貯水池의 Storage-Yield 에 關한 硏究

嶺南大學校 大學院 張 仁 洙*

嶺南大學校 工科大學 敎授 李 舜 鐸

1. 序 論

經濟가 발전함에 따라 물의 需要는 急增되고 있으며 用水의 安定的 供給이' 더욱 절실히 要求되고 있다. 그러나 우리는 降雨의 季節的인 不均等으로 인해 어려움을 겪고 있으므로 渴水期에 부족한 水資源量을 해결하기 위하여 洪水時 放流되고 있는 많은 물을 可用水資源化할 貯水池, 특히 多目的 貯水池의 건설을 추진하거나 水資源 開發 計劃을 樹立하고 있다.

貯水池 축조에는 많은 經費가 소요되므로 經濟性을 무시하고 많은 대규모 貯水池를 만들 수는 없는 것이다. 그러므로 旣存 貯水池의 運營의 效率化를 기할 必要性이 提起되어 貯水池에서 확보할 수 있는 安全放流量(Safe yield)의 再檢討가 必要하다. 그리고 貯水池를 새로 축조할 때는 安定된 供給을 할 수 있도록 適正한 容量으로 설계해야 한다.

본 硏究에서는 貯水池의 Storage-Yield 解析을 통하여 貯水容量 결정에 사용되어온 從來의 方法보다 더 合理的이고 正確하며 貯水池運營과 設計의 指針이 될 새로운 解析方法을 도입하여 그 適用

性을 檢討코자 하였다. 分析에 있어서 고전적인 殘差累加曲線技法 및 다소 개선된 低流量技法과 Transition probability matrix(TPM) 技法을 適用하였으며 漢江流域인 洪川댐 建設豫定地點의 24年間 月流量 資料를 使用하여 貯水池의 Storage-Yield 關係를 分析하였다. 또한 記錄値의 補完을 위하여 Thomas-Fiering 모델에 의해서 模擬發生된 100年間의 月流量資料를 使用하여서 위와 같은 方法으로 分析하여 比較토록 하였다.

2. Storage-Yield 算定의 基本 理論

本 硏究에 있어서 Storage-Yield 算定方法은 極限期間技法인 殘差累加曲線技法 및 低流量技法과 그리고 推計學的技法인 TPM 技法을 適用토록 하였으며 그 基本理論은 다음과 같다.

2·1 殘差累加曲線技法(Residual mass curve technique)

Rippl 의 累加曲線技法은 流入量(Inflow)과 必要放流量(Yield)이 時間의 函數로서 時系列的으로 주어진 경우에 貯水量의 規模를 合理的으로 決定하는 古典的인 解法이다. 流入量의 時系列値를 I_i, 必要放流量을 q(const.)로 하는 경우, I_i와 q의 累加合의 差가 最大로 될 때의 값이 用水不足을 일으키지 않을 最小必要貯水容量이다.

殘差累加曲線技法은 Rippl의 累加曲線技法을 變形시킨 것으로써, 最小必要貯水容量은 平均 流入量(Mean inflow)을 I_m이라 할 때, 殘差$(q-I_m)$의 累加合에 의해서 나온 直線(Yield gradient)과 殘差(I_i-I_m)의 累加合의 差가 最大인 경우이다. 즉 Fig.1과 같이 Mass curve法의 平均 流入量 軸을 回轉시켜 殘差累加曲線의 가로軸으로 삼은 것이다.

그리고 Storage-Yield曲線은 放流量과 그에 대응하는 必要貯水容量을 플롯하여 연결함으로서 구한다.

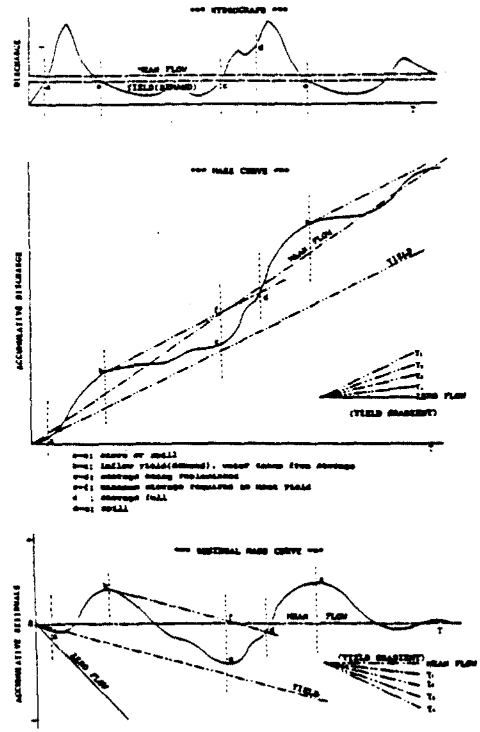


Fig. 1. Diagrams for residual mass curve technique.

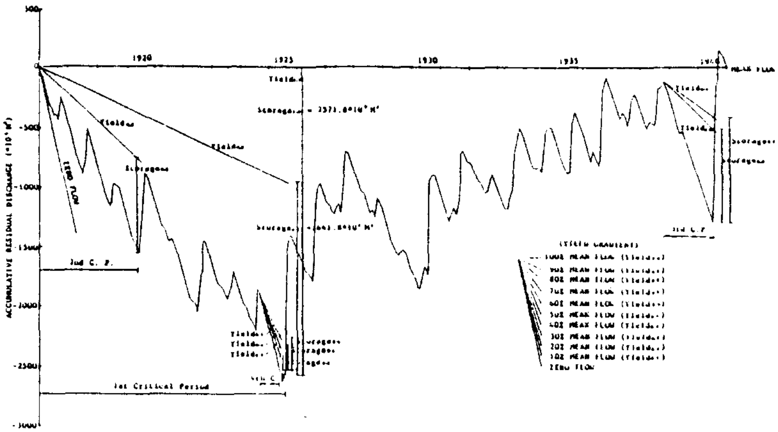


Fig. 2. Residual mass curve (historical data)

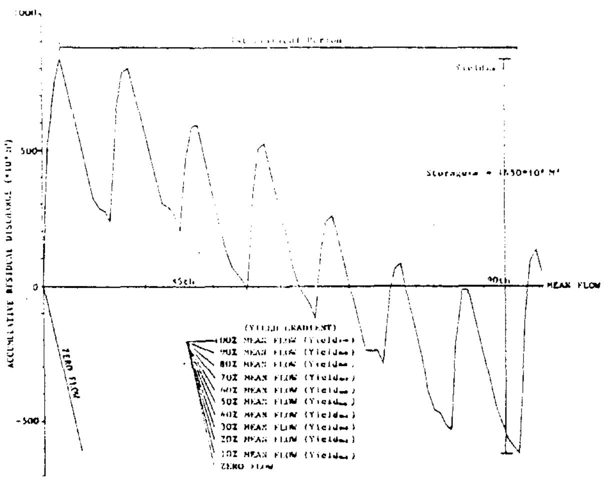


Fig. 3. Residual mass curve of the 1st critical period (synthetic data).

2·2 低流量技法(Low flow technique)

本 低流量技法에는 여러 가지 方法이 提案되어 있으나 여기서는 이들 方法을 수정한 方法인 非連續累加曲線(Non-sequential mass curve)法을 適用토록 하였다.

일반적으로 用水供給을 위한 貯水池는 尖頭流量보다 低流量이 重要한 問題이므로 低流量技法에 의한 低流量系列 (Low flow series)의 展開에 있어서 流量의 年次的 變動에 영향을 받지 않도록 低流量事象 (Low flow events)을 選擇해야 한다는 事實은 대단히 중요하며, 이런 目的을 위해서는 低流量의 部分持續期間系列 (Partial duration series)이 가장 融通性있고 適合한 것이다. 部分低流量系列을 얻기 위해서는 어떤 持續期間을 選擇한 후 全流量記錄値로부터 그 持續期間에 해당하는 期間의 月流量事象을 順次的으로 移動平均法과 같이 合하여 部分低流量을 구한다. 이 部分低流量을 最小値로부터 順次的으로 配列함으로써 部分低流量系列을 얻는다. 이때 先順位의 部分低流量에 한번 包含된 月流量事象은 다음 順位의 部分低流量에 영향을 주는 것을 防止하기 위하여 그 月流量 事象이 包含된 部分低流量은 部分低流量系列에서 除外한다. 즉 部分低流量系列에 있어서 각 順位의 部分低流量은 서로 獨立的이다.

각 順位의 部分低流量이 발생할 確率은 Beard의 Plotting Position 公式에 의해 다음과 같이 表示될 수 있다.

順位 1일 경우

$$P_1 = 1 - 0.5^{\frac{1}{N}}$$

P_1 = Rank 1일 경우 Plotting Position(%)
N = 部分低流量의 年數 (Number of years)

順位 2, 3 ……일 경우

$$P_{(i=2,3\,\cdots\cdots)} = P_1 + \triangle R \frac{\triangle P}{\triangle I}$$

$\triangle R$ = Rank Number − 1
$\triangle P = 0.5^{\frac{1}{N}} - P_1$
$\triangle I = N - 1$

이와 같은 方法으로 구한 각 持續期間에 대한 算定値를 對數確率紙(Log probability paper)에 플롯함으로써 低流量頻度曲線(Low flow frequency curves)을 얻는다. 다음 貯水池設計에 適合하다고 생각되는 再現期間에 대한 流量을 低流量頻度曲線에서 읽어서 流量對 持續期間의 關係인 最小流出－持續期間曲線(Minimum runoff-duration curves)을 구한다.

마지막으로 이 最小流出－持續期間曲線으로부터 非連續累加曲線(Non-sequential mass curves)을 구하여 Storage-Yield曲線을 구하게 되는데, 이는 먼저 원하는 需要量(放流量)에 대한 必要한 貯水容量은 이 非連續累加曲線上에 需要量의 累加値에 의한 接線(Yield slope)을 作圖하여 需要累加接線이 세로축을 切斷할 때 값으로서 必要한 貯水容量을 決定한다. 그리고 각 確率에 대한 貯水量과 需要量을 구하여 플롯하면 Storage-Yield 曲線이 구해진다.

Table 1. Sample computation of independent low flow events in partial duration of 36 Month (historical data)

Rank	Volume $(10^6 m^3)$	Depth (cm)	Rate (m^3/sec)	Frequency (%)	Return period (year)	Ending date (Year, Month)
1	2048.4	139.06	21.663	3.22	31.0	1920 1
2	2294.8	155.79	24.269	7.86	12.7	1923 8
3	2466.0	167.41	26.080	12.50	8.0	1940 5
4	2625.6	178.25	27.768	17.14	5.8	1930 2
5	3192.5	216.73	33.763	21.78	4.6	1936 7
6	3553.3	241.23	37.579	26.42	3.8	1933 7
7	4040.9	274.33	42.735	31.06	3.2	1926 9

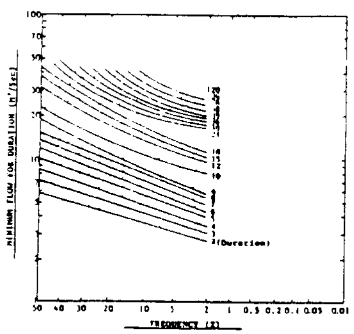


Fig. 6. Low flow frequency curves (historical data).

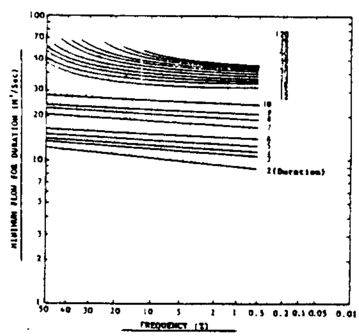
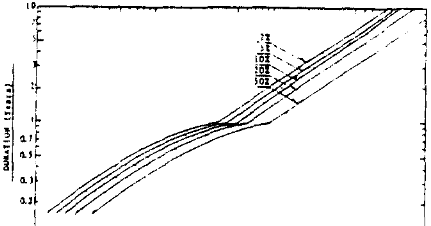
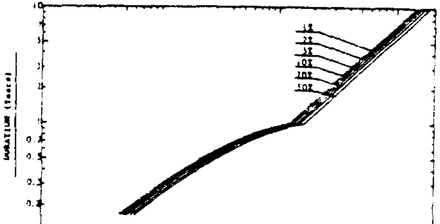


Fig. 7. Low flow frequency curves (synthetic data).


DURATION (Years)
10
5
2
1
0.7
0.5
0.3
0.2
10%
20%
50%


DURATION (Years)
10
5
2
1
0.3
0.2
10%
20%
50%

$$Z_{t+1} = Z_t + X_t - Y_t \qquad (2\cdot3)$$

Z_t, Z_{t+1} ; t 번째 離散期間의 始點과 終點에 있어서 貯水量

X_t ; t 번째 離散期間의 流入量

Y_t ; t 번째 離散期間의 流出量

貯水池 貯水容量(Reservoir storage capacity)을 같은 容積(Volume)의 Zone으로 나누어서 Moran은 貯水池容量의 累積確率로 표시된 方程式을 얻을 수 있었다.

例를 들어 放流量이 一定하고 M unit 라면, 한 unit 期間 끝에서 0(zero) Zone에 존재하는 貯水量의 確率은 式(2·4)와 같다.

$$P_0' = P_0 \sum_{i=0}^{M} q_i + P_1 \sum_{i=0}^{M-1} q_i + \cdots + P_M q_0 \qquad (2\cdot4)$$

q_i ; i unit 流入量의 確率

P_i ; t 번째 期間의 始點에서 貯水量이 i unit 일때 確率

P_j' ; t 번째 期間의 終點에서 貯水量이 j unit 일때 確率

式 (2·4)은 式(2·3)으로부터 얻어지며, 式(2·4)와 유사한 式이 貯水池의 각 Zone에 대해서 유도될 수 있다. 즉 貯水池를 K 개의 Zone으로 나누었을 때 式(2·5)와 같은 行列形態의 式을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_0' \\ P_1' \\ P_2' \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{K-1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{M} q_i & \sum_{i=0}^{M-1} q_i & \cdots\ q_0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ q_{M+1} & q_M & \cdots\ q_1 & q_0 & 0 & \cdots & 0 \\ q_{M+2} & q_{M+1} & \cdots\ \cdots & q_1 & q_0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \sum_{i=M+K-1}^{\infty} q_i & \sum_{i=M+K-2}^{\infty} q_i & \cdots & \cdots & \cdots & \sum_{i=M+1}^{\infty} q_i & \sum_{i=M}^{\infty} q_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{K-1} \end{bmatrix} \qquad (2\cdot5)$$

또한 위 式은 다음과 같이 要約될 수 있다.

$$P' = TP \qquad (2\cdot6)$$

P' ; t 번째 期間의 終點에서 貯水量이 0, 1, 2 ··· unit 존재할 때의 確率을 표시하는 Line Vector

P ; t 번째 期間의 始點에서 貯水量이 0, 1, 2 ··· unit 존재할 때의 確率을 표시하는 Line Vector

$T^{\cdot}$; t 번째 期間의 始點과 終點사이의 Transition Problility Matrix

貯水量의 時間的인 分布를 알기 위하여 式(2·6)을 反復해서 푼다. 그러면 式(2·7)과 같은 時間에 따른 貯水量의 變動分布確率을 구할 수 있다.

즉, 初期分布가 P_0 라면,

$$\begin{aligned} P_1 &= TP_0 \\ P_2 &= TP_1 \qquad (2\cdot7) \\ &\cdots\cdots \\ P_{i+1} &= TP_i \end{aligned}$$

와 같이 表示된다.

式(2·7)의 計算을 수십번 반복하면 P_{i+1} 는 P_i 와 같으며, 이때 貯水量의 分布狀態는 安定狀態(Steady state)이다. 그리고 貯水池가 하나의 狀態에서 다른 狀態로 바뀔 確率은 오직 直前狀態에만 의존한다. 貯水量의 安定狀態分布(Steady state distribution)는 P_{i+1} 이 P_i 와 같을 때, 즉 T(Transition probability matrix)를 聯立方程式(Stantaneous equations)으로 만들고 이들의 解를 구함으로서 얻을 수 있다. 이 聯立方程式은 相互從屬的이기 때문에 그대로 풀면 값이 모두 0(zero)이 된다. 따라서 方程式 중 하나는 式(2·8)으로 代替함으로써 獨立的이 되므로 聯立方程式의 解를 구할 수 있다.

$$\sum_{i=0}^{K-1} P_i' = 1 \qquad (2\cdot 8)$$

그리고, 不足이 발생할 確率은 式(2·9)와 같다.

$$\text{Prob.} = \sum_{i=1}^{K} Q_i Y_i \qquad (2\cdot 9)$$

Q_i ; 貯水量이 i unit 일때 安定狀態確率 (Steady state probability)

Y_i ; Zone i 에서 시작하는 12個月 流量系列들에 의해 1年에 한번이라도 月供給 不足이 발생할 條件確率 (Conditional probability)

K ; 貯水池 Zone 의 個數

즉, 각 Zone 에 대하여 1年에 한번이라도 月不足이 발생할 條件確率과 聯立方程式의 解를 順次的으로 곱하여 나온 값을 더함으로써 구할 수 있다.

TPM 技法에 의한 Storage-Yield 曲線은 위에서와 같은 方法으로 다양한 放流量과 貯水容量에 대한 確率을 구함으로써, 設計에 必要한 再現期間에 대한 Storage-Yield 曲線을 작성할 수 있다.

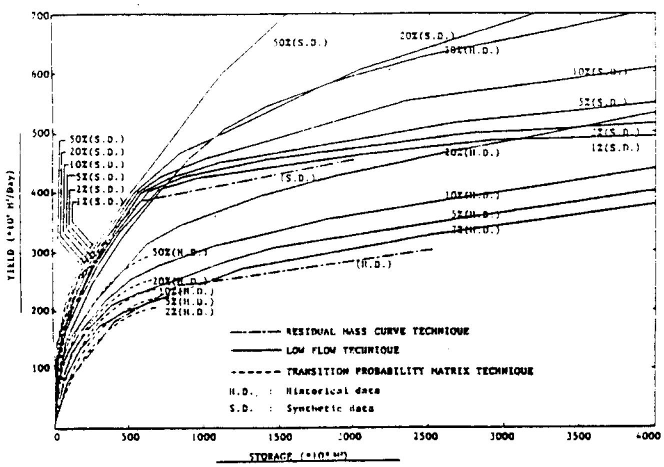


Fig. 15. STorage-yield curves by residual mass curve technique, low flow technique and TPM technique (historical data & synthetic data).

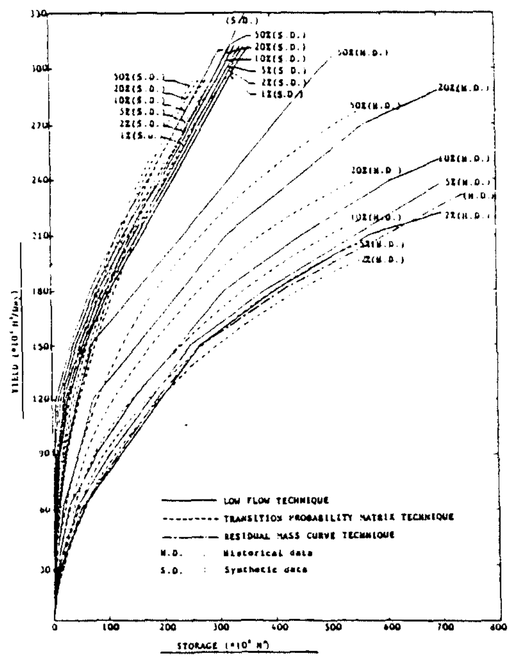


Fig. 16. Storage-yield curves by residual mass curve technique, low flow technique and TPM technique (historical data & synthetic data).

3. 結 論

本 研究에서 貯水池의 Storage-Yield 關係分析에 記錄値와 模擬發生된 資料를 使用하여 殘差累加曲線技法 및 低流量技法과 그리고 TPM 技法이 適用檢討되었으며 그 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 殘差累加曲線技法은 Storage-Yield 曲線에 確率이 反映되지 않았으나 低流量技法과 TPM 技法은 確率이 反映되었다. 따라서 종래의 Storage-Yield 關係에 確率槪念이 導入됨으로써 貯水池의 最適運營과 最適設計에 必要한 다양한 再現期間에 대하여 Storage-Yield 曲線을 誘導하였다. 즉 Storage-Yield-Probability關係를 樹立하였다.

2. 殘差累加曲線技法과 低流量技法은 放流量(需要量)이 月別 혹은 季節別로 심한 變動이 있을 때는 Yield slope가 需要의 月別 혹은 季節別 變動을 反映하고 있지 않기 때문에 適用이 制限됨을 알 수 있었다. 그러나 TPM 技法은 그 放流量을 月別 혹은 季節別로 變動시켰을 때에도 適用할 수 있음을 알 수 있었다.

3. 同一한 放流量에 대하여 TPM 技法은 低流量技法보다 큰 貯水容量을 가져야 安定的으로 用水를 供給할 수 있음을 알 수 있었다. 이것은 TPM 技法에 의한 貯水用量決定結果가 더욱 安定된 結果를 보여주며 低流量技法에 의할 경우 그 貯水用量을 적게 할 危險이 있음을 보여 주었다.

4. 記錄値 보완을 위하여 模擬發生된 資料를 使用하므로써 信賴性을 높였고, 다양한 確率에 대한 Storage-Yield 曲線으로부터 放流量에 대한 必要貯水容量 혹은 貯水容量에 대한 安全放流量을 구할 수 있었다.

5. 殘差累加曲線技法과 低流量技法은 貯水池의 豫備設計에 妥當하지만 TPM 技法은 殘差累加曲線技法 및 低流量技法에서 不可能한 月別 혹은 季節別 需要變動에 따른 貯水容量을 決定할 수 있기 때문에 貯水池의 最終設計에 가장 妥當한 方法임을 알 수 있었다.