

〈論 文〉

# 單一多目的 貯水池의 最適運營

## (Optimal Operation of Single Multi-Purpose Reservoir)

李 舜 鐸\*

Lee, Soontak

李 樹 植\*\*

Lee, Su-Shik

### ABSTRACT

This study aims at the development of DP-Model for the establishment of monthly optimal operation policy of single multi-purpose reservoir by which the water demand of downstream can be satisfied under the various physical constraints.

Series, A,B,C. of inflow are selected out of future monthly inflow data which are simulated from the past monthly average inflow of Andong dam site. the neight possible alternatives in each inflow series are established in order that Andong dam can supply the water demand of Nagdong main stream of 30% to 100%.

Nextly, the reservoir rule curves is derived for each alternative by the detailed sequential analysis of stroage, future inflow and water demand based on the reservoir continuite equation. Then, an alternative which can satisfy the objective function of system based on the rule curves in the exteream is determined as an optimal operation policy from the application of developed DP-Model.

### 要 旨

本 研究는 單一多目的 貯水池의 運營政策을 樹立함에 있어서, DP를 適用하여 댐의 여러 物理的 制約條件下에서 댐 下流의 用水需要를 最大로 充足시킬 수 있는 月別 貯水池 最適 運營政策을 樹立 하는 알고리즘을 開發하는데 主眼點을 두었다.

分析對象인 安東댐의 過去 月平均 流入量으로부터 장래 月流入量을 模擬發生시키고, 그 模擬發生 된 資料中에서 流入量 系列 A,B,C를 選定하여, 各 系列別로 洛東江本流의 用水需要中에서 安東댐 이 30%~100%까지 充足시킬 수 있도록 8個의 代案을 設定하였다.

그리고 DP 모델을 適用시켜 물 需要量과 運營曲線에 근거한 시스템 運營目的函數를 가장 잘 遂行 하는 代案을 最適運營政策으로 決定하였다.

加速化等이 여러 分野에서 用水供給의 필요성을 提高 시킴에 따라 水資源의 開發과 效率의인 利用의 중요성 에 대한 인식이 높아가고 있다.

### 1. 序 論

人口의 急激한 增加와 生活水準의 향상, 産業活動의

따라서 效率의이고 合理的인 水資源管理와 그 利用

\* 嶺南大學校 工科大學 教授

\*\* 嶺南大學校 大學院 博士課程·蔚山工業專門大 土木科

의 效果를 極大化하기 위하여 시스템 技法에 의한 多目的의 시스템의 最適化의 方法이 絶對히 要求되고 있다. 시스템 技法에 의한 最適化는 多目的의 시스템을 어떻게 運營할 것인가 하는 것을 意思決定하는 것으로서 주어진 시스템의 制約條件(Constraint)下에서 目的函數(Objective function)를 가장 잘 수행하는 代案을 여러 代案中에서 擇하여 最適運營政策(Optimal operation policy)을 決定하는데 있다.

最適化方法의 分析技法으로는 一般的으로 線型計劃法(Linear Programming), 動的計劃法(Dynamic programming), 非線型計劃法(Non-linear Programming), 模擬發生技法(Simulation technique) 등이 있는데 大型水資源 시스템의 最適化에 있어서는 DP, 模擬發生技法이 여러 分野에서 가장 많이 使用되고 있다.

貯水池 System의 運營問題에 있어서는 LP나 모의 발생기법의 適用例도 많으나 一般的으로 DP 모델이 더욱 利用可能性이 넓은 것으로 지금까지의 研究結果에서 밝혀지고 있다.<sup>1)</sup>

Bellman 最適化의 原理에 基礎를 둔 多段階意思決定法인 DP는 LP<sup>2)</sup>와 같은 다른 數理計劃法과는 달리 그 模準알고리즘이 있는 것이 아니고, 各 適用分野마다 獨特한 알고리즘을 開發해야 하는 것이 DP의 特徵이다. DP는 처음 Richard Bellman<sup>3),4)</sup>과 Rand 研究所의 研究員들에 의하여 紹介되어 發展되었고, 水資源시스템의 여러 分野에서 많은 適用 및 Model들이 開發되었다.

Hall과 Buras<sup>5)</sup>는 貯水池시스템의 運營에 처음으로 DP의 適用을 제안하였는데 그들은 貯水池의 容量을 여러 目的으로 配分하는 問題를 研究하였다.

Hall<sup>6)</sup>은 貯水池 最適容量 決定에도 DP를 適用하였으며, Young<sup>7)</sup>과 Hall<sup>8)</sup>은 單一貯水池(Single)의 最適運營政策을 決定하는데 DP를 適用하였다.

또, Heidari et al.<sup>9)</sup>, Fults, Hancock<sup>10)</sup>와 Meredith<sup>11)</sup>는 DP에 의하여 各 段階에서 여러가지 상태변수(State variables)를 가지는 貯水池 運營問題를 푸는 過程을 예시하였다. Singh<sup>12)</sup>는 이 方法을 Illinois의 Kakaskia 江에 있는 貯水池에 適用하였다.

Su와 Deininger<sup>13)</sup>은 DP를 使用하여 Superior 호수의 最適運營曲線을 決定하였다.

한편 우리나라에서의 貯水池 運營에 대한 DP의 적용은 권<sup>14)</sup> 등이 增分分析에 의한 DP로 저수지 시스템 운영방안을 연구하였고, 梁<sup>15)</sup> 및 朴은 漢江水系 水力發電문제에 DP를 適用하였다.

## 2. 貯水池 運營政策 理論

### 2.1 一般的인 貯水池 運營政策

一般的인 貯水池 運營政策은 長期 및 短期政策으로 나누는데, 長期政策은 貯水池가 運營되는 동안에 바람직한 目標貯水量과 目標放流量의 關係로 定義되며, 長期政策의 變化는 貯水量, 堰下流의 물 需要量 등과 같은 物理的 要素들의 變化를 包含한다. 短期政策은 流入量과 初期貯水量이 堰下流의 물 需要를 充足시키느냐 시키지 못하느냐 하는 주어진 目標시스템의 運營으로 定義된다.

長期 및 短期 貯水池 運營政策사이에서 差異點이 나타나는 간단한 運營政策은 定常 運營政策(Normal operation policy)인데, 이 運營政策의 基本的인 技法은 下流의 물 需要에 따라 放流한다고 가정하는 것이다.

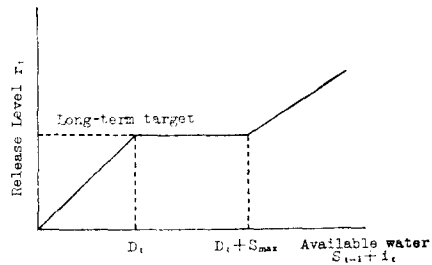


Fig. 1 The Normal Operation Policy.

Fig. 1에서 보는 바와같이 貯水池 容量을  $S_{max}$ ,  $t$  期間에서 最終貯水量을  $S_t$ , 流入量을  $i_t$ , 下流 물需要量을  $D_t$ , 放流量을  $r_t$  라고 하면

$$S_{t-1} + i_t \leq D_t \text{ 이면 } r_t = S_{t-1} + i_t \dots \dots \dots (1)$$

$$S_{t-1} + i_t > D_t \text{ 이면 } r_t = D_t \dots \dots \dots (2)$$

$$S_{t-1} + i_t - D_t > S_{max} \text{ 이면 } r_t = S_{t-1} + i_t - S_{max} \dots \dots (3)$$

短期運營政策은 물 需要가 생길 때 시스템 運營으로 統制되어야 하며, 한 點에서의 運營政策은 可用물을 需要가 發生하는 여러 地點에 어떻게 配分하느냐 하는 것이다. 效率的인 政策은 물 需要가 일어나는 下流에 적절히 물을 配分하여 配分된 물에 의하여 생기는 純利益을 最大化하는 것이다.

단약  $i$  番계 地點에서 需要量이  $D_i$ , 下流의 當水요량이  $\sum D_i$ , 可用貯水量이  $S_{t-1} + i_t$  이면, 이때 물 配分量  $E_i$  는

$$E_i = \frac{D_i}{\sum D_i} \times (S_{t-1} + i_t) \dots \dots \dots (4)$$

이고, 이 政策은 어떤 特定한 運營政策이 樹立되어 있지 않은 開發途上國에서 많이 使用되는데 Argentina 의 Riocolorado project 에 對한 MIT 의 研究<sup>10)</sup>에서 利用되었다.

2.2 動的計劃모델

各 期間  $t$  에서 流入量  $i_t$  와 放流量  $r_t$  를 가지는 單一貯水池가 있을때, 貯水池容量  $K$  와 流入量  $i_t$  가 주어지면 貯水池 運營은 總利益을 最大로 하는 放流量을 決定하는 것이다. 期間  $t$  에서 初期貯水量을  $S_t$  라 하고 純利益은 初期 및 最終貯水量( $S_t, S_{t+1}$ )과 放流量  $r_t$  의 函數로 定義된다고 假定하면, 純利益은  $NB_t(S_t, S_{t+1}, r_t)$  로 表示되는데 貯水로 因한 利益은 베크리에이션, 舟運, 動植物의 生育等이고, 放流로 因한 利益은 水力發電, 用水供給, 廢水의 회식 等으로 생긴다.

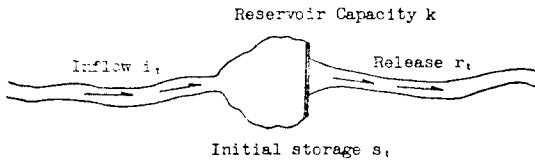


Fig. 2 Reservoir Operation Variables for each Period  $t$ .

여기서 一定期間  $t$  에서 流入量을  $i_t$  라고 表示하고, 1 年中에 期間  $T$  가 있다고 假定하면, 運營目的函數는 總年利益을 最大로 하는 것이다.

$$Max \sum_{t=1}^T NB_t(S_t, S_{t+1}, r_t) \dots \dots \dots (5)$$

制約條件은 各 期間  $t$  에서 流入量, 溢流量(Overflow) 및 放流量의 均衡을 이루는 데 있고, 이 均衡을 表示하는 데는 많은 方法이 있으나, 증발이나 침투에 의한 損失은 重要하지 않다고 假定하면 한 方法은 다음과 같다.

$$S_{t+1} = S_t + i_t - r_t \dots \dots \dots (6)$$

但, 여기서 各 貯水量  $S_t$  는 貯水池容量  $K$  보다는 작아야 한다. 즉,

$$S_t \leq K$$

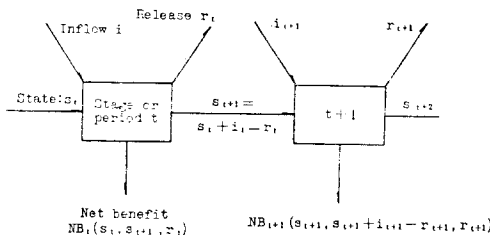


Fig. 3 Sequential Reservoir Operation Process

식(5)에서부터 식(7)까지 定義된 貯水池 運營問題는 Fig. 3 에서 例示된 것처럼 多段階 意思決定過程으로 볼 수 있다.

段階는 時間이고, 狀態는 貯水量인데, 各 過程의 段階는 하나의 前進 또는 後進의 連續인 循環方程式으로 定式化될 수 있다. 函數  $f_t^1(S_t)$ 는 初期貯水量  $S_t$  가 주어졌을 때, 最終年의 最終期間에 있어서 貯水池運營으로 얻어지는 最大 純利益이다.

$$f_t^1(S_t) = Max[NB_t(S_t, S_{t+1} + i_t - r_t, r_t)] \dots \dots \dots (8)$$

$$S.t. \quad r_t \geq 0$$

$$r_t \geq S_t + i_t$$

$$r_t \geq S_t + i_t - K$$

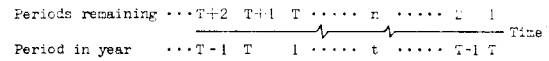


Fig. 4 Relationship between Periods  $t$  and  $n$  at each Stage of Reservoir Operating Problem.

放流量  $r_t$  의 制約은 可用되는 물에 制限되고, 可用 물이 貯水容量  $K$  를 초과한다면 溢流해야 하는 것이다

Fig. 4 에서 우측부터 좌측으로 즉, 後進하면 다음 段階는 前期間인  $t-1$  이다.  $f_{t-1}^1(S_{t-1})$  函數는  $t-1$  期間에서 初期貯水量  $S_{t-1}$  은 주어지므로 두 期間의 最大 總利益을 나타낸다.  $S_t = S_{t-1} + i_{t-1} - r_{t-1}$  이므로  $f_t^1(S_t)$  는 狀態變數  $S_{t-1}$ , 決定變數  $r_{t-1}$  및 既知의 平均流入量  $i_{t-1}$  에 依하여 表示된다.

$$f_t^2(S_{t-1}) = Max[NB_{t-1}(S_{t-1}, S_{t-1} + i_{t-1} - r_{t-1}) + f_t^1(S_{t-1} + i_{t-1} - r_{t-1})] \dots \dots \dots (9)$$

$$S.t. \quad r_{t-1} \geq 0$$

$$r_{t-1} \leq S_{t-1} + i_{t-1}$$

$$r_{t-1} \geq S_{t-1} + i_{t-1} - K$$

時間에 있어서 後進을 계속하면 잔존기간  $n(n > 1)$  개를 가지는 期間  $t$  에 關한 一般의인 循環方程式은 다음과 같이 표시된다.

$$f_t^n(S_t) = Max[NB_t(S_t, S_t + i_t - r_t, r_t) + f_{t+1}^{n-1}(S_t + i_t - r_t)] \dots \dots \dots (10)$$

$$S.t. \quad r_t \geq 0$$

$$r_t \leq S_t + i_t$$

$$r_t \geq S_t + i_t - K$$

여기서, 指數  $n$  은 1에서 始作하여 各 連續인 段階에서 增加하고, 指數  $t$  는 期間  $T$  에서 1까지 뒤로 循環하여 다시 期間  $T$  까지 循環한다. 期間  $t$  와 指數  $n$  의 相互關係는 Fig. 4 과 같다.

### 3. 最適運營政策分析

#### 3.1 分析水文資料

貯水池와 같은 水工構造物의 適切한 運營을 위해서는 數年 或은 數十年間의 장래 流入量의 正確한 豫測이 必要하게 된다. 그러나 流入量은 統制가 不可能한 變數이므로 장래 貯水池 運營計劃을 樹立하기 위해서 本 分析에서는 安東댐 地點의 과거 月平均 流入量<sup>17)</sup>을 使用하여 100年間 模擬發生(Simulation)시켜 장래 流入量으로 사용토록 하였다.

模擬發生 모델로서는, Model C<sup>18)</sup>(1st Markov Model)가 月水交量の 模擬發生에 있어서 잘 一致됨이 發見<sup>19)</sup>되었으므로 이 모델을 擇하여 模擬發生시켰다.

그 結果 Fig. 5에서 보는 바와 같이 記錄値와 模擬發生된 資料의 Correlogram이 매우 一致하고 있으며 또한 統計値에 依하여 比較해 보면, 表 1에서 알 수 있는 바와 같이 模擬發生된 月 流入量 資料의 統計値가 記錄値의 그것과 매우 一致하므로 分析에 있어서의 流入量으로 使用하였다. 이 模擬發生된 100年間의 流入量資料 中에서 그 信빙성을 고려하여 최초와 최후의 19年間의 資料는 除外하고, 20年째 資料에서부터 순서적으로 19年間씩을 系列(Series) A, B, C로 선정하여 各 系列別로 19年間의 模擬發生된 資料를 最適運營政策分析에 있어서의 貯水池 장래 流入量으로 擇하였다.

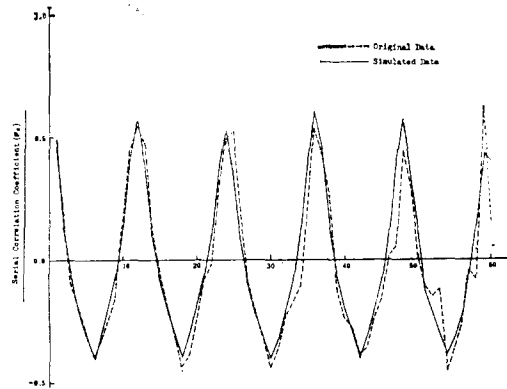


Fig. 5 Correlogram of Original & Simulated Data in Inflow.

#### 3.2 물 需要量

安東댐에서 供給될 用水는 本流연안에 限定된다. 支流의 流量은 河川연안의 물使用의 增加로 高갈될 것 이며, 이것은 結果的으로 本流의 流量을 減少시킬 것이다. 또 本流의 高갈된 流量은 現在로서는 安東댐에 依해서만 增加될 수 있을 것이다. 本流연안의 用水需要는 生活用水 및 工業用水뿐만 아니라 주로 河川양쪽

Table 1. Statics of Raw and Simulated Data

Menth	mean		Standard Deviation	
	Raw Data	Simulated Data	Raw Data	Simulated Data
Jan.	13.3	12.7	6.4	6.4
Feb.	13.6	13.6	6.9	6.5
Mar.	39.9	41.6	28.3	27.8
Apr.	88.2	83.9	62.7	53.8
May.	48.4	49.1	29.6	26.8
Jun.	104.1	110.7	92.8	85.7
Jul.	190.6	187.0	119.5	123.1
Aug.	205.4	196.3	82.8	78.7
Sep.	137.0	142.7	88.6	74.0
Oct.	23.3	23.7	13.4	12.5
Nov.	21.0	21.1	10.8	9.8
Dec.	23.4	25.5	18.4	16.5
Total Monthly	908.2	907.9	560.2	521.6

에 산재한 農耕地의 灌溉用水, 특히 河口에 있어서의 염수침입방지를 위한 河川維持用水도 물 需要量에 포함되어야 하는데, 洛東江 本流의 用水 需要量은 洛東江流域調查報告書의 推定值<sup>20)</sup>를 使用하기로 하였다. 本流의 장내 用途別 水 需要는 Fig. 6과 같다.

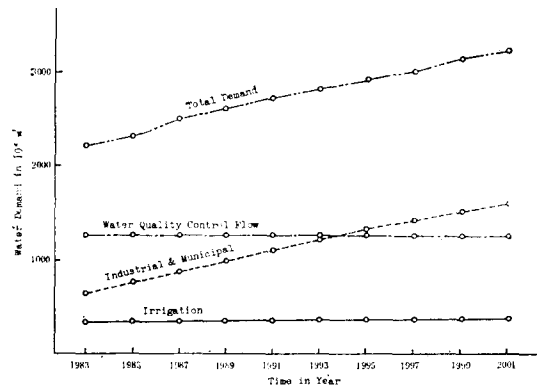


Fig. 6 Annual Water Demand in the Nakdong Main Stream

#### 3.3 貯水池의 運營曲線(Rule curves) 設定

貯水池 運營曲線(Rule curves)은 貯水池 容量(Reservoir capacity)과 供給水量(Yield)의 關係, 豫想流入量(Expected inflow)과 流域全體의 水 需要量 中에서 댐에 의하여 供給되어야 할 水 需要量 等 여러 變數들을 검토하여, 渇水條件下에서 用水供給을 充分하게 할 수 있도록 하기위하여 어떤 特定 時間에서 個個의 特定한 放流政策과 관련하여 貯水池 運營者가 維持하여야 하는 目標貯水量과 一致된다. 따라서, 貯水

池 運 營 曲 線 은 貯 水 池 運 營 의 指 針(Guideline)이 되는 가장 有 用 한 도 구 이 다.

一 般 의 으 로 運 營 曲 線 은 現 貯 水 量 과 豫 想 되 는 流 入 量 물 需 要 量 에 根 據 한 放 流 量 의 細 部 連 續 分 析(Detailed sequential analysis)에 의 하 여 設 定 된 다.<sup>21)</sup>

細 部 連 續 分 析 方 法 의 根 本 法 則 은 貯 水 池 의 連 續 方 程 式 이 다.

$$i - r = \Delta S \dots\dots\dots(11)$$

여 기 서,  $i$  = 特 定 期 間 의 流 入 量 ( $m^3$ )

$r$  = 特 定 期 間 의 放 流 量 ( $m^3$ )

$\Delta S$  = 貯 水 量 의 變 化 ( $m^3$ )

식(11)은 實 際 問 題 에 利 用 할 수 있 도 록 하 기 위 하 여 다 음 과 같 이 쓸 수 있 다.

$$\Delta S = S_t - S_{t-1} \dots\dots\dots(12)$$

여 기 서,  $\Delta S$  = 期 間  $t-1$  과  $t$  사 이 에 서 의 貯 水 量 의 變 化 ( $m^3$ )

$S_t$  = 期 間  $t$  에 서 의 貯 水 量 ( $m^3$ )

$S_{t-1}$  = 期 間  $t-1$  에 서 의 貯 水 量 ( $m^3$ )

식(12)를 식(11)에 代 入 하 면

$$S_t = S_{t-1} + i_t - r_t \dots\dots\dots(13)$$

이 細 部 連 續 分 析 方 法 은 식(13)을 어 떤 物 理 的 制 約 條 件 下 에 서 반 복 하 여 實 施 하 는 것 이 다.

**3.4 動 的 計 劃 모 델 의 適 用**

動 的 計 劃 모 델 은 適 用 하 여 安 東 댐 의 月 別 最 適 運 營 政 策(1983. 6~2001. 12)을 樹 立 함 에 이 어 서, 장 래 用 水 需 要 에 대 처 하 여 댐 의 內 的 制 約 條 件 內 에 서 用 水 供 給 을 最 大 로 할 수 있 는 運 營 政 策 을 樹 立 하 였 다.

댐 의 最 適 運 營 을 위 한 基 本 原 則 을 確 立 하 기 위 하 여 代 案 을 設 定 하 였 는 데, 즉 流 入 量 의 系 列 이 A, B, C 일 때 各 各 의 系 列 에 對 하 여 洛 東 江 本 流 에 의 존 하 는 물 需 要 量 中 에 서 安 東 댐 이 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%를 供 給 하 는 경 우 를 各 流 入 量 系 列 別 代 案 1~8로 設 定 한 후, 動 的 計 劃 모 델 을 適 用 하 여 最 適 分 析 을 하 였 다.

最 適 分 析 은 앞 3.3 節 에 서 設 定 된 各 代 案 別 貯 水 池 運 營 曲 線 에 根 據 한 目 標 貯 水 量(Objective storage)과 물 需 要 量 에 根 據 한 目 標 放 流 量(Objective sorage)에 가 장 근 접 한 代 案 을 選 定 하 여 最 適 運 營 政 策(Optimal-operation policy)으 로 擇 하 도 록 하 였 다.

즉, 各 月 의 日 標 貯 水 量 과 各 月 의 可 能 貯 水 量 의 平 方 偏 差 와 各 月 의 日 標 放 流 量 과 各 月 의 可 能 放 流 量 의 平 方 偏 差 와 의 合 이 最 小 가 되 는 貯 水 池 運 營 政 策 이 바 람 직 하 다 고 假 定 하 면

$$f_t^n(S_t) = Min[(S_G - S_t)^2 + (r_G - r_t)^2] \dots\dots\dots(14)$$

여 기 서,  $S_G$  = 各 月 의 日 標 貯 水 量

$S_t$  = 各 月 의 可 能 貯 水 量

$r_G$  = 各 月 의 日 標 放 流 量

$r_t$  = 各 月 의 可 能 放 流 量

과 같 이 되 고 위 의 식(14)는 식(5)와 같 은 目 的 函 數 가 된 다. 식(14)를 一 般 의 인 循 環 方 程 式(Recursive equation)의 形 態 로 表 示 하 면 다 음 式 과 같 다.

$$f_t^n(S_t) = Min[(S_G - S_t)^2 + (r_G - r_t)^2 + f_{t+1}^{n-1}(S_t + i_t - r_t)] \dots\dots\dots(15)$$

s.t.  $r_t \geq 0$

$r_t \leq S_t + i_t$

$S_{min} \leq S_t \leq S_{max}$

安 東 댐 의 總 貯 水 量 이  $1248 \times 10^6 m^3$  이 고 死 水 量 이  $248 \times 10^6 m^3$  이 므 로  $10^7 m^3$  을 1 unit 로 하 여 可 能 貯 水 量  $S_t$  를 25~125units 까 지 1 unit 씩 增 加 시 키 면 서 變 化 시 키 고, 各 月 의 可 能 放 流 量  $r_t$  도  $10^7 m^3$  을 1 unit 로 하 여 1~30unit 까 지 增 加 시 키 면 서 變 化 시 키, 各 段 階 마 다 식(15)의 循 環 方 程 式 에 의 하 여 日 標 貯 水 量 과 의 平 方 偏 差 와 日 標 放 流 量 과 의 平 方 偏 差 의 合 이 最 小 가 될 때 의 放 流 量 을 各 月 의 貯 水 量 25~125units 사 이 의 各 unit 에 서 의 最 適 放 流 量 으 로 決 定 하 였 다.

즉, 1983. 6~2001. 12 까 지 223 個 月 간 의 計 算 過 程 을 第 1 段 階 에 서 부 터 第 223 段 階 까 지 後 進 法(Backward-moving method)으 로 풀 면 다 음 과 같 다.

第 1 段 階 計 算 過 程(2001. 12)

$$f_{223}^1(S_{223}) = Min[(S_{G223} - S_t)^2 + (r_{G223} - r_t)^2] \dots\dots(16)$$

s.t.  $r_t \geq 0$

$r_t \leq S_t + i_t$

$S_{min} \leq S_t \leq S_{min}$

- (1)  $S_t = 25 \text{ units}$
- 1)  $r_t = 1 \text{ unit}, [(S_{G223} - 25)^2 + (r_{G223} - 1)^2]$
- 2)  $r_t = 2 \text{ units}, [(S_{G223} - 25)^2 + (r_{G223} - 2)^2]$
- 3)  $r_t = 3 \text{ units}, [(S_{G223} - 25)^2 + (r_{G223} - 3)^2]$
- ...
- 30)  $r_t = 30 \text{ units}, [(S_{G223} - 25)^2 + (r_{G223} - 30)^2]$
- (100)  $S_t = 125 \text{ units}$
- 1)  $r_t = 1 \text{ unit}, [(S_{G223} - 125)^2 + (r_{G223} - 1)^2]$
- 2)  $r_t = 2 \text{ units}, [(S_{G223} - 125)^2 + (r_{G223} - 2)^2]$
- 3)  $r_t = 3 \text{ units}, [(S_{G223} - 125)^2 + (r_{G223} - 3)^2]$
- ...
- 30)  $r_t = 30 \text{ units}, [(S_{G223} - 125)^2 + (r_{G223} - 30)^2]$

第 2 段 階 計 算 過 程(200. 11)

$$f_{222}^2(S_{222}) = Min[(S_{G222} - S_t)^2 + (r_{G222} - r_t)^2 +$$

s.t.  $r_t \geq 0$   $f_{223}^1(S_{222} + i_{222} - r_{222})] \dots\dots(17)$

$r_t \geq S_t + i_t$

$S_{min} \leq S_t \leq S_{max}$

$$(1) S_t = 25 \text{ units}$$

$$1) r_t = 1 \text{ unit}, [(S_{G222} - 25)^2 + (r_{G222} - 1)^2 + f_{223}^1(S_{222} + i_{222} - r_{222})]$$

$$\vdots$$

$$30) r_t = 30 \text{ units}, [(S_{G222} - 25)^2 + (r_{G222} - 30)^2 + f_{223}^1(S_{222} + i_{222} - r_{222})]$$

$$\vdots$$

$$(100) S_t = 125 \text{ units}$$

$$1) r_t = 1 \text{ unit}, [(S_{G222} - 125)^2 + (r_{G222} - 1)^2 + f_{223}^1(S_{222} + i_{222} - r_{222})]$$

$$\vdots$$

$$30) r_t = 30 \text{ unit}, [(S_{G222} - 125)^2 + (r_{G222} - 30)^2 + f_{223}^1(S_{222} + i_{222} - r_{222})]$$

第223段階 計算過程(983. 6)

$$f_{23}^2(S_1) \text{Min} [(S_{G1} - S_t)^2 + (r_{G1} - r_t)^2 + f_{22}^2(S_1 + i_1 - r_1)] \dots (18)$$

s.t.  $r_t \geq 0$   
 $r_t \leq S_t + i_t$   
 $S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$

$$(1) S_t = 25 \text{ units}$$

$$1) r_t = 1 \text{ units}, [(S_{G1} - 25)^2 + (r_{G1} - 1)^2 + f_2^{222}(S_1 + r_1)]$$

$$\vdots$$

$$30) r_t = 30 \text{ units}, [(S_{G1} - 25)^2 + (r_{G1} - 30)^2 + f_2^{222}(S_1 + i_1 - r_1)]$$

$$\vdots$$

$$(100) S_t = 125 \text{ units}$$

$$1) r_t = 1 \text{ unit}, [(S_{G1} - 25)^2 + (r_{G1} - 1)^2 + f_2^{222}(S_1 + i_1 - r_1)]$$

$$\vdots$$

$$30) r_t = 30 \text{ units}, [(S_{G1} - 125)^2 + (r_{G1} - 30)^2 + f_2^{222}(S_1 + i_1 - r_1)]$$

以上과 같이 第1段階에서부터 第223段階까지의 計算過程이 끝나면, 初期貯水量  $S_1$ 을 다시 第223段階에서 式(6)의 貯水池 連續方程式에 代入하여 第1段階까지  $r_t \geq 0, r_t \leq S_t + i_t, S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$  라는 制約條件下에서 前進法(Forward-moving method)으로 連續하여 풀면, 各 段階에서의 最適放流量이 決定된다.

즉, 第223段階에서는

$$S_2 = S_1 + i_2 - r_1 \dots (19)$$

여기서,  $S_2$ =第223段階의 最終貯水量

$S_1$ =第223段階의 初期貯水量

$i_1$ =第223段階의 流入量

$r_1$ =第223段階의 初期貯水量이  $S_1$ 일 때 最適放流量

이 되고 連續하여 第1段階까지 計算을 하면 다음과 같다.

$$S_{223} = S_{222} + i_{222} - r_{222} \dots (20)$$

이와 같은 動的計劃法에 의한 最適化의 컴퓨터 計算過程은 다음 Fig. 7의 Flow Chart와 같다.

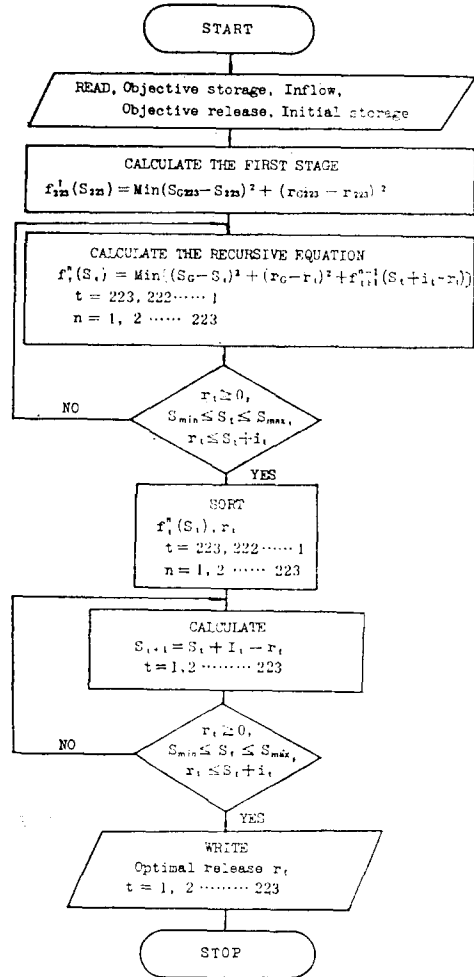


Fig. 7 Flow Chart

### 3.5 結果의 考察

設定된 流入量 系列 A, B, C 各各에 對한 代案 1~8을 各 月別로 動的計劃模型을 適用하여 最適分析을 해 본 結果, 表 2에서 보는 과와같이, 流入量系列이 A인 경우에서는 用水供給의 側面에서 代案 1(30% 供給)은 1996년까지 本流 總用水需要量의 30% 供給이 可能하

Table 2. Results of each Alternative (Inflow series A)

Unit: 10<sup>5</sup>m<sup>3</sup>

Year	Alternative 1		Alternative 2		Alternative 3		Alternative 4		Alternative 5		Alternative 6		Alternative 7		Alternative 8	
	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release
1983	423	430	564	570	705	550	846	610	987	620	1128	620	1128	620	1269	630
1984	684	880	912	920	1140	830	1367	810	1595	890	1823	1050	2051	1190	2279	1260
1985	702	930	936	1000	1170	1040	1404	1150	1638	1280	1872	1250	2106	1150	2340	1100
1986	741	1120	988	1140	1235	1120	1482	1120	1729	1120	1976	1140	2223	1050	2470	1150
1987	754	1120	1005	1140	1257	1160	1508	1200	1759	1210	2010	1200	2262	1180	2513	1180
1988	772	970	1030	1040	1287	1110	1544	1130	1802	870	2059	820	2317	780	2574	770
1989	783	1030	1044	970	1306	900	1567	900	1828	970	2089	990	2350	1000	2611	1000
1990	799	1140	1065	1150	1332	1040	1598	990	1864	1120	2130	1340	2397	1410	2663	1430
1991	823	980	1097	1090	1371	1270	1645	1310	1919	1170	2194	940	2468	860	2742	830
1992	835	880	1113	890	1391	920	1669	860	1947	860	2226	850	2504	860	2782	860
1993	851	870	1134	820	1418	800	1701	770	1985	760	2268	700	2552	750	2835	750
1994	865	890	1154	900	1442	750	1730	680	2019	670	2307	730	2596	670	2884	670
1995	884	1060	1178	1080	1473	1020	1767	1030	2062	1210	2356	1460	2651	1560	2945	1570
1996	898	970	1197	1110	1497	1190	1796	1180	2095	1000	2364	650	2694	650	2693	610
1997	917	780	1222	720	1528	700	1833	710	2139	690	3444	700	2750	690	3055	700
1998	933	740	1244	770	1555	840	1866	870	2177	880	2488	820	2799	880	3110	880
1999	945	830	1260	800	1576	700	1891	670	2206	650	2521	500	2836	660	3151	660
2000	960	690	1280	730	1600	720	1919	720	2239	730	2560	760	2879	670	3199	730
2001	974	910	1299	970	1624	1010	1948	990	2273	980	2598	980	2922	1030	3247	1160

고, 代案 2 (40% 供給)는 1988년까지 本流 總用水需要量の 40% 供給이 可能하며, 代案 3~8(50%~100% 供給)은 安東댐만으로서는 供給能力이 미치지 못함을 알 수 있다.

먼저, 1966년까지 本流 總用水需要量の 30% 供給이 可能的 代案 1은 Fig. 8(a), (b)에서 보는 바와 같이, 灌溉期인 5~8월에도 充分하게 30% 供給이 될 수 있는데, 1997년에서 부터는 全期間에 걸쳐 물 不足이 일어나서 特히, 尖頭 물 不足은 주로 移秧期인 6월에 발생한다.

累積貯水量(Accumulated storage)도 1996년까지는 目標貯水量에 近接하고 있으나, 1997年以後에는 目標貯水量에 미치지 못함을 알 수 있으며, 特히 灌溉期인 5~8월에는 低水量을 維持한다.

1988년까지 本流 總用水需要量の 40% 供給이 可能的 代案 2는 Fig. 9 (a), (b)에서 보는 바와 같이 1989年에서 부터는 尖頭 물 需要期인 6월에 물 不足이 일어나기 시작하여 1991年 6月에서 부터는 全期間에 걸쳐서 물 不足이 發生한다.

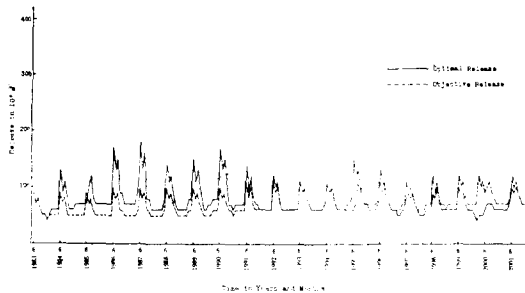


Fig. 8(a) Objective Release and Optimal Release in Case of 30% Supply (Inflow series A)

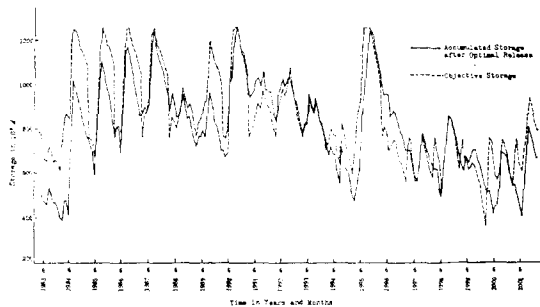


Fig. 8(b) Objective Storage and Accumulated Storage in Case of 30% Supply (Inflow series A)

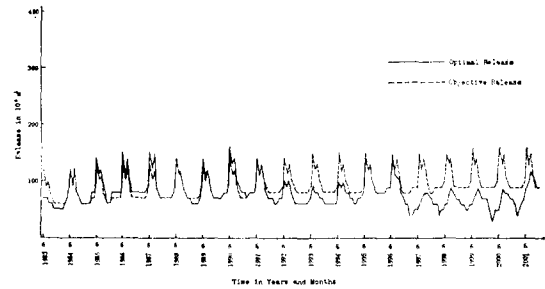


Fig. 9(a) Objective Release and Optimal Release in Case of 40% Supply (Inflow series A)

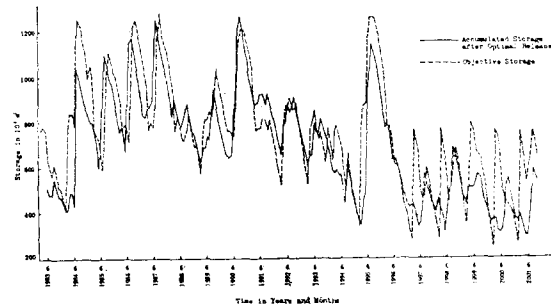


Fig. 9(b) Objective Storage and Accumulated Storage in Case of 40% Supply (Inflow series A)

流入量系列이 B인 경우에는 表 3에서 보는 바와 같이, 用水供給의 側面에서 代案 1 (30% 供給)은 1999년까지 本流 總用水需要量の 30% 供給이 可能하고, 代案 2~8(40~100% 供給)은 安東댐만으로서는 供給能力이 미치지 못함을 알 수 있다.

먼저, 代案 1 (30% 供給)은 Fig. 10 (a), (b)에서 보는 바와 같이, 1999년까지는 全期間에 걸쳐 總用水需要量の 30% 供給이 可能하고 累積貯水量도 目標貯水量에 상당히 近接함을 알 수 있다. 그런데, 2000年에서 부터는 주로 灌溉期인 5~8월에 물 不足이 일어나서 用水需要量を 充足시키지 못함을 알 수 있다.

流入量系列이 C인 경우에는 表 4에서 보는 바와 같이, 用水供給의 側面에서 代案 1 (30% 供給)은 1991년까지 本流 總用水需要量の 30% 供給이 可能하고, 代案 2~8(40%~100% 供給)은 安東댐만으로는 供給能力이 미치지 못함을 알 수 있다.



Table 3. Results of Each Alternative (Inflow series B)

Year	Alternative 1		Alternative 2		Alternative 3		Alternative 4		Alternative 5		Alternative 6		Alternative 7		Alternative 8	
	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release
1983	423	530	564	560	705	690	846	690	987	680	1128	1030	1128	1130	1269	1190
1984	684	860	910	900	1140	900	1367	1090	1595	1080	1823	1030	2051	900	2279	850
1985	702	860	936	910	1170	820	1404	910	1638	1220	1872	790	2106	820	2340	820
1986	741	960	988	930	1235	990	1482	910	1729	750	1976	1080	2223	1080	2470	1090
1987	754	980	1005	1000	1257	1090	1508	1060	1759	780	2010	1000	2262	1000	2513	990
1988	772	920	1030	970	1287	1050	1544	1050	1802	1160	2059	830	2317	830	2574	820
1989	783	890	1044	870	1306	830	1567	830	1828	720	2089	860	2350	860	2611	860
1990	799	860	1065	870	1332	890	1598	770	1864	1240	2130	740	2397	740	2663	740
1991	823	950	1097	890	1371	780	1645	860	1919	580	2194	1170	2468	1190	2742	1210
1992	835	1010	1113	1040	1391	1140	1669	1240	1947	720	2226	980	2504	950	2782	940
1993	851	1040	1134	1070	1418	990	1701	970	1985	630	2268	1080	2552	1100	2835	1100
1994	865	990	1154	1080	1442	1160	1730	1070	2019	890	2307	910	2596	890	2884	890
1995	884	920	1178	830	1473	880	1767	840	2062	870	2356	830	2651	830	2945	820
1996	898	910	1197	890	1497	810	1796	740	2095	780	2394	720	2694	740	2993	740
1997	917	1060	1222	900	1528	890	1833	940	2139	530	2444	1330	2750	1330	3055	1350
1998	923	1220	1244	1250	1555	1340	1866	1540	2177	960	2488	1380	2799	1370	3110	1670
1999	945	1070	1260	1170	1576	1270	1891	1070	2206	1110	2521	830	2836	840	3151	830
2000	960	940	1280	960	1600	910	1919	950	2239	790	2560	920	2879	980	3199	970
2001	974	1000	1299	1150	1624	1210	1948	1270	2273	750	2598	1200	2922	1200	3247	1200

Unit: 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>

Table 4. Results of Each Alternative (Inflow series C)

Unit:  $10^6\text{m}^3$ 

Year	Alternative 1		Alternative 2		Alternative 3		Alternative 4		Alternative 5		Alternative 6		Alternative 7		Alternative 8	
	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release	Objective Release	Optimal Release
1983	423	480	564	490	705	580	846	640	987	910	1128	990	1128	1000	1269	1020
1984	684	860	910	870	1140	880	1367	930	1595	950	1823	830	2051	820	2279	810
1985	702	910	936	980	1170	920	1404	910	1638	890	1872	1030	2106	1150	2340	1210
1986	741	940	988	1020	1235	1060	1482	1200	1720	1180	1976	1020	2223	900	2470	840
1987	754	890	1005	860	1257	990	1508	770	1759	710	2010	710	2262	700	2513	700
1988	772	940	1030	860	1287	800	1544	850	1802	1030	2059	1090	2317	1110	2574	1110
1989	783	930	1044	960	1306	1010	1567	960	1828	810	2089	730	2350	720	2611	690
1990	799	880	1065	1050	1332	880	1598	710	1864	1050	2130	1180	2397	1230	2663	1250
1991	823	930	1097	1180	1371	1150	1645	1080	1919	880	2194	740	2468	710	2742	990
1992	835	750	1113	520	1381	650	1669	630	1947	630	2226	620	2504	620	2782	620
1993	851	710	1134	600	1418	650	1701	650	1985	640	2268	650	2552	650	2835	650
1994	865	740	1154	690	1442	780	1730	830	2019	850	2307	850	2596	850	2884	850
1995	884	790	1178	780	1373	800	1767	860	2062	870	2356	870	2651	870	2945	870
1996	898	820	1197	890	1497	880	1796	780	2095	760	2394	750	2694	750	2993	760
1997	917	750	1222	730	1528	640	1833	620	2139	610	2444	620	2750	620	3055	620
1998	933	770	1244	710	1555	810	1866	910	2177	930	2488	950	2799	920	3110	930
1999	945	960	1260	980	1576	990	1891	1040	2206	1060	2521	1060	2836	1070	3151	1060
2000	960	960	1280	1040	1600	970	1919	830	2239	800	2560	790	2879	790	3199	790
2001	974	920	1229	950	1624	780	1948	750	2273	740	2598	740	2922	740	3247	740

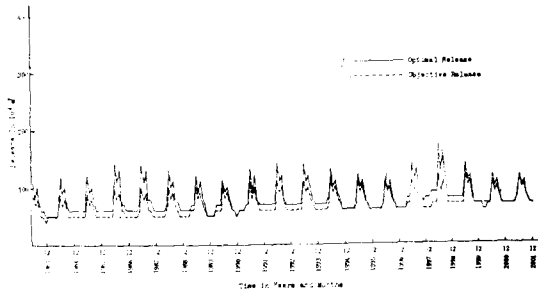


Fig. 10(a) Objective Release and Optimal Release in Case of 30% Supply (Inflow series B)

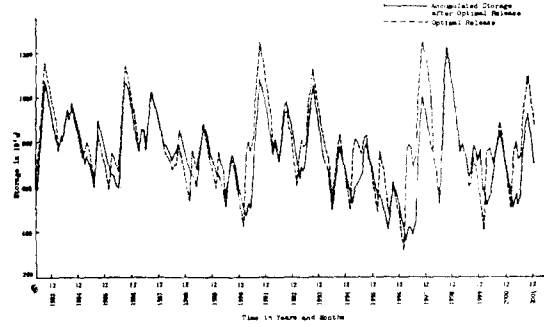


Fig. 11(b) Objective Storage and Accumulated Storage in Case 40% Supply (Inflow series B)

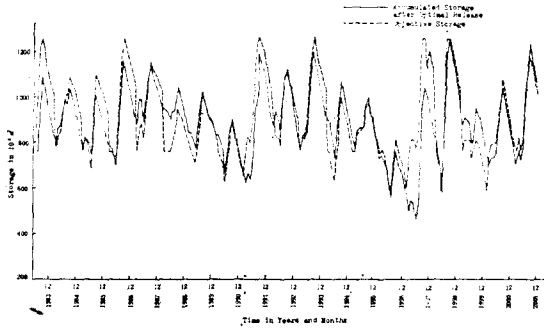


Fig. 10(b) Objective Storage and Accumulated Storage in Case of 30% Supply (Inflow series B)

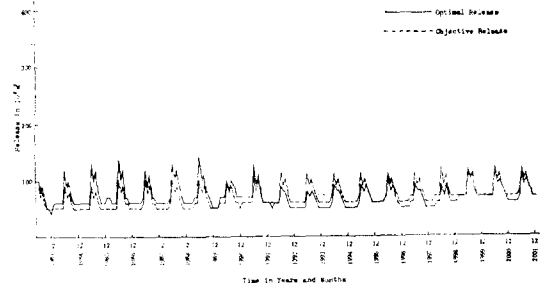


Fig. 12(a) Objective Release and Optimal Release in Case of 30% Supply (Inflow series C)

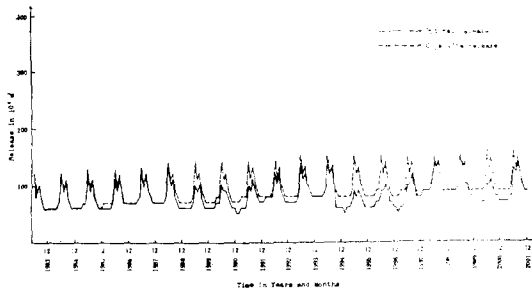


Fig. 11(a) Objective Release and Optimal Release in Case of 40% Supply (Inflow series B)

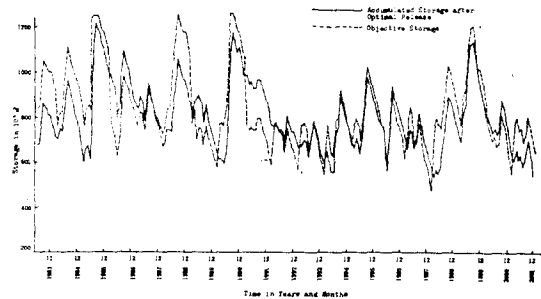


Fig. 12(b) Objective Storage and Accumulated Storage in Case of 30% Supply (Inflow series C)

먼저, 1991년까지 本流 總用水需要量の 30% 供給이 가능한 代案 1은 Fig. (a), (b)에서 보는 바와 같이 1992년에서 부터는 全期間에 걸쳐 물 不足이 일어나며 特히 灌溉期인 5~8月에는 물 不足이 극심하게 발생한다.

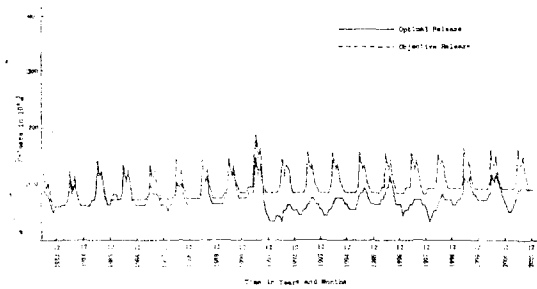


Fig. 13(a) Objective Release and Optimal Release in Case of 40% Supply(Inflow series C)

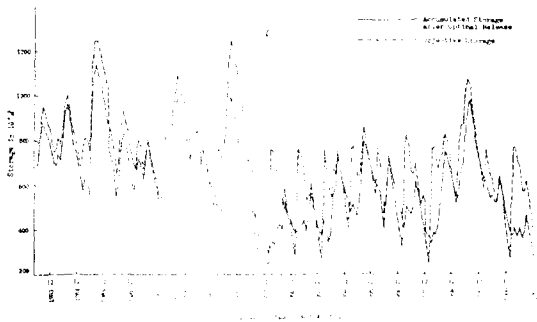


Fig. 13(b) Objective Storage and Accumulated Storage in Case of 40% Supply (Inflow series C)

以上에서 살펴본 바와 같이 模擬發生된 流入量의 系列 A, B, C를 各各 入力資料로 使用하여 貯水池 最適 運營政策을 樹立해본 結果, 流入量의 系列에 따라서 各 代案別 貯水池 運營政策이 다소 달라짐을 알 수 있다. 즉, 代案 1에 의한 本流 總用水需要量의 30% 供給은 流入量 系列이 A인 경우에서는 1996년까지, 流入量 系列이 B인 경우에서는 1999년까지, 流入量 系列이 C인 경우에 있어서는 1991년까지 充足될 수 있는 것으로 나타났다.

代案 2에 의한 本流 總用水需要量의 40% 供給은 流入量 系列이 A인 경우에서는 1988년까지 充足될 수 있고, 流入量 系列이 B, C인 경우에 있어서는 安東댐 만으로서는 供給能力이 미치지 못함을 알 수 있다.

또, 代案 3~8은 各 流入量 系列에 상관 없이 安東댐 만으로서는 本流 總用水需要量의 50~100%를 供給할 수 없는 것으로 나타났다.

그러나, 各 流入量 系列이 共通의으로 本流 總用水 需要量의 30%는 1991년까지 安定的으로 供給할 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 結 論

지금까지 分析한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 動的計劃法은 貯水池시스템과 같은 動的 시스템의 舉動을 分析하고 最適運營政策을 樹立하는데 효율성이 상당히 큼을 알 수 있다. 즉, 장래의 시스템變化를 豫測하여 設定된 시스템運營目標과 比較하고, 필요시 시스템의 주어진 制約條件內에서 運營目標을 수정하여 運營하므로써 運營目標과 가장 近接하는 運營政策을 樹立하는데 効果적인 方法이므로, 本 研究에서 開發된 DP 모델은 기존법이나 計劃법에 있어서 堰下流의 多目的 用水需要를 最大로 充足시킬 수 있는 月別 貯水池 最適運營政策을 樹立하는데 使用될 수 있다.

2. 貯水池 流入量은 統制가 不可能한 推計學的 變數이므로 模擬發生시킨 流入量을 貯水池 運營의 入力資料로 使用할 수 있는 適用性을 檢討해본 結果, 模擬發生된 流入量의 各 系列에 따라서 貯水池 運營政策이 變化하므로 그 靈敏성을 고려하여 보다 合理的인 流入量 系列을 入力資料로 使用함이 바람직함을 알 수 있다.

3. 流入量 系列이 상이할 때도 거의 비슷한 結果를 보여 주었으나, 일반적으로 代案 3~9(50~100% 供給)은 各 流入量 系列에 관계없이 安東댐만으로는 本流 總用水需要量의 50~100%를 供給할 수 없는 것으로 나타났으며, 各 流入量 系列이 共通의으로 本流 用水需要量의 30%는 1991년까지 安定的으로 供給할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 1991년까지 30%를 安定的으로 供給할 수 있는 流入量 系列C의 代案 1이 最適運營政策임을 알 수 있으나, 한편 本流 總用水需要量의 100%에 가까운 供給을 위해서는 陝川댐, 臨河댐 및 河口堰이 조속히 完工되어서 多目的 貯水池群의 統合의 시스템運營 및 流域管理가 切實히 要望됨을 알 수 있다.

### 參 考 文 獻

- 1) W.A. Hall and N. Buras; *The Dynamic Programming Approach to Water Resources Development*, J. Geophysical Research, 66, No. 2, 1969, pp.517-529.
- 2) Hiller and Lieberman: *Introduction to Operations Research*, Holden-day, Inc, pp.248-279,

- 1974.
3. R. Bellman; *Dynamic Programming*, Princeton University Press, 1957.
  4. R. Bellman; *Adaptive Control Process*, Princeton University Press, 1961.
  5. R. Bellman and S. Dreyfus; *Applied Dynamic Programming*, Princeton University Press, 1962.
  6. W.A. H2ll; *Optimum Design of Multiple-Purpose Reservoir*, J. Hydraulics Div., ASCE, 90, No. Hy4, 1964, pp.141-149.
  7. G.K. Young. Jr; *Finding Reservoir Operation Rules*, J. Hydraulics Div., ASCE, 93, No. Hy6, November 1967, pp. 297-321.
  8. W.A. Hall, W.S. Butcher, and A. Esagbue; *Optimization of the Operation of a Multi-Purpose Reservoir by Dynamic Programming*, Water Resources Research, 4, No. 3, 1968, pp. 471-477.
  9. M. Heidari et al.; *Discrete Differential Dynamic Programming Approach to Water Resources Systems Optimization*, Water Resources Research, 7, No. 2, April 1971, pp. 273-282.
  10. D.M. Fults and L.F. Hancock; *Optimum Operation Model for Shasta-Trinity System*, J. Hydraulics Division, ASCE, 98, No. Hy9, September 1972, pp. 1497-1514.
  11. D.D. Meredith; *Optimal Operation of Multiple Reservoir System*, J. Hydraulics Division, ASCE, 101, No. Hy2, February 1975, pp. 299-312.
  12. K.P. Singh; *Optimal Operation of Shelbyville and Carlyle Lakes*, Water Resources Bulletin, AWRA, 14, No. 5, October 1978, pp. 1201-1219.
  13. S.Y. Su and R.A. Deininger; *Modeling the Regulation of Lake Superior Under Uncertainty of Future Water Supplies*, Water Resources Research, 10, No. 1, February 1974, pp. 11-25.
  14. 權五憲·成世鎭; 北漢江流域 峇群의 最適運營을 위한 시스템모델의 開發, 大韓土木學會論文集, 第 28 卷 4 號, 1980. 8.
  15. 梁興錫·朴永文; “漢江系 水力の 効果의 多目的運營에 關한 研究” 韓電/서울大學校 應用科學研究所, 1975.
  16. McBean, E.A., and R.L. Lenton, G.J. Vicens, and J.C. Schaaake, Jr., A General Purpose Simulation Model for Analysis of Surface Water Allocation Using Time Increments, Report No. 160, Ralph M. Parsons Laboratory, M.I.T., Cambridge, Mass., November 1972.
  17. 產業基地開發公社 統計年報; 1976-1982, 建設部 產業基地開發公社.
  18. 李舜鐸; 常流川 月流量의 推計學的 模擬發生모델, 大韓土木學會誌, 第 23 卷 4 號.
  19. 李舜鐸·安慶洙·李義洛; Simulation technique에 依한 水資源의 變動樣相 및 그 模擬發生모델에 關한 研究, 韓國水文學會誌, 第 9 卷 2 號, 1976.12.
  20. 洛東江流域調查報告書, 建設部, 1974.12.
  21. U.S. Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development, Vol. 8, The Hydrologic Engineering Center, Davis, California, 1976, pp. 6.01-7.07.