

貯水池設計 및 操作에 관한 시스템解析에 對하여

On the System Analysis in Reservoir Design and Management

崔 榮 博
Choi, Young Bak

1. 머리말

貯水池를 計劃하는데 있어서 이것을 어느 位置에 어느 정도의 規模로 만들면 좋은가 하는 것은 計劃의 첫 段階로서 가장 중요한 것이다. 나아가서는 建設 후의 貯水池 最適水位操作이 문제가 된다. 즉, 댐을 建設하여 貯水池를 出現시키는 그 位置, 規模, 操作, 方法의 決定問題이다. 여기서 고려할 要素는 地質, 地形 水文量, 用水需要量, 治水效果, 댐建設의 經濟性, 나아가서는 貯水池建設에 의한 利益과 그 確實性 그 建設이 주는 自然的 및 社會的 影響 등 그 범위는 廣範圍하며 동시에 각 要素사이의 복잡한 관계가 문제의 整理를 더욱 곤란하게 한다. 그러나 한 水系에 多目的댐을 건설하는 경우 또는 運營하는 경우 문제는 더욱 복잡해진다. 이와같이 고려하여야 할 要素의 多樣성이 貯水池의 決定문제를 시스템 解析으로 취급시킬 必然性을 內在시킨다고 할 수 있다. 貯水池計劃 문제가 시스템 解析의 對象이 된 것은 최근의 일로 소위 시스템 工學의 發展이 시작한 후부터의 일이다. 이 解析方法으로서 O. R.의 각종 技法이 채용되고 電子計算機의 급속한 발전을 背景으로 하여 특히 美國에서는 1950年代부터 시작하여 多岐多様な 研究發表가 계속적으로 발표되고 있다.

여기서는 주로 貯水池의 시스템 解析에 관한 美國의 諸論文을 分類紹介하면서 최근의 이 研究의 動向과 問題點에 대하여 논술하기로 한다.

2. 貯水池의 시스템 解析

시스템 解析을 시스템 工學(System Engineering)이나 O. R. (Operations Research)로 混同하여서는 안된다. 시스템 解析은 지금 생각할여하는 計劃의 問題點은 무

엇인가, 무엇을 目標로하여 問題를 設定할 것인가, 바꾸어 말하면 廣範한 綜合的意味에서의 最適化(Optimization) 問題이다. 시스템 解析의 對象이 되는 것은 그 特徵의 첫째는 目標自體가 既知가 아닌 것이고 둘째는 그 技法이 자주 feed back 즉, 反復操作에 의한 問題解決法에 의하는 것, 셋째는 對象이 되는 것중에 不確實 또는 不確定事象이 포함되는 것이다. 이들은 요컨대 計劃의 目標設定, 評價函數의 捕捉方法에 문제의 主眼이 있고 말하자면 시스템의 움직임(behavior)을 이해하고 알려진 領域에서의 문제 해결에 대하는 것이라고 할 수 있다.

이에 대하여 O. R.은 주어진 問題, 주어진 目標 요컨대 어느 주어진 價值基準이래 모델(model)을 設定하고 그중에서의 最適化, 統制(調整), 操作을 課題로 하는 技法이라고 할 수 있다.

또 시스템 工學(System Engineering)은 시스템 解析에서 얻어진 知識을 기초로하여 주어진 目標에 도달할 수 있는 시스템을 合成하여 더욱 그 目標을 이루도록 運用하기 위한 努力중 工學的側面을 強調하는 것이라 할 수 있다. 즉 一定한 目的을 달성하기 위하여 連繫해서 動作하는 一聯의 構成要素를 選定配列하여 시스템을 구성하고 이것을 運營하는 工學이라고 定義할 수 있다. 그리고 이경우 시스템 概念(System Concept)으로서 大規模인 社會經濟活動을 조직하고 運營하기 위하여는 特定分野만의 깊은 專門知識만으로는 부족하여 넓은 分野에 있어서 知識의 綜合組織의인 思考方式이 필요하다고 생각되는 것이다. 시스템의 構成要素로서는 電子計算機, 通信機器, 生産機械, 列車, 自動車 通路, 港灣부터 事務所, 여기에 從事하는 人間까지 포함해서 생각하여야 하고 이들 要素의 組合를 시스템이라고 할 수 있다.

貯水池시스템으로서 생각되는 경우에 문제되는 것은 貯水池에 關聯되는 現實의 自然的 또는 社會的 現象을

어떻게 抽象化해서 모델을 作成하는 가는 것이다.

모델의 實際現象과의 模擬發生(Simulation)에 있어서는 自然現象, 社會現象에 대한 각 時代 및 地域의 特有性에의 認識方法에 의존한다는 意味에서 歷史的 및 思想的 制約을 받는다 고 보아도 좋다.

貯水池시스템에 관하여는 現在에 있어서 自然現象에 대하여는 주로 確率의 認識方法에 기본을 둔 自然科學의 認識方法과 社會現象에 대해서는 주로 經濟學의 認識方法의 模型化에 있어서 認識方法의 主流이라고 하여도 좋다. 현재의 認識方法이 絕對的 基準은 아니라는 것, 동시에 絕對的 基準이 存在하기 어렵다는 것도 納得하여야 한다.

모델化에 있어서 여러가지 難點중, 예컨대 水文現象이 時間的으로나 地域的으로나 變動이 심하여 그 豫測이 쉽지 않다는 것, 貯水池의 社會的 機能의 客觀的이고 동시에 正當한 把握의 困難性이 이의 代表的인 것이다. 이것을 打開하기 위하여 현재 행하여지는 手段은 水文現象에 있어서는 確率論을 貨幣價値로 換算한 數量에 의한 經濟的 評價이다.

이상의 客觀的 情勢를 참고로 하여 이 立場에서 앞으로 논술하는 技法을 이해하여야 한다.

3. 貯水池시스템에의 O.R.의 應用

(1) 累加曲線分析法(Mass curve analysis)

Ripple이 1883년에 개발한 累加曲線法은 貯水池시스템의 古典的 解析法이라고 할 수 있다. 현재도 이 方法은 많이 이용되고 있으며 현재의 소위 O.R.技法이나 電子計算機가 개발하기 훨씬 옛날에 발표되었다는 것을 생각하면 참으로 劃期的인 것이라 할 수 있다. Ripple의 研究는 貯水池規模決定問題에 있어서 大量的 水文量을 고려해 넣은 것은 처음의 일이다. 流入量과 必要放流量 즉, 需要量이 時間的 函數로서 時系列의 으로 주어진 경우에 貯水量의 規模를 合理的으로 결정하는 일반적인 方法을 확립하였다. 단, 이 경우 貯水池의 位置選定은 流入量이 所與條件으로 되어 있는 假定中에 벌써 포함된 것으로 하고 여기서는 문제시 하지 않는다. 貯水池規模의 判定基準은 주어진 流入量 時系列의 期間內에 항상 需要에 適應하는 供給量을 放流해서 물 不足을 發生시키지 않는 基準이다.

이 計算方法은 流入量時系列值 x_i 로 ($i=1, 2, \dots$)로 하고 必要放流量을 q (一定)로 하는 경우에 그 兩者의 差($x_i - q$)의 累加合을 만든다. 다음에 이 累加合이 減少하기 시작할 때의 그 값과 再次增加하기 시작할 때 값과의 差를 구한다. 그 差가 最大로 될때의 값이 전술

한 意味에서의 물 不足을 發生시키지 않는 必要貯水容量이 된다.

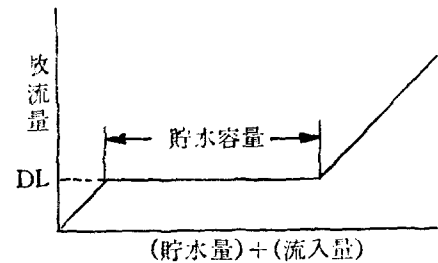


그림-1에 있어서 V', V'', V''' 중 最大의 것이 求할 여하는 貯水池規模이다.

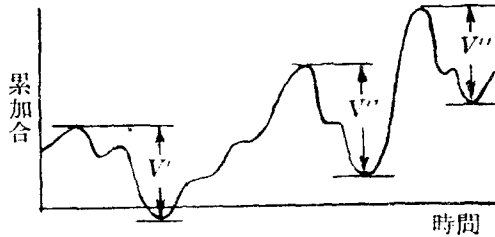
累加曲線法은 그림-1과 같은 累加合의 曲線을 그리는 것에서 이름 지워진 것이다.

Ripple 解析法의 주된 缺陷은 첫째로는 流入量資料로서 過去の 實績을 그대로 사용한 것으로 流量의 變動은 甚하므로 解析結果의 精度는 오직 사용된 水文資料의 期間의 長短에 左右된다는 것이다. 이것을 포함한 水文量의 不確定性이 고려되지 않고 있다. 둘째로는 貯水池規模決定에 관한 다른 要素 예컨대 需要量의 變動, 貯水池建設의 經濟性社會的 影響등이 고려되지 않고 있다. 첫째의 缺陷에 대하여는 후술할 流量合成에 의하여 적은 資料에 대하여도 確率的으로 취급할 수 있다. 예컨대 Fuller, Ven Te Chow, Young등은 流量合成에 의하여 그림-1에 표시된 V', V'', V''' 에 대해서 確率的인 檢討를 加하고 있다. 그러나 左右間이 解析方法은 流入量이 記錄期間의 限定된 過去の 實測值이지만 貯水池規模決定에 水文量을 充分히 고려에 넣고 있어서 貯水池시스템 解析의 先驅로 평가할 수 있다.

(2) 確率的方法(Stochastic treatment)

Ripple 이후 貯水池의 시스템解析에 관한 研究는 오랜 期間 活潑하지 못하였다. Moran은 1954年 貯水池시스템에 確率理論을 導入하였다. Ripple의 경우, 水文量의 不確定性에의 配慮가 不充分한 點을 改良하여 流入量을 確率的으로 취급하여 貯水池의 規模를 確率論的으로 判定할 수 있게 되었다. 즉 期待行列論(Queuing theory)과 貯水池의 舉動과의 類似性에 着眼하여 解析方法에 期待行列論의 思考方式을 도입하였다. 즉, 流入量은 離散量으로서 確率的으로 표시하고 貯水池操作 方法을 그림-2와 같이 될 수 있는데로 一定한 必要放流量에 適合시키도록 하여 주어진 特定規模의 貯水池가 滿水가 되는 確率, 空虛가 되는 確率, 바꾸어 말하면 貯水量의 確率分布를 求하고 있다. 이 解析方法은 Ripple과 같이 直接貯水池規模를 결정하고자 하는 것이

아니고 주어진 貯水池規模를 變化시켜 각각의 貯水池規模에 있어서 確率分布를 구하고 이것에 의하여 貯水池規模決定의 判定材料를 提供코져 하는 것이다.



Langbein은 Moran의 期待行列의 着想을 더욱 發展시켜 1958년의 論文에서 流入量의 確率分布를 非正規分布로 假定하고 流入量의 持續性을 고려하였다. 貯水池操作方法으로서 放流量을 貯水量의 非線形函數로 定하고 需要量의 季節的 變動을 고려하고 있다. 貯水池規模決定에 관해서는 여러가지 貯水池規模에 있어서 貯水量確率分布 및 放流量의 確率分布를 月單位別로 求하고 貯水池가 空虛가 되는 確率, 越流하는 確率을 어떻게 定하는가가 問題로 되지 않고 있다.

解析은 期待行列理論에 準하여 遷移를 中心으로하여 貯水量確率 혹은 放流量確率에 관한 確率方程式을 푸는 方法에 의한다. 流入量의 持續性을 考慮에 넣으므로 單純한 確率分布보다 現實條件에 近接시키고 있다. 이 考慮方式은 一般的 方法은 아니나 持續性의 考慮에 의하여 必要로 하는 貯水容量의 增大傾向은 明白히 하고 있다. 따라서 必要貯水池規模가 增大하는 傾向은 前期間의 流入量이 적으면 다음 期間의 流入量도 적게되는 可能性이 높고 各期間의 流入量을 獨立事象으로서 취급하는 경우보다도 貯水池規模가 增大하는 것이 된다.

Matrix의 貢獻은 水文情報들보다 正確히 모델化하기 위하여 流量의 持續性을 考慮에 넣은 點에 있다. 이것은 計劃된 貯水池規模가 年間流量에 比하여 작은 경우는 別로 문제가 되지 않으나 그 規模가 增大함에 따라서 그 價値가 增大한다. Lloyd는 流入量이 獨立인 경우 貯水量의 變動이 Markov 過程을 이루고 있으며 遷移 Matrix에 의하여 貯水量의 確率分布를 얻는 것에 注目하여 이것을 流入量의 持續性이 고려될 수 있도록 發展시켰다. 이 方法은 貯水量과 流入量의 同時舉動을 기술하는 變數單純 Markov過程으로 하여 遷移 Matrix를 구하고 確率方程式을 풀이하므로써 貯水量의 確率分布를 구하고 있다. 거기에서 流入量의 遷移 Matrix가 季節的으로 變化하는 것도 고려한 경우의 解決도 提示하고 있다. 그런데 Lloyd의 提案에서는 貯水池操作

方法이 取水量一定이라하는 것과 같이 固定的이며 流入量을 3個의 離散量으로서 代表시키는 등의 點에 難點이 있다고 하여도 좋다. 流入量을 離散的으로 표시하는 區分을 細分하면 遷移 Matrix의 Parameter는 膨大한 數로 되고 過去の 實測記錄에서 얻지 않으면 안될 Parameter의 精度를 높이는 것은 어렵게 된다.

이들 確率的手法이라고 할수 있는 몇個의 手法은 特定한 貯水池規模에 있어서 貯水量의 確率分布를 求하는 것에 主眼을 두고 있으며 貯水池規模決定의 判別資料의 提供에 먼저고 마는 것이 된다.

그러나 流量의 持續性을 고려한 點에서 水文量의 모델化를 보다 發展시켰다고 評價할수 있다.

(3) 動的計劃(Dynamic Programming 또는 D.P.)

J.D.C. Little은 1955年 水力發電計劃으로서 貯水池의 運用에 D.P.法을 적용하였다. 流入量의 確率分布와 電力需要量을 既知로 해서 電力需要를 充足하는 豫想費用을 最少化하는 經濟的 目的函數를 定하고 最適貯水池操作法을 求하였다. 貯水池를 單純한 構造物로 보지 않고 그 社會的 機能도 貯水池시스템中에 取入하여 시스템解析 確立에 앞장섰다. Little以後 W.A. Hall은 D.P.方法에 의한 水貯池시스템解析에 着手하였다. 1961年의 論文에서는 貯水池에는 流入量에는 손을 대지 않고 貯水池의 位置選定과 貯水容量의 各利水部門에 의 配分問題를 다음과 같은 段階의 水準으로 分解하여 各 各經濟的 目的函數를 定하고 D.P.方法에 의하여 定式化하였다.

1) 貯水池를 어느 곳에 어느程度의 規模로 건설하면 좋은가.

x_i : i 番池의 貯水池規模 $V(Q)$: 目的函數

$$V(Q) = \max\left[\sum_{i=1}^n V_i(x_i)\right] \dots \dots \dots (1)$$

단, Q 는 貯水可能量의 上限으로서

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq Q, x_i \geq 0$$
가 되어야 한다.

2) 貯水容量을 利水目的別로 어떻게 分割하는가.

x_j : j 目的을 위한 貯水容量
 $V_j(x_j)$: j 目的부터의 純便益

$$V_j(x_j) = \max\left[\sum_{i=1}^m V_i(x_i)\right] \dots \dots \dots (2)$$

$$\dots, \sum_{i=1}^m x_i \leq x_j, x_j \geq 0$$

3) 目的貯水量을 各地點에 어떻게 配分하면 좋은가.

x_k : 各地點使用量
 $V_k(x_k)$: 各地點에서의 水 使用에 의한 純便益

$$\text{目的函數 } V_j(x_k) = \max\left[\sum_{k=1}^p V_k(x_k)\right] \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{단, } \sum_{k=1}^p x_k \leq x_j, \quad x_k \geq 0$$

解法은 第3 段階의 水準에 있어서 $V_k(x_k)$ 를 어떤 方法에 의하여 추정하고 x_j 의 모든 妥當한 값에 對하여 $\sum_{k=1}^p V_k(x_k)$ 를 最大로 할 수 있도록 $V_j(x_j)$ 의 函數形을 정하고 다음에 이 $V_j(x_j)$ 의 函數形을 第2 段階의 水準으로 사용하고 같은 方法으로 $V_i(x_i)$ 의 函數形을 구하여 이것을 다시 第1 水準으로 사용하는 그와같은 形式을 취한다.

D.P.의 하나의 缺點은 便益函數가 i 에 관해서 서로 獨立이 되어야만 하는 點이다. 그러나 實際에 있어서 發電에 사용한 물이 灌溉에도 이용된다는 意味에 있어서 目的別便益函數는 獨立은 아니다. 그래서 Hall은 1964年의 論文에 있어서 물의 二重利用을 고려하여 便益函數가 目的別로 從屬하고 있는 경우에 대해서 貯水池規模의 決定과 그 容量의 目的別配分問題로서 D.P.로서 풀이하고 있다. 단, 洪水調節目的에 대한 配分에 대하여는 고려되지 않고 있다. 이 解決에서는 먼저 貯水池規模를 x_h 로 가정하고 다음식과 같이 粗便益 B_h 를 最大로 할 수 있도록 貯水池容量을 各利水用的別로 D.P.로서 配分한다.

$$B_h = \max\left[\sum_{i=1}^n V_i(x_i)\right], \quad \sum_{i=1}^n x_i \leq x_h \dots\dots\dots(4)$$

i : 目的別利水

다음에 二重利用되는 水量을 D 로 하고 $X = X_h - D$ 를 求한다. X 의 開發規模의 費用 $C(X)$ 를 계산하고 또 貯水池가 存在하는 그것만으로서 洪水調節의 利益이 얻어지는 경우 이것을 $B_f(X)$ 로 한다. 이들 관계에서 純利益을 다음식과 같이 求한다.

$$V(X) = B(X_h) + B_f(X) - C(X) \dots\dots\dots(5)$$

다음에 X_h 를 parameter로 하고 $V(X)$ 를 계산하고 그 最大値를 最適値로 한다. 단, 發電便益은 落差 h 에 관계하는 까닭에 이것을 落差의 平均値 \bar{h} 를 고려해서 修正하고 있다.

上記 두 論文에서는 水文量이 고려되지 않고 또 經濟的 評價函數가 單純된 形式으로 가정되고 있는 것이 缺點이다.

Hall은 1968年의 論文에서 月單位の 流入量을 確定的으로 取扱하고 各利水の 便益函數를 最大로 하는 것을 目的으로 해서 주어진 貯水池의 最適操作方法을 D.P.로서 求하고 있다. 便益函數는 發電量과 그 單位價格과의 곱과 다른 利水部門을 一括한 利用水量과 그 單位價格과의 곱의 합으로서 표시하고 있다.

D.P.를 貯水池問題에 導入한 論文으로서 이외에 George K. Young, Z. Schweigg 등 多數가 있다.

Young은 1967年에 發表된 論文에서 주어진 貯水池에 대하여 물不足에 의한 損失函數를 정하고 이것을 最小로 하는 것을 目的으로 하여 流入量의 豫測을 고려한 最適操作方法(年單位操作)을 구하고 있다. 流入量은 後述할 Fiering이 개발한 流量合成方法에 準據한 다음식으로 合成되고 있다. 단, 流入量의 平均値를 μ_x , 分散 σ_x , 前期間流入量(X_i)와 다음期間의 流入量(X_{i+1})의 相關係數 ρ_{12} 는 流入量의 持續性을 나타내는데 實際로는 過去流量記錄에서 推定하지 않으면 歿된다.

$$X_{i+1} = \mu_x + \rho_{12}(X_i - \mu_x) + V_i \sigma_x (1 - \rho_{12}^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 V_i 는 標準正規分布에서 Monte Carlo法에 의하여 任意로 抽出되는 數值이다. Young의 解析方法은 Monte Carlo法을 사용한 D.P.이므로 M.C.D.P.(Monte Carlo Dynamic Programming)라고 부른다.

流入量의 持續性은 上식의 第2 項에 있어서 單純過 Markov過程으로서 고려되고 있다. 豫想流入量 \bar{X} 는 i 期의 流入量 \bar{X}_i 에서 合成된 $(i+1)$ 期の 流入量 \bar{X}_{i+1} 로서 다음식이 求하여진다.

$$\bar{X}_{i+1} = \mu \bar{x} + \rho_{23} \frac{\sigma_x}{\sigma_x} (X_{i+1} - \mu_x) + V_i \sigma_x (1 - \rho_{23}^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

여기서 $\rho_{23} \cdot X_{i+1}$ 과 \bar{X}_{i+1} 의 相關係數이다. 여기서도 $\mu \bar{x}$ 와 $\sigma \bar{x}$ 는 가정되고 있다. 여기서 ρ_{23} 은 parameter로서 그 數値를 變化시켜 이것에 의한 시스템의 影響을 조사하고 있다. 豫想流入量의 考慮方法은 먼저 D.P.에 의한 各期の 最適操作放流量 D_i 를 구하여 두고 다음식과 같은 回歸方程式을 最小目次法에 의해서 永하고 그 係數의 大小에 의하여 豫測의 效果를 判定하고 있다.

$$D_i = a_0 + a_1 S_i + a_2 X_i + a_3 \bar{X}_{i+1} \dots\dots\dots(8)$$

損失函數로서는 操作放流量과 一定需要量의 差의 函數로서 1次函數型과 2次函數型의 두 型을 單純한 形式으로 정하고 있다. 結果를 보면 1次型損失函數의 경우의 變化에 대해서는 豫測의 效果는 거의 없다고 하여도 좋다. 2次型損失函數의 경우 ρ_{23} 의 數値의 增大와 함께 그 效果가 크게 나타나는 것이 判明되었다. 1次型損失函數의 경우 豫測效果가 없는 것은 渴水期間에 있어서 損失의 累積方式이 1次函數型이며 그 損失의 總合에 있어서 變化가 없는 까닭이라 하겠다. 現實面에서 물不足이 增大함에 따라 그 被害는 急激히 增大하는 것이므로 損失函數는 2次型쪽이 1次型쪽보다 훨씬 適合하고 있다.

(1) 線形計劃(Linear Programming 또는 L.P.)

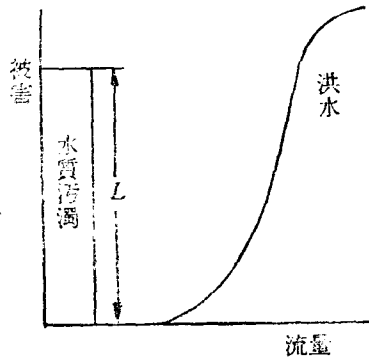
L.P.에 의한 貯水池시스템解析은 Thomas, Waterme

yer등에 의하여 시작되어 그후 Loucks, Young, Revelle 등의 연구가 있다. Thomas, Watermeyer의 논문은 Harvard Water Program의 일환으로서 연구되어 Design of Water Resources System (1962年)에 발표되고 있다.

Young은 洪水調節과 水質汚濁調節을 함께 고려한 경우의 單一貯水池의 最適操作方法을 L.P.에 의하여 求하고 있다.

目的函數는 水質汚濁被害와 洪水被害에 期待値를 最小화하도록 생각되고 있다.

단, 操作은 年單位, 流入量은 獨立事象으로 하고 確率分布表示로 되어 있다. 損失函數는 그림 -3과 같이 假定하고 水質汚濁被害의 L을 parameter로서 變化시키고 있다. 水質汚濁에 依한 被害의 程度를 표시하는 L의 값을 增大시키면 洪水被害額의 期待値는 增大하고 있다. 이것은 渴水期の 水質汚濁을 緩和하기 위한 물을 貯水池에 確保하여 두지 않으면 안되므로 이 分量만큼 洪水調節용의 容量이 減少하는 까닭이다. 그런데 이 研究에서 注目할 것은 L에 變化가 있어도 L의 範圍內에서 最適操作方法이 거의 一定인 것이다. 이 까닭에 L의 正確한 값이 모르더라도 그 概略값을 차지면 水質汚濁을 고려한 最適操作方法이 실용상 구하여지는 것이 된다.



Revelle는 貯水池의 建設費用, 바꾸어 말하면 貯水池 規模를 最小로 하는 것을 目的으로 하고 需要量을 만족시키는 操作方法(月單法)을 求하고 있다. 流入量은 確率分布에 의하여 獨立事象으로 표시되고 있다. 解法은 確率의 制限條件式아래 L.P.에 의 依한 것이다. 洪水調節容量의 制約條件으로서 고려되고 있다. 이 方法에서는 最適操作方法과 貯水池規模가 동시에 決定되는 것에 特徵이 있다고 하겠다.

(5) 模擬發生(Simulation)

模擬發生手法은 進술한 Harvard Water Program에서

L.P., D.P. 등 다른 解析手法과 비교해서 매우 實用性이 높은것으로 되어있다. 거기에서 Myron B. Fiering 이 1961年에 提示한 流量合成法에 의하여 더욱 發展되고 있다. 이 流量合成法은 1967年에 Fiering에 의하여 더욱 體系化되고 있다. 그의 1961年論文에 있어서는 流量合成法에 의하여 年單位의 流入量을 500年間合成해서 發電, 灌溉, 洪水調節에 의한 便益函數를 가정하고 이것을 最大로 하는 目的아래 單一貯水池의 規模操作 方法, 各利水의 開發, 規模를 決定變數로 해서 模擬發生手法을 사용하고 있다.

操作方法是 그림-2에 표시한 形이며 그림중의 D_L 을 결정코저 하였다. 便益函數는 發電과 灌溉에 대해서는 開發規模를 parameter로 하여 取水量 D_i 의 非線形函數로 하고 洪水에 대해서는 貯水池建設에 의한 洪水의 生起確率의 減少分에 比例하는 形을 가정하고 있다.

解析方法是 각각이 決定變數(design parameter)와 流量의 持續性을 표시하는 相關係數를 parameter로 하고 450個의 組合에 대한 模擬發生을 행하고 各組合마다의 利益額을 계산한다. 이 結果에서 각각의 相關係數에 대한 利益이 增大가 되는 것은 決定變數의 最適組合으로 하고 있다. 利益額은 求하는 方式은 決定變數를 特定의 組合으로 固定한 경우의 貯水池부터의 放流量의 確率分布를 求하고 이 確率아래 年平均便益을 계산하고 이것을 耐用年數와 利子率로서 現在價格을 換算하고 建設코스트를 減하여 求하고 있다. 流量의 持續性이 強할수록 즉, 相關係數가 클수록 純便益은 減少하고 있다. 이것은 便益函數가 非線形인 까닭에 渴水가 되면 그 持續性 때문에 被害가 크게 나오는 까닭이다.

Young은 1968年의 論文에서 下流域의 물 需要에 대하여 上流의 貯水池群(6地點)이 種類의 貯水池 操作 方法에 대하여 어떤 效果를 가져오는가를 模擬發生手法에 의하여 評價하고 있다.

이 模擬發生에서는 各貯水池地點의 月單位合成流量 아래 月單位의 貯水池操作이 100年間에 걸쳐서 행하여지고 있다. 評價方法은 經濟的인 費用便益評價는 아니고 月單位의 물不足의 確率表示 및 貯水池水位의 確率表示케 두고 있다. 月單位不足의 確率은 模擬發生된 月流量아래 月流量 q_i 를 流量合成法에 의하여 求하고 1965年의 Wasington市에 있어서 月變動편틴을 1685年의 需要豫測量에 適應시켜 q_i 와 月需要量과의 差를 계산하고 그 頻度에서 물 不足量에 應하는 確率을 求하고 있다. 貯水池群操作方法是 다음의 2 方法을 採用하고 있다.

1) 月平均需要量 D 와 月流量變動數 CV 에서 必要流量을 $(D+t(V \cdot D))$ 로 한다. 이 t 는 parameter로서 變化시

켜 最適인 것을 선정한다. 다음, 必要流量과 殘流域에서의 流出量 U_3 와의 差를 不足量 Δ 로 하여 各貯水池에 이것을 補給시킨다. 不足量 Δ 를 補給하기 위하여 어떤 貯水池에서 얼마만큼의 量을 補給하면 좋은가의 問題가 생긴다. Young는 다음式에서 이 不足量을 各貯水池에 配分하면 좋다고 생각된다. 各貯水池의 放流量

$$R_i = \frac{(\text{貯水池 } i \text{의 貯水量})}{(\text{貯水池群의 總貯水量})} \times \Delta \dots \dots \dots (9)$$

2) 固定的인 操作方法으로 各貯水池마다 高水期間(1~6月)은 될수 있는데로 流入量을 貯留하고 低水期間(7~12月)은 7月 始初의 貯水量 S_i 의 1/6에 各月の 流入量 I_i 를 보탠것을 各月の 放流量으로 한다. 즉, 7~12月은

$$R_i = S_i(\text{July})/6 + I_i \dots \dots \dots (10)$$

이다. 물 不足의 發生確率을 基準으로 다음의 4가지 경우에 대하여 各々 檢討가 加해지고 있다.

- a. 貯水池가 없는 경우
- b. 6地點모두 貯水池가 건설되는 경우
- c. 1地點만에 貯水池가 건설되는 경우
- d. 5地點에 貯水池가 건설되는 경우

이들 結果에서 물 不足確率이 貯水池地點의 選定이나 貯水池操作方法의 명확한 評價基準으로 되지 않은 것을 알았다. 또 貯水池水位의 確率에서 판단하여 慰樂을 目的으로 하는 경우 그 水位가 높고 安定되는 것이 所望스러우며 操作方法이 유리한 것을 알았다.

模擬發生手法의 特徵은 많은 決定變數(design parameter)를 동시에 parameter로서 취급할 수 있고 관련되는 여러 要素를 數롭게 貯水池시스템에 집어넣을 수 있는 點이다. 그러나 L.P., D.P.에 비해서 數學的 操作이 간단하고 알기 쉽다. 따라서 Young의 경우와 같이 多數의 貯水池를 취급하는데 편리하며 貯水池群으로서 機能을 연구하는데 有力한 手法이라고 하여도 좋다.

要約하면 擬擬發生은 복잡하고 parameter가 많은 시스템에서의 出量(output)를 비교적 간단히 얻을 수 있는 長點이 있다.

(6) Harvard Water Program

Harvard 大學에서는 1950年代부터 工學者와 經濟學者가 協力하여 水資源開發計劃에의 O.R. 其他計量數學的手法의 應用이 多角的으로 提案되고 있다. 여기서는 貯水池의 시스템解析을 위시하여 經濟的 評價函數, L.P., D.P., 模擬發生등의 解析方法, 거기에다 政策的 考慮에 이르기까지의 議論이 展開되고 있다. 이들 成果의 1962年까지의 集大成이 Design of Water Resource System이다.

Harvard Water Program의 目的은 多目的 多元的인

水系綜合開發計劃에 대한 새로운 科學的 接近方法을 創出하는데 있다. 보다 具體的으로 말하면 몇개의 設計計劃案中에서 가장 妥當한 것은 選出하는 基準은 무엇인가, 模擬發生을 위한 電子計算機를 위한 프로그램의 節次를 어떻게 設定하는가, 얻어진 結果를 目的에 對照하여 判定評價는 어떻게 하는가 등 問題의 解決案의 提示이다.

우리나라와는 社會的, 經濟的事情이 相異한 風土로 여기서 報告된 研究는 우리나라 水資源개에 直接的 通用은 困難한 點이 많으나 이 종류의 問題에 대한 科學的 接近法의 提示는 參考할 點이 매우 많다.

4. 結 言

本文은 最近美國에서 發表된 貯水池시스템 解析面에서의 論文을 紹介整理한 것이다. 이 發展의 흐름을 볼때 貯水池시스템解析은 1950年代의 電子計算機의 急激한 發展普及을 기초로하고 第2次大戰中에 開發된 O.R.등을 驅使하여 多量의 資料, 多種類의 因子를 사용하여 問題의 解決을 試圖하고 있다. 그 發展段階에 있어서 主要課題는 水文量的 모델化, 評價函數의 決定方式이다. 水文量的 모델化는 實測記錄을 기초로하여 確率의 所以로 취급하는 方法에서 다시 流量의 持續性을 고려하는 方法으로 發展하여 왔다. 이 中에서 가장 주목 해야할 成果는 Fiering의 流量合成法이다. 이 方法에서는 現實의 流量과 合成流量 사이에는 確率의 意味에서 明確하게 意味가 있는 差는 認定되지 않으며 模擬發生手法의 主要한 武器로 될 수 있다고 判定되고 있다. 但, 流量合成을 위한 平均值, 分散, 持續性을 표시하는 相關係數등의 parameter는 過去の 資料에서 추정할 수밖에 없다. 특히 相關係數는 過去の 資料에서 推定이 困難하므로 그 값을 變化시켜 그 變化에 따라서 시스템이 어떤 影響을 받는가를 檢討하고 있다. 實用上에 있어서는 그 값의 定立方式에 문제가 있다.

流量의 모델化에 있어서 다른 하나의 問題點은 洪水의 處理方式이다. 本文에서 소개한 論文의 거의 大部分이 月單位流量이나 年單位流量이며 洪水調節을 主目的으로 하는 시스템解析은 없다.

우리나라나 日本에 대한 美國의 洪水現象의 相異, 貯水池規模의 相異點을 고려하면 美國에서는 우리나라나 日本과 같이 短時間單位의 洪水는 취급하지 않아도 좋다. 그런데 우리나라나 日本은 적어도 洪水에 대하여 時間單位의 流量을 취급하지 않으면 안된다. 美國의 경우 앞으로 洪水流出을 포함한 水文現象의 全過程을 시스템中에 取入할 必要가 더욱 요청되고 있다. 例컨

데 Young의 1969年論文에서는 貯水池로서 統制할 수 없는 殘流域부터의 流出量을 문제로 하는 경우에 대하여도 그 必要性이 強하게 요청되고 있다. 流量의 持續性의 考慮에 있어서 주의할 것은 流域內의 水文特性의 均一을 前提條件으로 하고 있는 點이다. 大流域의 경우 各支流別로 流況이 매우 다른 경우가 많고 그 大流域부터의 流出을 하나의 流量으로 代表시키는 것은 確率論的으로는 困難할 것이다.

參考 및 引用文獻

- 1) 猪瀬博編 : システム工學 I, 岩波講座基礎工學 21卷, pp.2~5, 1969年 2月
- 2) Ripple, W. 'The Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply' Proc. Institution of Civil Engineers, vol' 71. pp.270—278, 1883.
- 3) Young, G.K. and Puentes, C.D.: Storage Yield: Extending the Sequent Peak Algorithm to Multiple Reservoirs, Water Resource Research, vol.5, no.4 oct. 1969.
- 4) Moran, P.A.P. 'A Probability Theory of Dams and Storage Systems' Australian Jour. of Applied Sci. pp.116—124, 1954.
- 5) Langbein, W.B. 'Queuing Theory and Water Storage' Jour. of the Hydraulic Division, Proc. ASCE, Hy 5, 1958.
- 6) Gani, J. 'Problems in the Probability Theory of Storage Systems' J.R. Statist. Soc. B. 19. 1957.
- 7) Prabhu, Q.J. Maths, 9, 1958.
- 8) Lloyd, E.H. 'A Probability Theory of Reservoirs with Serially Correlated Inputs' Journal of Hydrology 1, 1963.
- 9) Lloyd, E.H. S. Odom, 'Probability Theory of Reservoirs with Seasonal Input' Journal of Hydrology 2, 1964.
- 10) Little, J.D.C. 'The Use of Storage Water in Hydroelectric System' Jour. Operations Research Soc. Am 3, 1955.
- 11) Hall, Warren A. 'Dynamic Programming Approach to Water Resources Development' Journal of Geophysical Research, vol. 22, No.2, 1961.
- 12) Hall, Warren A. 'Optimum Design of Multiple Purpose Reservoir' Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Hy 4, July, 1964.
- 13) Hall, Warren A. 'Optimization of the Operation of a Multiple-Purpose' W.R.R. vol' 4, No.3, June, 1968.
- 14) Young, George K. 'Finding Reservoir Operating Rules' Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Nov. 1967.
- 15) SchweiS, Z. 'Optimal Control of Linked Reservoirs' W.R.R. vol. 4, No.3, June, 1968.
- 16) Loucks, D.P. 'Computer Models for Reservoir Regulation' J. Sanit. Eng. Div. Amer. Soc. Civil Engrs., Aug. 1968.
- 17) Young, G.K. 'Reservoir Management: The Trade off between Low Flow Regulation and Flood Control' W.R.R. vol. 4, No.3, June, 1968.
- 18) Revelle, Charles and others, 'The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, I. Development of the Stochastic Model' W.R.R. vol. 5, No.4, Aug. 1969.
- 19) Loucks, D.P. and Falkson, L.M. 'A Comparison of Some Dynamic, Linear and Policy Iteration Methods for Reservoir Operation' W.R.R. vol. 6, No.3, May-June, 1970.
- 20) Maass, A. and others, Design of Water-Resource Systems, Harvard Univ. Press, 1962.
- 21) Fiering, Myron B. 'Queuing Theory and Simulation in Reservoir Design' Jour. of Hydraulics Division, ASCE, Hy 6, Nov. 1961.
- 22) Hufschmidt, M.M. and Fiering, M.B.: Simulation Techniques for Design of Water-Resource Systems, Harvard Univ. Press, 1966.
- 23) Young, G.K. 'Assessing Upland Reservoirs Using a Daily Flow Model' W.R.R. vol. 5, No.1, April, 1969.