) & q(2,1) & \cdots & q(2,k) & q(2,k+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q(k,0) & q(k,1) & \cdots & q(k,k) & q(k,k+1) \\ q(k+1,0) & q(k+1,1) & \cdots & q(k+1,k) & q(k+1,k+1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \\ P_K \\ P_{K+1} \end{bmatrix} \qquad (14)$$

으로부터 算定되며, 다음과 같이 要約할 수 있다.

$$P'=TP \qquad (15)$$

여기서, P' = 單位期間의 終点에서 貯留狀態가 0, 1, 2,..., K+1이 될 確率

P = 單位期間의 始點에서 貯留狀態에서 0, 1, 2,..., K+1이 될 確率

T = 單位期間의 遷移確率行列

貯水池 貯留狀態를 나타내는 確率의 時間에 따른 變動은 윗 式(15)를 반복하여 풀어서 구할 수 있다. 즉 初期 確率分布가 P_0라면 時間에 따른 確率의 變動은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} P_1 &= TP_0 \\ P_2 &= TP_1 \\ P_3 &= TP_2 \\ &\;\vdots \end{aligned} \qquad (16)$$

$$P_{i+1} = TP_i$$

윗 式(16)에서 P_{i+1}이 P_i와 같을 때를 安定狀態 (steady state)라 하며, 安定狀態일 때 각 zone의 確率을 P_0, P_1, P_2,...., P_{k+1}이라고 하면 다음 式이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_K \\ P_{K+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(0,0) & q(0,1) & \cdots & q(0,k) & q(0,k+1) \\ q(1,0) & q(1,1) & \cdots & q(1,k) & q(1,k+1) \\ q(2,0) & q(2,1) & \cdots & q(2,k) & q(2,k+1) \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ q(k,0) & q(k,1) & \cdots & q(k,k) & q(k,k+1) \\ q(k+1,0) & q(k+1,1) & \cdots & q(k+1,k) & q(k+1,k+1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_K \\ P_{K+1} \end{bmatrix} \tag{17}$$

그런데 윗 식을 移項하여 整理하면 相互從屬的이기 때문에 兩邊이 0이 됨을 알 수 있다. 따라서 相互獨立的으로 만들기 위해 K+2개의 式 中에서 하나를 置換하여야 하는데, 本 硏究에서는 맨 마지막 式을 式(13)과 置換한다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(0,0)-1 & q(0,1) & \cdots & q(0,k) & q(0,k+1) \\ q(1,0) & q(1,1)-1 & \cdots & q(1,k) & q(1,k+1) \\ q(2,0) & q(2,1) & \cdots & q(2,k) & q(2,k+1) \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ q(k,0) & q(k,1) & \cdot\cdot & q(k,k)-1 & q(k,k+1) \\ 1 & 1 & & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_K \\ P_{K+1} \end{bmatrix} \tag{18}$$

式 (18)의 一次聯立方程式을 풀면 貯水池 각 貯留狀態의 確率 P_i를 구할 수 있으며, 각 貯留狀態에 대한 年中 적어도 한번 물不足이 發生할 條件確率 f_i는 물收支方程式을 適用함으로써 구할 수 있다. 이때 貯水池에 대한 年中 물不足이 한번이라도 發生할 確率은 P_i와 f_i를 곱하여 合함으로서 구할 수 있다.[1,6-17]

$$P_f = \sum_{i=1}^{k+1} P_i \cdot f_i \tag{19}$$

여기서, P_f = 年中 물不足이 發生할 確率

P_i = 貯水池 貯留狀態가 i일 때 安定狀態 確率

f_i = 貯水池 貯留狀態가 i일 때 물不足이 發生할 確率

k = 貯水池의 Zone數

III. 分析地點 및 資料

最近 用水供給量 分析을 위해 선정된 地點은 漢江水系의 達川水位標 地點과 洪川 建設 豫定地點이다. 먼저 達川水位標 地點은 南漢江 支流인 達川의 下流에 位置하고 있으며, 流域面積은 1347.8 km^{2}이고 右岸은 中原郡 살味面 香山里, 左岸은 忠州市 楓洞이다. 그리고 洪川댐 建設 豫定地點은 北漢江 支流인 洪川江 下流에 位置하고 있으며 流域面積은 1,473 km^{2}이고 댐 右岸은 春川郡 西面, 右岸은 洪川郡 南面이다. 최근의 月流下量 資料는 河川 곳곳에 取水用 水工構造物이 생겨서 河川의 特性을 나타내는 資料로서의 價値가 많이 喪失되었으며, 근본적으로 河川 流域의 特性은 크게 변하지 않으므로 1917. 1~1940. 12의 24年間 月流下量 資料를 分析에 사용하였다. Table 1은 達川 流域의 達川水位標 地點의

Table 1. Monthly flows of Dalcheon gauging station in South Han river (unit: $\times 10^6\ m^3$)

Mon. / year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1917	3.9	3.3	8.4	5.5	16.2	2.5	82.6	25.0	126.6	13.2	7.1	4.0	298.3
1918	3.1	4.6	13.1	17.2	6.2	46.3	218.8	152.0	11.3	11.2	12.3	8.5	504.6
1919	5.4	3.0	8.9	13.1	20.3	33.0	344.8	24.4	10.2	45.2	5.1	4.3	517.7
1920	5.0	6.3	14.9	32.0	33.2	2.4	548.4	141.3	45.1	24.9	11.1	12.9	877.5
1921	17.1	16.0	21.9	52.0	16.7	13.9	294.6	11.4	22.6	24.0	31.6	12.2	534.0
1922	6.4	12.1	9.6	51.0	30.3	1.2	878.8	508.4	59.3	24.0	16.6	7.9	1606.1
1923	4.0	8.5	56.4	46.0	4.4	17.7	343.0	29.2	150.6	24.6	31.0	18.7	734.1
1924	3.1	17.8	1.4	9.4	6.3	15.2	458.7	11.3	18.6	321.	4.8	9.1	577.1
1925	11.4	7.2	11.8	17.5	10.5	10.5	1601.1	184.9	155.5	136.8	53.0	62.4	2163.6
1926	36.6	43.4	36.2	67.0	24.8	16.0	486.3	513.8	36.8	117.6	58.6	24.8	1461.9
1927	21.2	4.4	39.8	32.4	122.0	19.9	67.0	173.4	8.2	47.1	4.1	8.3	547.8
1928	12.7	97.9	41.1	34.1	17.6	29.3	11.9	11.3	193.9	40.0	4.6	26.0	520.4
1929	18.0	12.7	22.2	34.4	26.0	36.3	46.0	45.8	32.6	16.6	8.9	0.7	300.2
1930	13.6	7.5	50.9	154.1	102.9	46.4	1253.2	229.5	63.2	37.6	3.4	12.3	1974.6
1931	5.9	11.9	56.1	88.0	6.3	51.4	56.5	360.0	74.6	34.3	32.2	40.4	817.6
1932	38.5	29.5	27.9	19.1	30.7	23.8	25.1	28.2	81.9	27.4	18.3	9.6	360.0
1933	11.8	4.5	3.8	0.4	79.9	18.8	216.4	383.3	178.7	18.1	32.5	2.0	950.2
1934	16.3	16.0	47.2	78.2	78.9	8.1	469.8	400.9	98.5	94.7	6.9	22.0	1337.5
1935	33.5	7.2	6.7	13.6	30.8	39.0	364.8	164.9	15.4	16.0	25.2	11.1	728.2
1936	26.4	4.3	5.0	133.0	59.4	9.8	66.9	1908.9	579.4	81.7	55.4	90.3	3010.5
1937	87.8	106.5	157.3	97.7	49.0	29.8	265.2	102.4	60.3	40.1	38.6	20.9	1055.6
1938	12.7	16.4	98.5	48.6	50.2	102.8	382.3	7.5	120.7	13.6	73.0	71.0	997.3
1939	8.1	16.3	55.9	47.6	34.8	21.5	1.5	30.3	18.0	26.7	22.7	33.5	316.9
1940	11.5	9.1	25.9	40.5	33.1	31.7	2445.4	117.8	400.7	25.0	24.9	26.7	3192.3
Ave.	17.2	19.43	34.20	47.20	37.10	26.14	455.38	231.91	106.78	35.91	24.29	22.07	1057.67

月流下量 資料이다.

IV. 모델의 適用 및 結果의 考察

達川 水位標 地點에 用水供給用 貯水池 建設하고자 할 때 貯水池의 有效貯水容量이 $1{,}000 \times 10^6\ m^3$이고 用水供給量이 $58.33 \times 10^6\ m^3$/mon.이라면, 用水供給量을 Fig. 1과 같이 10개의 zone로 나눌 때, 1개의 zone은 $100 \times 10^6\ m^3$이며, 1 unit를 $10^6\ m^3$이라 하면 貯水容量 境界條件 및 貯水池 貯留狀態는 Table 2와 같다.

貯水池의 年初 貯留狀態가 0 state일 때, 즉 貯水池가 枯渴되었을 때 式(10)의 물收支方程式을 適用시켜 1917年 1月初에 대한 1917年 2月初 貯留狀態($S_{1917.2}$)를 구하면 아래와 같다.

$$S_{1917.2} = S_{1917.1} + I_{1917.1} - O_{1917.1}$$
$$= 0 + 3.9 - 58.33$$
$$= -54.43 \text{ (unit)} \longrightarrow 0 \text{ state}$$

그런데 貯水池의 貯留狀態에 음(−)이 존재 할 수 없으므로 1917년 2월초의 貯水量($S_{1917.2}$)은 枯渴狀態(0 state)라고 假定하고 계산을 계속한다.

$$S_{1917.3} = S_{1917.2} + O_{1917.2}$$

Table 2. Boundary conditions and storage states of reservoir

Boundary conditions (unit)	Storage states	Remark
$S = 0$	0	Reservior empty
$0 < S \leq 100$	1	
$100 < S \leq 200$	2	
$200 < S \leq 300$	3	
$300 < S \leq 400$	4	
$400 < S \leq 500$	5	
$500 < S \leq 600$	6	
$600 < S \leq 700$	7	
$700 < S \leq 800$	8	
$800 < S \leq 900$	9	
$900 < S < 1000$	10	
$S = 1000$	11	Reservior full

$$=0+3.3-58.33$$
$$=-55.03\ (\text{unit}) \longrightarrow 0\ \text{state}$$
$$\vdots$$
$$S_{1918.1}=S_{1917.12}+I_{1917.12}-O_{1917.12}$$
$$=0+4-58.33$$
$$=-54.03\ (\text{unit}) \longrightarrow 0\ \text{state}$$

즉 1917년 1月부터 12月까지 물收支方程式을 適用시켜 年初 貯留狀態가 0 state일 때 年末의 貯留狀態을 구하면 0 state이다. 만약 S_{t+1}의 값이 貯水池의 滿水量인 1,000 unit를 超過할 때에는 spillway로 越流(overflow)되므로 1,000 unit라 假定하고 計算한다. 같은 方法으로 1918年에서 1940年까지 年初 貯水池 貯留狀態가 0 state일 때 年末의 貯水池 貯留狀態를 구할 수 있으며 그 結果는 Table 3과 같다.

Table 3에서 initial states는 年初의 貯水池 貯留狀態를 나타내며, final states는 물收支方程式을 適用시켰을 때 年初의 貯留狀態에 대응하는 年末의 貯水池 貯留狀態를 나타낸다. failure years란은 그 年度에 한번이라도 貯水池가 枯渴되어 用水의 供給

Table 3. Transition years

Initial state / Final states	S=0 (unit)						
S=0	1917,	1927,	1929,	1932,	1939		(5)
0<S≤ 100	1918,	1919,	1921,	1928			(4)
100<S≤ 200	1924						(1)
200<S≤ 300	1923,	1931,	1935				(3)
300<S≤ 400	1937,	1938					(2)
400<S≤ 500	1920,	1933					(2)
500<S≤ 600							(0)
600<S≤ 700							(0)
700<S≤ 800	1934						(1)
800<S≤ 900	1922,	1926,	1930				(3)
900<S<1000	1925,	1940					(2)
S=1000	1936						(1)
failure years	1917,	1918,	1919,	1920,	1921,	1922	
	1923,	1924,	1925,	1926,	1927,	1928	
	1929,	1930,	1931,	1932,	1933,	1934	(23)
	1935,	1937,	1938,	1939,	1940		

Table 4. Number of transition years

Initial state / Final state	S=0	0<S 100	100<S 200	200<S 300	300<S 400	400<S 500	500<S 600	600<S 700	700<S 800	800<S 900	900<S 1000	S=1000
S=0	5	5	5	4	3	0	0	0	0	0	0	0
0<S≤ 100	4	4	4	5	1	3	0	0	0	0	0	0
100<S≤ 200	1	1	1	1	5	1	3	0	0	0	0	0
200<S≤ 300	3	3	3	2	1	5	1	3	0	0	0	0
300<S≤ 400	2	1	0	1	2	1	5	1	3	0	0	0
400<S≤ 500	2	3	3	1	1	2	1	5	1	3	0	0
500<S≤ 600	0	0	1	2	1	1	2	1	5	1	3	1
600<S≤ 700	0	0	0	1	2	1	1	2	1	5	1	3
700<S≤ 800	1	1	1	0	1	2	1	1	2	1	6	2
800<S≤ 900	3	3	2	3	2	3	4	4	4	6	6	10
900<S<1000	2	2	3	3	4	4	5	6	5	7	7	7
S=1000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fiilure year	23	23	17	9	3	0	0	0	0	0	0	0

不足이 發生한 年度를 나타낸 것이며, ( )안의 數值는 各 貯留狀態에 해당되는 年度의 個數를 나타낸다.

지금까지 年初 貯水池가 枯渴되었을 때 (S=0 unit)에 대한 年末의 貯留狀態에 대하여 살펴 보았는데, 그 외의 年初 條件에 대해서도 같은 方法으로 年末 貯留狀態를 구할 수 있다. 이때 年初 貯留狀態가 0<S≤100, 100<S≤200, 200<S≤300, 300<S≤400, 400<S≤500, 500<S≤600, 600<S≤700, 700<S≤800, 800<S≤900, 900<S≤1,000 unit인 경우 初期 貯留狀態는 中央值인 50, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950 unit라 假定하고 年末 貯留狀態를 算定하고, 滿水位일 때는 1,000 unit로 보고 물收支方程式을 적용하여 年初 貯留狀態에 대한 年末 貯留狀態를 算定한다. Table 4는 물 收支方程式을 적용하여 年初 貯留狀態에 대한 年末 貯留狀態를 計算한 遷移年(transition years)의 個數를 總括한 表이다.

Table 4의 각 欄의 數值를 記錄值의 總年度인 24로 나누면 다음과 같은 遷移確率行列 T를 구할 수 있다.

$$T=\begin{bmatrix}
.208 & .208 & .208 & .167 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.167 & .167 & .167 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.042 & .042 & .042 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.125 & .125 & .125 & .083 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.083 & .042 & .000 & .042 & .083 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000\\
.083 & .125 & .125 & .042 & .042 & .083 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000\\
.000 & .000 & .042 & .083 & .042 & .042 & .083 & .042 & .208 & .042 & .125 & .042\\
.000 & .000 & .000 & .042 & .083 & .042 & .042 & .083 & .042 & .208 & .042 & .125\\
.042 & .042 & .042 & .000 & .042 & .083 & .042 & .042 & .083 & .042 & .250 & .083\\
.125 & .125 & .083 & .125 & .083 & .125 & .167 & .167 & .208 & .250 & .250 & .417\\
.083 & .083 & .125 & .125 & .167 & .167 & .208 & .250 & .250 & .292 & .292 & .292\\
.042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042 & .042
\end{bmatrix}$$

위의 遷移確率行列을 使用하여 安定狀態일 때, 다음과 같은 12개의 12元 1次 聯立方程式을 式(18)에 의해 誘導할 수 있으며,

$$\begin{bmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}
.792 & .208 & .208 & .167 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.167 & -.833 & .167 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.042 & .042 & -.958 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.125 & .125 & .125 & -.917 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000 & .000\\
.083 & .042 & .000 & .042 & -.917 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000 & .000\\
.083 & .125 & .125 & .042 & .042 & -.917 & .042 & .208 & .042 & .125 & .000 & .000\\
.000 & .000 & .042 & .083 & .042 & .042 & -.917 & .042 & .208 & .042 & .125 & .042\\
.000 & .000 & .000 & .042 & .083 & .042 & .042 & -.917 & .042 & .208 & .042 & .125\\
.042 & .042 & .042 & .000 & .042 & .083 & .042 & .042 & -.917 & .042 & .250 & .083\\
.125 & .125 & .083 & .125 & .083 & .125 & .167 & .167 & .208 & -.750 & .250 & .417\\
.083 & .083 & .125 & .125 & .167 & .167 & .208 & .250 & .250 & .292 & -.708 & .292\\
1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000
\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}P_0\\P_1\\P_2\\P_3\\P_4\\P_5\\P_6\\P_7\\P_8\\P_9\\P_{10}\\P_{11}\end{bmatrix}$$

聯立方程式의 解는 아래와 같다.

$$P_i=[.034\ .037\ .028\ .046\ .045\ .070\ .080\ .080\ .098\ .204\ .236\ .042]^T$$

여기서, T=轉置行列(transpose matrix)

貯水池의 各 貯留狀態에 있어서 年中 적어도 한번 用水不足의 發生할 條件確率은 Table 4의 failure years란의 값을 記錄值의 總年數로 나누어 구할 수 있다.

즉, $f_i=[.958\ .958\ .708\ .375\ .125\ .000\ .000\ .000\ .000\ .000\ .000\ .000]$

위에서 구한 P_i와 f_i로부터 貯水池의 有效貯水容量이 $1,00\times10^6\ m^3$이고 用水 供給量이 $58.33\times10^6\ m^3$/mon.일 때의 用水不足이 發生할 確率을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_r = \sum_{i=0}^{k+1} P_i \cdot f_i$$

$$\fallingdotseq 0.1109\ (\%)$$

$$= 11.09\ (\%)$$

또한 앞에서와 같은 節次에 의해서 貯水池의 貯水容量과 用水供給量의 條件을 變更시켜 가며 年中 한번이라도 用水不足이 發生할 確率을 구할 수 있다. 즉 貯水池의 貯水容量을 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 및 1,000($\times 10^6$ m^3)으로 變動시킬 때, 이들 變動値에 대하여 用水供給量을 동시에 8.33, 16.27, 25.00, 33.33, 41.67, 50.00, 58.33, 66.67, 75.00 및 83.33($\times 10^6$ m^3/mon.)로 變動시키면서 用水不足이 發生할 確率을 구할 수 있다. Fig. 2는 computer를 利用하여 推計學的 貯水容量 分析 모델로 最適 用水供給量을 算定하는 順序를 나타낸 것이다.

Fig. 2와 같은 順序에 의하여 計算된 達川 水位標 地點에 대한 確率값을 橫軸은 貯水容量(S), 縱軸은 用水供給量(O)으로 잡은 座標의 格點上에 記入하여 確率(P_o) 혹은 再現期間(T) 曲線을 外挿하면 Fig. 3과 같다. 여기서 별표(*)를 한 確率값 11.09는 앞에서 例示한 用水供給量이 58.33$\times 10^6$ m^3/mon이고 貯水

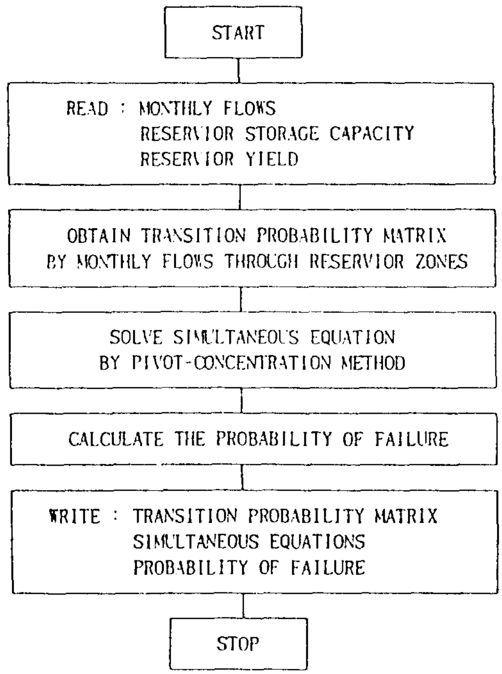

Fig. 2. Flowchart of stochastic reservoir storage model.

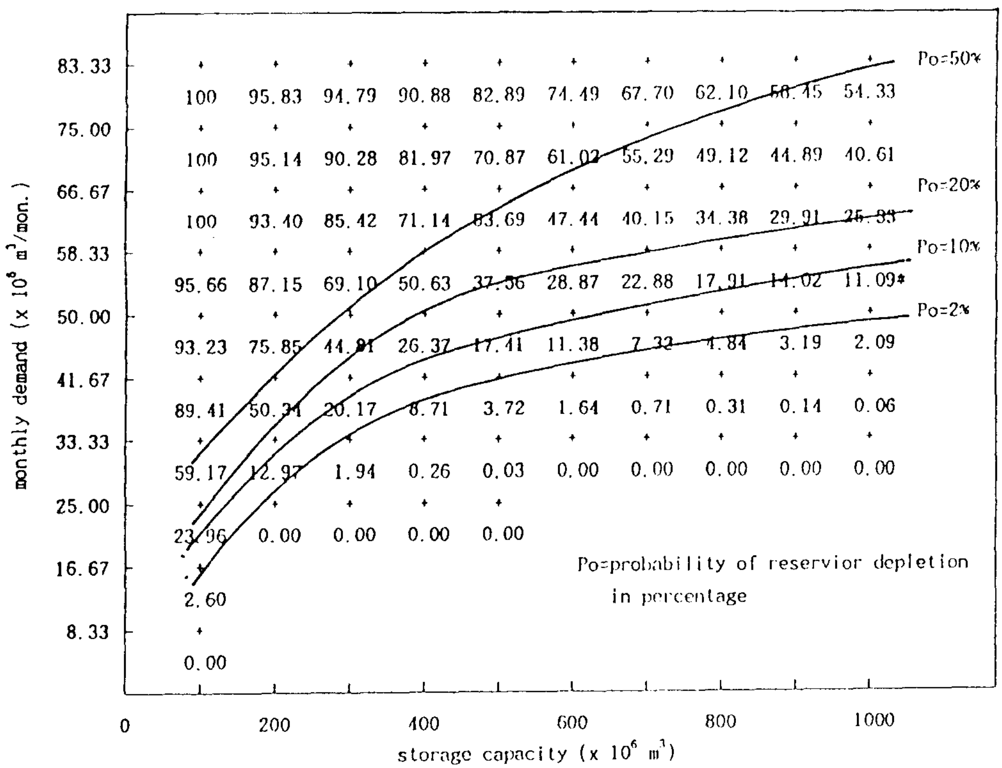

Fig. 3. Reservior storage capacity-monthly demand-probability curves at Dalcheon damsite.

池 容量이 1,000×10^6 m^{3}인 경우의 用水供給 不足이 發生할 確率을 나타낸다. 또 이 그림의 貯水容量-用水供給量-確率(再現期間)의 關係曲線으로부터 다음 事項을 알 수 있다. 만약 貯水池의 貯水容量을 700×10^6 m^{3}으로 할 경우 貯水池 枯渴이 發生할 確率이 2%, 즉 50年 빈도의 用水供給 不足이 發生할 정도이면, 45×10^6 m^3/mon의 用水를 每月 供給할 수 있다. 또 月用水供給量이 50×10^6 m^3/mon.일 때, 用水 不足이 發生할 確率이 50%(再現期間 2年)이면 290×10^6 m^3, 10%(再現期間 10年)이면 650×10^6 m^{3}의 貯水容量을 가진 貯水池가 있어야 用水供給이 可能하다. 50年 빈도(P_o=2%)의 가뭄에 33×10^6 m^3/mon의 用水를 供給하려면 最少限 280×10^6 m^{3}의 貯水容量을 가진 貯水池가 있어야 하며, 같은 條件下에서 1,000×10^6 m^{3}의 貯水容量을 가진 貯水池는 49×10^6 m^3/mon의 用水를 每月 供給할 수 있다.

한편 Fig. 4는 洪川댐 建設 豫定地點에 대한 貯水容量-用水供給量-確率(再現期間)의 關係曲線을 나타낸 것이다. 만약 用水 不足이 發生할 確率이 1%(再現期間 100年)이면 月 50×10^6 m^3/mon의 用水를 供給하고자 할 때 410×10^6 m^{3}의 貯水容量이 필요하다. 또 貯水容量이 600×10^6 m^{3}이고 月用水供給量이 66.67×10^6 m^3/mon일 때는 10年에 한번 정도는 貯水池가 枯渴되어 用水供給量의 不足이 발생된다.

達川 水位標 地點과 洪川댐 建設豫定地點에 有效貯水容量 1,000×10^6 m^{3}의 貯水池를 각각 建設한 後 月 83.33×10^6 m^3/mon의 用水를 供給하고자하면, 達川댐 豫定 地點에서는 54.33%의 用水 不足이 발생할 確率, 즉 2年에 한번 정도의 用水 不足이 發生할 可能性이 있으며, 洪川댐 豫定 地點에서는 20.77%의 確率, 즉 5年에 한번 정도 用水 不足이 發生할 可能性이 있다. 이는 達川댐 豫定地보다 洪川댐 豫定地가 流域面積에 있어서 큰 점도 있겠지만 근본적으로 河川流量이 많음을, 즉 水資源量이 풍부함을 알 수 있다.

V. 結 論

지금까지 南漢江의 達川 水位標 地點과 北限江의 洪川댐 建設 豫定地에 用水供給用 貯水池를 建設할

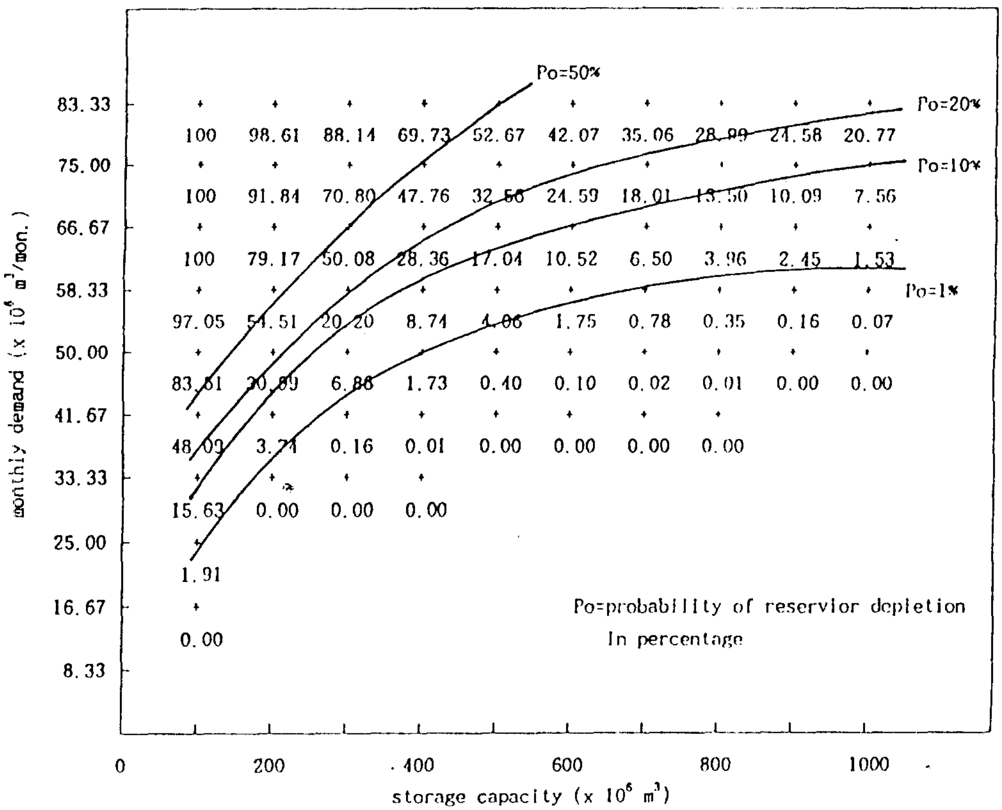

Fig. 4. Reservior storage capacity-monthly demand-probability curves at Hongcheon damsite.

경우, 確率 및 貯水容量에 따른 最適 用水供給量을 算定하기 위하여 推計學的 貯水容量 모델을 誘導, 適用하였으며, 그 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

첫째, 推計學的 모델로 年初 貯水池 貯留狀態에 대한 年末 貯水池 貯留狀態를 計算하였으며, 이 값과 貯水池의 各 貯留狀態에 있어서 年中 적어도 한번 用水不足이 發生할 條件確率을 곱함으로써 用水供給에 따른 貯水池가 枯渴 될 確率을 算定하였다.

둘째, 貯水容量과 月水供給量 分析을 위하여 종래에 주로 사용한 累加曲線法이나 極限系列分析法으로는 資料길이에 該當하는 再現期間을 가진 하나의 用水供給量-貯水容量 關係曲線을 얻을 수 있었으나, 本 硏究에서는 確率개념을 導入함으로써 用水供給量-貯水容量-確率(再現期間) 關係曲線을 誘導하였다.

셋째, 用水供給量-貯水容量-確率 關係曲線으로부터 必要 用水供給量에 대한 貯水容量과 確率의 關係, 確率에 따른 貯水容量과 用水供給量의 關係 그리고 貯水容量에 대한 用水供給量과 確率의 關係를 알 수 있으므로 給水用 貯水池의 最適容量設計 혹은 既存 貯水池로부터의 最適用水供給量 計算에 有用하게 利用할 수 있었다.

參考文獻

1) 張仁洙, 李舜鐸 : 貯水池의 Storage-Yield에 關한 硏究, 韓國水文學會誌, **18**(3), pp. 253-264, 1985.
2. 李載寬 : 計量的 方法, 博英社, pp. 255-273, 1982.
3. 金基永, 郭魯均 : 計量意思 決定論, 法文社, pp. 562-596, 1981.
4. Gillet, B. E. : Operations Research, McGraw-Hill Co., pp. 564-592, 1979.
5. Taha, H. H. : Operations Research, McMillan Pub. Co., 1982.
6. 咸鍾都, 深完演 : 行列代數, 集文堂, 1988.
7. 張仁洙, 李舜鐸 : 댐貯水池 内의 貯留量 狀態解析, 제31회 水工學硏究發表會, 1989.
8. 張仁洙, 李舜鐸 : Markov 모델에 의한 貯水池 容量分析, 1990年度 大韓土木學會 學術發表會, 1990.
9. 李孝求, 朴勝安 : 經濟 · 經營數學, 博英社, pp. 70-116, 1990.
10. 金鍾浩 : 마르코프 체인, 東國大學校 出版部, 1987.
11. Benjamin, J. R. and C. A. Cornell : Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill Co., 321-353, 1987.
12. Kottegoda, N. T.: Stochastic Water Resources Technology, McMillan Pub. Co., 264-293, 1980.
13. Klemes, V. : Discrete Representation of Storage for Stochastic Reservoir Optimization, Water Resources Research, **13**(1), 419-158, 1977.
14. Vogel, R. M. : Reliability Indices for Water Supply Systems, Journal of Water Rescources Planning and Management, **113**(4), 563-579, 1987.
15. Haktanir, T. : Storage-Yield Relationships for Reservoirs by a Sequential Operation Algorithm and Comparisons with Gould's Probability Matrix Method, Journal of Hydrology, **109**, 43-56, 1989.
16. Phatarfod, R. M. and R. Srikanthan : Discretization in Stochastic Reservoir Theory with Markovian Inflows, Journal of Hydrology, **52**, 199-218, 1981.
17. Ford, D. T. : Reservoir Storage Reallocation Analysis with PC, Journal of Water Resources Planning and Management, **116**(3), 402-416, 1990.
18. 建設部 : 漢江流域 調査報告書, 附錄 第1卷, A-D, 1971.