

貯水池 운영방안의 方法論的인 概括

金 勝 權*

要 約

저수지 운영방안을 水資源의 安定供給(利水)을 위한 운영방안과 洪水調節(治水)을 위한 운영방안 그리고 實時間 저수지 운영방안 등으로 분류하였다. 最適運營을 위한 연구논문의 數와 種類가 실로 방대하므로 個別的인 열거보다는 方法論적 측면에서 概括을 하였다.

序 論

水資源의 효율적 利用 및 管理를 위하여 우리는 여러곳에 댐을 건설하여 운영한다. 댐 건설로 이루어진 저수지의 물을 효과적으로 이용한다는 것은 시스템의 관점에서 보면 確保된 수자원을 댐 건설의 목적에 따라 時間 및 空間別로 적절하게 割當시키는 것이라 할 수 있다. 저수지를 효율적으로 운영하는 방안을 구하고자 하는 노력은 1950年代 後半의 수자원 시스템 공학의 발전 초기로부터 끊임없이 계속되어 왔다(Little, 1955; Young, 1967; Wang et. al. 1986). 물론 이와같은 노력은 최근의 Microprocessor 기술의 급격한 發展으로 저렴한 가격으로 Computer 기억 처리용량의 증설이 가능케 되었고 그에 따른 分散處理시스템(distributed and parallel processing), 종합시스템 모델링과 영상 처리를 이용한 interactive 모델링(Johnson, 1986) 등이 쉽게 이루어지게 됨에 힘입어 더욱 가속화되고 있다. 더우기 최근에는 인공지능(Artificial Intelengence)을 이용한 전문가 시스템(Expert System)을 활용하고자 하는 시도가 활발해지고 있다. 그러나 아직 지식기반 전문가 시스템(Knowledge Based Expert System)도 극

복해야 할 여러가지 제약요인들이 있으므로 결국은 시스템 분석적인 방법의 활용이 함께 고려되어야 할 것이다. 이 모든 변화와 시도의 궁극적인 목표는 Computer를 사용하여 意思決定에 도움을 받아 적절한 해답을 이용하기 쉽게 얻어 내는데 있다. 따라서 효율적인 貯水池 運營方案에 대한 方法論적인 연구는 Computer를 이용한 實質應用 具現(computer implementation)과 더불어 함께 병행하여 추진 발전되어야 하여 그것이 현 추세라 할 수 있다.

본 논문에서는 저수지 운영방안에 대한 현재까지의 모든 연구를 일일이 열거하여 처리하기에는 그 종류와 수가 너무 방대하므로 몇가지술 중요한 연구결과들을 중심으로 概括的으로 서의 하고자 한다. 저수지 운영방안을 포함한 수자원 계획 문제들의 알고리즘에 따른 문헌적 고찰¹⁾ Yeh(1985)의 논문을 참조하기 바란다.

저수지의 最適運營을 위한 方法論的인 分類

저수지 운영의 궁극적인 목표는 댐을 건설의 목적에 따라 저수된 물을 매시간 流入量과 貯水量을 감안하여 적절한 放流를 행하는 것이다. 적절한 방류를 행한다는 의미는 수자원 管理시스템의 관점에서 선정된 評價基準에 가장 적합

* 本 學會 正會員 高麗大學校 工科大學 産業工學科 副教授(工博)

한 방류량을 방류시키는 것인데, 평가기준을 어떻게 정하는가에 따라 최적운영 방안이 달라진다.

댐의 건설은 대체로 한가지 이상의 목적을 달성하기 위하여 건설되는데, 대개 用水供給(관개용수, 도시용수, 공업용수 등), 水力發電用水, 水運, 水質保全, 生態系保護, 娛樂 및 休息空間의 確保, 그리고 洪水調節 등이다.

따라서 대개의 大型댐은 근본적으로는 多目的의 댐으로서 저수지 운영방안도 多目的의 운영되어야 한다. 그런데 상술한 각 목적들을 자세히 살펴보면, 저수지 운영방안은 크게 두가지로 대별하므로써 모든 목적들을 收容할 수 있다. 하나는 용수공급(用水供給=利水)을 위한 방안이고 다른 하나는 홍수조절(洪水調節=治水)을 위한 운영방안이다. 용수공급을 위한 운영방안은 다시 供給率 模型(Yield Model)으로 대표되는 설계변수(예: 유효저수량이나 홍수조절 용량)들의 결정을 위한 방안과 기존 저수지로부터의 用水의 안정공급을 위한 中長期 운영방안으로 분류할 수 있다. 그런데 前者는 일종의 逆 저수지 계획문제(inverse reservoir planning problem)로서(Mariño et. al., 1981) 계획단계에서의 先驗的(tantative)인 운영방안에 해당될 뿐, 진정한 의미의 댐 운영방안이라고 볼 수 없다. 따라서 용수자원 공급측면의 운영방안을 중심으로 서술하고자 한다. 홍수조절을 위한 운영방안은 수자원의 節約-供給과는 相馳되는 목적을 가지므로 별도로 취급한다. 또한 저수지 운영방안을 분석 기간에 따라 분류하면 중장기 운영방안과 단기 운영방안으로 구분할 수 있는데 용수의 안정공급방안은 대개 中長期 운영방안을 중심으로 서술하고 短期 운영방안에 해당하는 實時間 저수지 운영(real-time reservoir operation)은 전술적 운영방안으로써 Computer 모델의 실질적 응용을 강조한 분야이므로 따로 정리해 보고자 한다.

分析 期間에 따른 저수지 운영방안

저수지 운영의 基本方向을 규정하는 것은 저

수지 運營分析 單位期間이다. 저수지 운영문제는 順次的인 의사결정문제(sequential decision process)이므로 저수지 운영분석을 위한 단위기간을 어떻게 정하는가에 따라 저수지 유입량 자료선택이 달라지며 그에 따른 저수지 운영방안도 달라진다.

저수지 운영방안은 크게 中長期 운영방안과 短期 운영방안으로 나눌 수 있다. 中長期 운영방안은 月別 流量을 기준으로 운영지침을 정한다. 月別 流入量 거동의 연중변화 형태는 내락季節에 따라 예측이 가능하므로 渴水期에는 水資源의 確保(water conservation)를 주요 목표로 하고 洪水期에는 유효 홍수조절용 공간의 확보를 우선으로 하는 戰略的인 운영방안을 설정한다. 短期 운영방안은 주로 流入量의 예측이 충분히 가능한 日流量 또는 時間別 流量과 같은 단위기간을 기준으로 한다. 그러나 이는 中長期 운영방안의 單位 時間當의 축소된 모델이 아니라 中長期 운영방안으로 설정된 기준을 쫓는 계층적(hierarchical) 운영방안으로서 실제 운영할 때 발생하는 不確實性, 예를들면 流入量이나 제도적 환경적 제약으로 인한 예기치 못한 放流計劃의 변동 등을 감안할 수 있어야 한다. 따라서 水質保全을 위한 최소방류(low flow augmentation)와 같은 댐 건설의 기본목적을 충족시키는 물론 水力發電이나 공업 및 도시용수와 같은 契約放流를 효과적으로 수행하여 댐 건설에 소요된 初期 投資費의 回收를 용이하게 해주는 운영방안이어야 한다. 수자원 관리를 위한 中長期의 戰略的인 計劃단계에서 필요한 운영방안이 아니라면, 短期운영방안은 주로 댐群의 戰術的인 實時間 저수지 운영방안(real-time reservoir operation)임을 암시한다. 단기 운영방안이 전술적인 운영방안이므로 홍수기에는 자연히 治水(洪水調節)를 위한 최적 운영을 뜻하며 渴水期에는 利水가 운영 목표가 된다. 변환기에는 물론 利水와 治水의 두가지 운영 목표가 동시에 고려되어야 하며 경우에 따라서는 두가지의 相反된 운영 목표사이의 타협과 조정이 이루어져야 한다.

水資源의 안정공급을 위한 운영방안(Water

conservation operation)

수자원의 안정적 공급을 위한 저수지의 운영은 저수지로부터의 손실과 초과방류(spill)를 최소화 하므로써 목표량의 安定的 공급을 이루는 것이다.

저수지 운영의 基本原則은(그림 1) 매 시점마다 可用貯溜量과 수요량 또는 방류 목표량을 비교하여 가능하면 수요량을 충족시키고 남은 양을 貯溜시키며 저수용량을 초과하는 양은 초과방류(spill)시키는 單純한 것이다(Fiering, 1967). 이때 可用량은 유입량에 기간초 有効貯水量을 합한 양이 될 것이며 수요량은 목표 공급량(target release)이 된다.

그러나 이러한 방안은 최적화 이전의 기본원칙으로서 설계를 위한 有効저수량 산정에 도움을 줄 수는 있지만 자원의 最適管理를 위한 운영방안은 못된다.

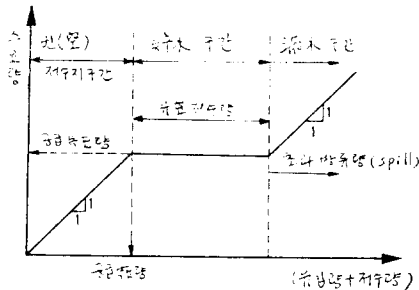


그림 1. 저수지 표준 운영방안(Fiering, 1967).

댐을 설계할 때 有効저수량(useful storage or active storage)을 결정하는 과정에서 Ripple의 累加容量曲線(mass curve)이나, Sequent Peak Procedure 등을 이용하여 보장공급율(safe yield)을 선정 또는 추정하기도 하지만, 댐 건설 이후에도 추정된 보장공급율로 용수공급이 가능하리라는 보장은 없다. 왜냐하면, 周知하는 바와 같이 Ripple의 累加容量曲線에 의한 방법이나 Sequent Peak Procedure의 正當性은 그 방법이 기초로 한 어떤 특정 발생순서를 갖는 선정된 유입량 자료에 대하여만 인정되기 때문이다. 다시 말하면, 그와 똑같은 유입량이 댐을 건설한 이후에도 계속적으로 나타나리라는 기대는 할 수 없기 때문이다. 물론 Ripple의 방법에 의하지 않고 線型計劃과 같은 최적화 기법을 이용하여

貯溜量—供給率 사이의 상관관계를 구하기도 한다. 그리고 공급율을 결정할 때 공급의 信賴度를 함께 고려하여 貯溜量—供給率 사이의 관계를 나타내는데 Mariño와 Loaiciga(1985, a. b., 1986) 등은 信賴性計劃法(Reliability Programming)을 이용하여 고려한 바가 있으나 아직 이의 효율성에 대하여는 학자들간의 논란의 대상으로 남아있다(Strycharczyk et. al., 1987; Simonovic, 1987) 이상과 같은 모형들은 總稱 공급율 모형(yield model)이라 하며, 공급율 모형에서는 Fiering의 저수지 운영 基本原則에 따라 운영되는 것으로 간주된다.

댐건설 이후의 저수지 운영은 有効貯水量이 이미 확정적으로 주어진 경우이므로 댐건설 목적을 가장 잘 反映시킬 수 있는 방안이어야 한다. 그런데 저수지로의 유입량은 장기적으로 豫測 가능한 양이 아니며 불확실한 것이다. 다만 우리는 각 유입량들이 어떤 특정한 통계적인 確率分布를 가지고, 매년 그 확률적 특성을 따라 발생할지 모른다는 가정을 할 수는 있다. 따라서 바람직한 저수지 운영방안을 선정할 때 이같은 확률적 특성을 감안하여 구하는 것이 신빙성이 있다고 생각되는 것이다. 다시 말하면, 시스템 분석의 측면에서 볼 때 저수지로의 유입량은 각각 어떤 확률분포를 가진 확률변수(random variable)이다. 따라서 그에 따른 저수량 및 방류량도 확률변수이다. 그러므로 이와 같은 사실을 반영시켜 최적 저수지 운영방안을 구하는 방법으로 Howard(1960)가 제시한 value iteration과 policy iteration을 이용한 推計學的 動的計劃法(Stochastic Dynamic Programming)을 생각할 수 있다. 이 모형은 저수지로의 流入量이 일년을 週期로 갖는 週期的인 Markov 과정을 따르고 바로 前期間, t 동안 유입량이 i 일 때 다음 번 기간($t+1$)의 유입량이 j 가 될 확률 P_{ij} 를 구할 수 있다는 가정으로부터 출발한다. 그리고 오직 초기 저류량과 현 시점에서의 유입량에 대한 함수로서 최적 저수지 운영방안을 구하기 위하여 시스템의 期待效果를 최대로 하는 목적함수를 적절한 순환방정식으로 표시한다(Gablinger et. al, 1970). 저류량과 유입량으로 표시되는

상태변수를 각각 k, l , 과 i, j 로 이산화시켜 고려할 때 모든 k, i 에 대하여

$$f_t(S_k, I_i) = \text{Min}_{l \in P_i} \{ B_{k,i,l,t} + \sum_i P_{ij}^t f_{t+1}(S_l, I_j) \}, \forall S_k, I_i \dots \dots \dots (1)$$

$$f_1(S_k, I_i) = \text{Min}_{l \in P_i} \{ B_{k,i,l,t} \}, \forall S_k, I_i \dots \dots \dots (2)$$

의 후향(backward) 순환방정식으로 표시되며 여기서 $B_{k,i,l,t}$ 는 시스템이 적절히 운영되는 것을 평가할 수 있는 評價價로서 일반적으로 목표저류량이나 방류량으로부터의 差異의 제곱으로 나타낸다. 따라서 최적함수값 $f_t(S_k, I_i)$ 은 목표량과의 차이의 제곱의 총 최소 기대값이 된다. 이를 저류 연속방정식

$$R_{k,i,l,t} = S_{k,t} + I_{it} - e_{k,l,t} - S_{l,t+1} \dots \dots \dots (3)$$

에 대하여 뒤로부터 反復的으로 풀면, $B_{k,i,l,t}$ 와 遷移確率(transition probability), P_{ij}^t 가 일년을 週期로 하여 변하지 않고 일정하게 유지되는 限, 일정주기를 갖는 stationary 한 저수지 운영방안 l 을 구할 수 있다. stationary 한 운영방안이란 순환방정식을 연중 어떤 시점에서 출발하여 풀더라도 상관없이 같은 최적운영방안 l 을 구하게 된다는 뜻으로서 주어진 初期貯溜量과 流入量의 함수로 표시된다. 이 stationary 한 최적운영방안, l 은 Manne(1960)이 보인바와 같이 방류량의 最適結合確率을 이용하여 線型計劃으로 풀 수도 있다. 이와같은 推計學的인 動的計劃은 Wang 등(1986)에 의해 실시간 저수지 운영을 위하여 연속적으로 이용된 바가 있고 Tai 등(1987)은 저수지 群의 문제에 응용을 위하여 발견적(heuristic)인 방법을 제안하였다.

이상의 방법은 주로 中長期 운영방안 선정에 적합하다. 왜냐하면 중장기를 기준으로 하여야 이 모형에서 요구하는 특성, 예를들면 $B_{k,i,l,t} = B_{k,i,l,t+T}$ 의 週期性, T 가 維持되고 천이확률, P_{ij}^t 의 不變假定이 타당하기 때문이다. 이렇게 구한 최적운영방안을 초기 저류량과 그 기간중의 유입량의 함수로서 期間別 목표 저수량이나 방류량의 관계로 나타내면 저수지 운영요원이 참

고로 할 수 있는 저수지 運營基準(rule curve)이 된다. 이 기준은 모형설계시 주어진 입력자료들을 바탕으로 선정된 stationary 中長期 운영방안 이므로 실제 발생된 새로운 자료의 補完에 따라 定期的으로 수정되어야 하며, 과거의 운영경험과 저수지 운영분석을 위한 模擬實驗(reservoir operation simulation) 등을 이용하여 보완시켜서 사용한다. 더우기 저수지별 操作時點에서의 저류량과 또는 바로 前 時點에서의 유입량이나 강우량의 함수로서 기간 末期의 저류량이나 방류량을 구할 수 있도록 하면 이는 條件附 運營基準(conditional rule curve)이 된다. 그림 2는 美國 California의 Folsom 저수지의 홍수조절을 위한 조건부 운영곡선을 나타낸다.

저수지 운영기준의 산정은 위에서 서술한 직접적인 推計學的인 모형에 의하여만 가능한 것은 아니고 Hall, Buras, Young(1961, 64, 67) 등이 추구한 間接的인 방법에 의하여도 가능하다. 이 기법은 직접적인 推計學的 모형이 천이확률을 이용하여 확률변수(random variable)의 효과를 직접적으로 반영시키려는데 반하여 유입량의 發生順序가 模擬 流入量模型(synthetic stream flow generation)에 의하여 確定的으로 주어지고, 동적계획과 같은 최적화기법으로 최적해의 근사값을 몇개의 상태변수와 유입량의 함수로 나타낸 다음, 回歸分析(regression) 등을 이용하여 종합하는 방법이다. 이는 확률변수의 효과를 內在的으로 감안하므로 內在推計學的 模型(implicit stochastic programming)이라 부른다(Lou-

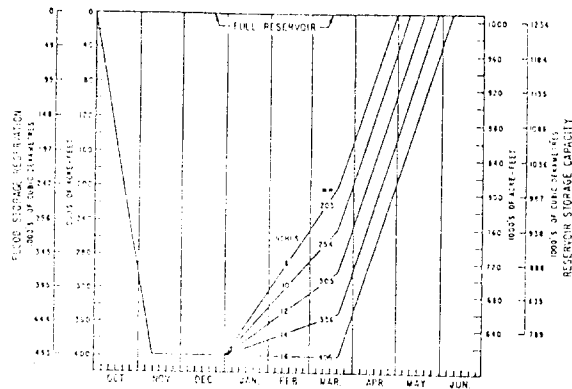


그림 2. Folsom 저수지의 조건부 운영방안
출처 : State of California Department of Water Resources Bulletin 199, September 1980).

cks et. al., 1972) 최근에 이 방법을 Bhaskar와 Whitlatch(1980)나 Karamouz와 Houck(1982) 등이 모의실험을 통하여 모델檢證을 수행한 바가 있고 Simonovic(1987)은 공급을 모형에 적용하고 있다.

이상은 單一댐 운영방안에 대한 것이고 이는 저수지군의 운영의 기본이 되지만, 저수지群의 統合運營을 고려할 때 해결되어야 할 또다른 문제는 저수지들 간의 放流順序와 貯溜量 分配이다. 방류순서는 불필요한 초과방류(spill)를 최소화하기 위하여 直列로된 댐들의 경우 最下流의 댐으로부터 점차 上流의 댐에서 방류시킨다. 並列로 위치한 댐의 경우는 각 저수지의 單位 集水面積當 강우량이 대체로 均一하다는 가정하에 단위 貯溜量에 대한 집수면적의 크기가 큰 쪽. 그리고 浸透損失과 蒸發損失이 큰편부터 먼저 방류를 시킨다. 이상은 用水 수요자가 下流에 위치할 경우로서 저수지群 사이의 저류량 안배까지 고려하면 수없이 많은 운영상의 여유가 있을 수 있다. 그런데 실제로는 각 댐들이 수력발전이나 오락 및 휴식공간 확보와 같은 각 댐의 특수여건을 충족시키기 위하여 저수지群내의 저류량을 어떻게 分配시키는가에 따라 시스템 전체로서의 운영효율에 미치는 영향은 크다. 그러므로 효율적인 저수지군의 統合運營을 위하여 저수지군의 貯溜量 分配에 영향을 주는 요소들을 살펴보면 (1) 각 저수지에서의 目標 貯水量, (2) 각 댐마다 설정한 貯水區劃(storage allocation zone) (3) 河川 容量區劃에 따른 방류량 제한, (4) 기대 유입량(상류댐 방류량)에 의한 조건부 저수지 운영기준(conditional rule curve), (5) 저수지군의 最下流 用水 供給目標量(수질보전 및 환경유지를 위한 방류 포함) 등이다.

통합적 용수 수요를 만족시키며 장애의 공급 부족현상에 최선의 준비를 하기 위한 저수지군 사이의 貯水量 分配를 위하여, HEC-5 모형과 (Feldman, 1981) Louck 등이 고려한 基本原則을 살펴보자. 먼저 홍수조절 공간을 제외한 각 댐의 區間別의 전체 有効貯水量에 대한 比率이 같게 되도록 나눈다음

(1) 각 댐의 저류량이 같은 區域에 있도록 同

時에 방류하고 저류하는 방안.

(2) 각 댐사이의 優先順位를 정하여 우선순위가 낮은 댐부터의 저류량을 이용하는 법.

(3) 예기치 못한 수문학적 상황에 대비하여 일부 저수지와 다른 저수 구역들 사이에 저류량의 差異가 一定率로 維持되도록 방류하는 방안.

(4) 특정목적 또는 多目的을 위하여 最適化 技法을 이용하여 정하는 법.

등이다. 여기서 (1), (2), (3)은 저수지군의 운영을 위한 simulation을 수행할 때 적용시킬 수 있는 운영원칙이고, 각 댐의 특성에 따른 이득의 최대화가 목적일 경우는 Becker와 Yeh(1974)의 LP-DP 기법과 유사한 최적화 기법을 통하여 적정배분이 이루어지도록 하거나, Yazicigil(1983)과 같이 최적 Simulation을 통하여 이루어지도록 한다. Yazicigil 등(1983)이 개발한 GRBOOM 모형에서는 각 댐 또는 제어지점들의 목표수위, 적정유량, 적정변동량 등을 정하고 그로부터의 괴리에 따른 損失 함수에 加重值를 부여하여 總 損失의 습을 최소로 하는 理想的인 저수지 시스템운영의 模寫를 목적으로 하므로 적정유량 및 변동량을 사전에 정해야 한다.

洪水調節을 위한 貯水池 운영방안

(Flood Control Reservoir Operation)

저수지는 평시에는 수자원의 確保를, 洪水期에는 홍수조절의 극대화를 위하여 운영된다. 따라서 홍수기간중 저수지의 운영방안은 평시의 운영방안과는 저수지 조작목표에 차이가 있다. 홍수기간 중에는 댐의 安全管理 및 홍수조절이 중요하지만 홍수기가 지나면 水資源의 확보가 중요하므로 홍수기간 末에는 저수지의 有効貯水空間에 홍수량을 최대한 貯溜할 수 있도록 운영하여야 할 것이다. 홍수기간중 유입 홍수량을 무사히 효율적으로 조절하기 위하여는 기본적으로 (1) 댐의 安全管理, (2) 洪水調節, (3) 댐 上流의 홍수피해 最少化, (4) 洪水期末의 수자원 확보 등의 네가지 原則이 고려되어야 한다.

홍수란 장마기나 해빙기때(外國의 경우) 급격한 저수지로의 流入量의 증가로 인하여 발생하는 비교적 獨立的인 狀況으로 볼 수 있으므로

이에 대비한 저수지 운영방안도 평상시의 수자원 확보를 위한 운영방안에 비하여 독립적인 운영방안이여야 한다. 즉 홍수발생이 예상되면 어느정도 정확한 유입량의 예측이 가능할 것으로 대체로 常時滿水位의 始點水位로부터 예비해 둔 洪水調節用 저수공간을 채워가는 저수지 追跡法이 홍수조절을 위한 저수지 운영방안의 基本이 된다. 저수지 홍수추적 방법에는 방류량에 아무런 조절을 가하지 않고 除水路를 통과시켜 自然調節 시키는 방법으로 부터 수문이나 방수구를 이용하여 인위적인 放流量 調節을 가하는 방법, 또는 'Fuse Plug'와 같은 것을 장치시켜 자연조절에 人爲的인 조절을 가미시키는 방법이 (HARZA, 1983) 있을 수 있다. 단일댐의 홍수조절을 위한 동적계획법을 국내에 소개한 김치홍(1972) 이래 여러 분석가들이 일반적인 댐운영에 대한 연구결과를 발표한 바가 있다(권오현등 서남수등, 양홍석, 이길성 등). Plate(1972)가 댐군의 홍수조절 문제를 거론한 이래 Winsor(1973)는 線型計劃에 의한 홍수조절을 제안하였으며, 이길성(1985) 등은 충주댐 홍수시 운영분석을 통하여 여러가지 홍수조절기법들의 비교검토를 하였으며, 오영민(1986) 등은 Min-max DP에 의한 단일댐 홍수조절 문제를 고려하였고, 김승권 등(1988)은 병렬로 위치한 두개 댐의 통합조절을 위하여 Incremental Dynamic Programming을 사용하였다.

어떤 방식에 의한 홍수조절을 하건, 인위적인 홍수조절이라 함은 流出 水文曲線의 尖頭流量을 최소화 시키는 것이며 다음식으로 표시되는 貯溜方程式에 기초를 둔다.

$$I(t) - O(t) = \frac{dS(t)}{dt} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 $I(t)$, $O(t)$, $S(t)$ 는 각각 流入量, 放流量 및 貯溜量의 시간에 대한 變化率이다. 이 식을 홍수추적 시간구간, Δt 에 대하여 수치적 관계로 변용시켜 미지항과 기지항으로 분리시켜 정리하면

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t + (S_1 + \frac{1}{2}O_1\Delta t) - O_1\Delta t$$

$$= (S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t) \dots\dots\dots(5)$$

가 되고 정해진 Δt 값에 대하여 $(S + \frac{1}{2}O\Delta t)$ 값을 S 와 O 와 저수위 H 의 함수로 나타내어 貯溜指示表(storage indication table)를 얻은후 초기조건으로부터 홍수추적을 통하여 流出水文曲線을 얻는다. 이상과 같이 얻은 流出量을 河道追跡에 의하여 홍수조절을 수행한다. 제한된 홍수조절용량범위 내에서는 홍수조절 방법에 따라서 주어진 홍수조절용량을 최대한 활용하여 최대한의 홍수조절효과를 얻을 수 있지만, 실제의 홍수조절 효과는 조절방법 보다는 洪水 調節容량의 크기에 더 좌우된다고 할 수 있다. 왜냐하면 流入 洪水水文曲線을 정확히 예측할 수만 있다면 예비방류를 시켜서라도 洪水 調節容량을 최대한 확보하여 침투유출량을 최소화 시킬 수 있기 때문이다. 따라서 最適洪水 調節을 위한 關鍵은 비교적 正確한 流入 洪水量의 예측이며 이를 위한 신뢰할 수 있는 降雨-流出模型의 개발이 선행되어야 할 것이다. 아울러 최적제어를 위하여는 洪水 調節地點의 水位와 流量을 정확히 예측할 수 있는 檢證된 河道追跡 모형이 있어야 할 것이다.

이 두가지 요소는 Can(1985) 등이 實時間最適貯水池 운영을 위한 선결과제로서 지적한 바도 있다.

實時間 저수지 운영방안(Real-time Reservoir Operation).

中長期 저수지 운영곡선(rule curve)은 궁극적으로 사용자에게 이득을 가져올 戰略的인 저수지 운영방안이다. 그러나 이같은 방안을 이용한 저수지 운영은 매년 確率의으로 같은 상황이 反復되라는 가정하에 유입량 및 用水 수요량 자료로부터 추출해낸 일반적인 기간별 저수위 조정 기준일 뿐 실제 상황에서 短期間에 벌어지는 수문학적 환경변화에 대처하는 直接的인 방안은 되지 못한다. 그런데 저수지의 최적운영 문제는 시간에 따른 順次的인 의사결정 과정(sequential decision process)이므로 바로 前기간에 내린 결정이 다음 순간의 貯水位상태와 放流量 결정에

직접적인 영향을 준다. 따라서 실질적인 이득은 短期間의 實時間 저수지 운영에서 비롯되며 매 시각의 저수량과 유입량의 상태변화에 부응하는 戰術的인 단기 운영방안이 중요한 문제로 대두된다. 그런데 대개의 경우, 中長期 운영방안과 短期 운영시의 요구수준이 서로 일치하지 않을 경우가 종종 발생한다. 다시 말해서 주어진 중장기 운영방안을 쫓아가는 과정에서 임의의 시점에서 저수지 운영 요원이 택할 수 있는 선택의 여지가 너무 크므로 중장기 운영방안과 단기 운영지침의 차이를 적절히 타협시켜 조정시키는 실질적인 운영지침이 필요하다. 경우에 따라서는 중장기 운영방안도 최근의 새로운 예측자료를 반영시켜서 개선시켜 나갈 필요가 있다. 따라서 實時間 저수지 운영을 위하여는 확률적인 모형보다는 Becker 등(1974)의 모형과 같은 확정적인 모형이 더 편리할 수도 있다. 그러나 Wang(1986) 등은 'policy iteration' 법을 이용하, 年間週期的 Markov 과정을 쫓는 추계학적(stochastic) 모형으로 실시간 운영을 제어하도록 하는 2단계의 작업을 통한 실시간 저수지 운영을 시도하였다.

實時間 저수지 운영을 위하여는 현 시점에서의 저류량과 예상 유입량, 중장기 저수지 운영 기준 그리고 시스템 전체의 성과를 산정할 수 있는 적절한 목적함수를 필요로 한다.

단일댐의 實時間 最適運營을 위한 수학적 모형은 개념적으로 다음과 같이 표시될 수 있다 (Can et. al., 1982).

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T \{Z_1(S_{t+1}) + Z_2(Q)\} \dots\dots\dots(6)$$

subject to

$$S_{t+1} - S_t + R_t = I_t, \quad t=1, 2, \dots, T \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_t - f(R_t) = 0 \quad \text{〃} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$S_{t+1} \leq \text{CAP} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{RMIN} \leq R_t \leq \text{RMAX} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$S_{t+1}, R_t, Q_t \geq 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

여기서

$S_t = t$ 기간 初에서의 예상저수량

$R_t = t$ 기간 동안의 예상 방류량

$Q_t = \text{〃} \text{〃}$ 하류 수위조절 지점의 예

상 유량

$I_t = t$ 기간 동안 저수지로의 유입량

$Z_1(S_{t+1}) =$ 예상저수량의 함수로 나타낸 손실 함수

$Z_2(Q_t) =$ 하류 수위조절지점에서의 유량의 함수로 표시한 손실함수

$f(R_t) =$ 하도 추적을 위한 함수 또는 simulation 모형

CAP = 저수지의 저수용량

RMAX = 최대 방류량

T = 계획기간(예측가능기간)

저수지의 운영목적은 목적함수에 반영되는데 다목적 댐의 경우는 우선 순위에 따라 특정 목적을 중심으로 정의된다. 대개 실시간 최적 운영의 이득을 손쉽게 증명할 수 있는 水力發展 이득을 최대로 하는 목적함수를 취하는 경우가 보통이고(Becker and Yeh, 1976), 기간별 기준 저수량과 유지해야 할 방류량은 제약조건으로 처리한다. 물론 홍수조절이 목적이 될 경우는 홍수조절지점의 最大 流量이나 水位를 최소화시키거나 홍수피해에 따른 손실함수를 최소화시키는 목적함수를 취할 수 있다.

실시간 저수지 운영모형은 豫測된 유입량 자료를 근거로 하여 운영되므로 예측기간 T가 길어질수록 예상치의 正確度가 저하된다. 그러나 예측만 정확히 할 수만 있다면, 예측 추정기간이 길수록 보다 나은 시스템 운영이 가능하다. 따라서 비교적 정확한 유입량 예측을 가능하게 해주는 降雨-流出模型(rainfall-runoff model)의 설계와 적절한 예측기간 T를 선정해야 한다 Can 등은(1985) 정확한 유입량 예측과 아울러 河道追跡 모형의 正確性을 강조하였으며 근사적인 방법에 의한 하도 추적 모형을 사용할 경우 최적운영에서 크게 벗어날 수가 있음을 보였다. 그리고 Mariño와 Loaiciga(1985a, b, 1986)는 CVP(Central Valley Project)를 응용례로 하여 기말저수량과 신뢰도를 입력자료로 한 실시간 저수지 운영모형을 구축하였다.

實時間 저수지 운영은 예측치의 不確實性下에서 시스템 전체의 용수수요 및 제약조건을 만족시키며 이득을 최대로 하는 방류량을 선택하는

문제이므로 복잡하고 어려운 문제이다. 따라서 檢證된 降雨—流出模型과 河道追跡 모형을 사용하는 것이 실시간 저수지 운영의 成敗를 좌우하는 중요한 조건이다. 따라서 지금까지 이 분야에 대한 연구는 많이 이루어 지고 있지만 수학적 모델을 이용한 성공적인 사례는 없다. 그러나 초대형 컴퓨터(super computer)의 급속한 보급에 따라 이 분야의 미래는 밝으므로 계속적인 연구가 있어야 할 것이다.

結 論

이상으로 저수지의 운영방안을 水資源의 안정 공급(利水)을 위한 운영방안과 洪水調節(治水)을 위한 방안 그리고 實時間 저수지 운영방안 등을 모델링의 관점에서 개괄적으로 살펴 보았다.

저수지의 운영문제는 그 연구대상 분야가 실로 광범위하여 다양한 분류가 가능하며 따라서 본 연구에서의 분류로 모든 것이 包括될 수 있으리라고 생각지 않는다. 특히 저수지 群의 최적 운영 문제는 시스템적 관점에서의 통합운영 관리를 통하여 얻을 수 있는 잠재이득이 엄청나므로 수 많은 시스템 분석가들의 연구대상이며 따라서 최적운영을 위한 수 많은 연구들이 있다 본 논문에서는 시간 및 지면 등 여러가지 이유로 그들에 대한 집중적인 연구는 뒤로 미룬다.

대개의 경우, 저수지 群의 최적운영 문제는 주로 中長期의 최적운영방안을 설정하는 데는 상당히 성공적이지만, 實時間 단기 운영방안을 구하는 문제에 대한 연구는 未洽한 실정이다. 아직 美國과 같은 나라에서도 저수지 群의 실질적인 實時間 운영을 위하여 최적기법을 이용한 수학적 모형을 성공적으로 사용하고 있는 사례는 없다. Rogers(1986) 등은 이 같이 잠재이득이 큰 수자원 관리문제에 최적화 기법을 이용한 실례가 희귀한 이유를 다음과 같이 요약하고 있다. (1) 機關들의 이해부족, (2) 모델의 효과를 보장해 줄 자료저변(data base)의 不充分, (3) 不當한 모형화로 인한 현실과의 乘離, (4) 여타 대안에 비하여 최적안의 非敏感受度. 하지만 지난 20여년 동안 급속한 發展을 이룩해온 Computer의 hardware와 software의 기술에 힘입어 최

적화 기법의 具現을 위한 노력은 계속되고 있으며 머지않아 실질적인 응용이 이루어질 것으로 전망된다. 따라서 國內에서도 저수지 群의 최적 운영을 위한 실용적 분석방안에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학 기술원 System Engineering Center(S. E. C)의 지원과 한국과학재단 연구비 일부 지원에 의한 것임을 밝히고 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. 권오현, 함세진, “북한강 댐군의 최적운영을 위한 시스템 모델의 개발”, 대한토목학회 논문집, 제 28권 제 4호, pp.95~104, 1980.
2. 김치홍, “Dynamic Programming에 의한 홍수조절”, 대한 토목학회지, 제 20권 제 2호, pp.9~21, 1972.
3. 서남수, 윤용남, “단일 다목적댐의 최적운영방안을 위한 시스템의 모의기법의 응용”, 대한토목학회 논문집, 제 26권 제 3호, pp.99~104, 1978.
4. 양홍석, “Dynamic Programming에 의한 최적 제어”, 전기학회지, 제 22권 제 2호, pp.61~67, 1973.
5. 이길성, 전경수, “홍수시 소양강댐 및 화천댐의 최적운영을 위한 시뮬레이션”, 대한토목학회 논문집, 제 6권 제 1호, pp.13~24, 1986.
6. 이길성, 정동국, “홍수시 충주댐 운영방안의 비교 검토”, 한국수문학회지, 정 18권 제 3호, pp.225~233, 1985.
7. 오영민, 이길성, “Min-max DP에 의한 昭陽 및 忠州湖의 洪水調節運營”, 한국수문학회지 제 19권 제 4호, pp.339~344, Dec. 1986.
8. 김승권, 윤용남, 이성윤, “최적화 기법에 의한 南江 安東댐의 홍수조절”, 대한토목학회 논문집 제 8권 제 1호 1988. 3월
9. Becker, L. and W. W-G. Yeh, “Optimization of Real Time Operation of a Multiple-Reservoir System”, *Water Resources Research*, Vol. 10, No.6, p.1107~1112, December, 1974.
10. Bhaskar, N.R. and E.E. Whitlatch, Jr.

- "Derivation of Monthly Reservoir Release Policies", *Water Resources Research*, Vol.16, No.6, p.987~994, 1980.
11. Can, E.K., M.H. Houk, G.H. Toebes, "Optimal Real-time Reservoir Operation: Innovative Objectives and Implementation Problems," *Purdue University Water Resources Research Center*, Technical Report No.150, November, 1982.
 12. Can, E.K., and M.H. Houck, "Problems with Modeling Real-time Reservoir Operations", *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol.111, No.4, p.367~381, October, 1985.
 13. Feldman, A.D., "HEC Models for Water Resources System Simulation; Theory and Experience", *Advances in Hydroscience*, Vol.12, p.292~422, 1981.
 14. Fiering M.B., "Stream flow Synthesis", Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1967.
 15. Gablinger, M. and D.P. Loucks, "Markov Models for Flow Regulation, *J. of Hydraul. Div.* ASCE, Vol. 96 No. HY1, p.165~181, 1970.
 16. Hall, W.A. and N. Buras, "Dynamic Programming Approach to Water Resources Development," *J. Geophysical Research*, Vol.66, No.2, p.517, February, 1961.
 17. Hall, W.A., Optimum Design of a Multiple-Purpose Reservoir, "*J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.90, No.HY4, p.141, July, 1964.
 18. HARZA Engineering Report, "Phase I Feasibility Study of Two Forks Water Supply Project", June, 1983.
 19. Howard, R.A., "Dynamic Programming and Markov Processes, MIT. Press. Cambridge, Mass. 1960.
 20. Johnson L.E., "Water Resource Management, Decision Support System", *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol.112, No.3, July, 1986.
 21. Karamouz M. and M.H. Houck, "Annual and Monthly Reservoir Operating Rules Generated by Deterministic Optimization," *Water Resources Research*, Vol.18, No.5, p.1337~1344, 1982.
 22. Little, J.D.C., "The Use of Storage Water in a Hydroelectric System," *Operations Research*, 3(2), p.187~197, 1955.
 23. Loaiciga, H.A. and M.A. Marino, "An Approach to Parameter Estimation and Stochastic Control in Water Resources with an Application to Reservoir Operation," *Water Resources Research*, Vol.21, No.11, p.1575~1584, 1985.
 24. Loaiciga, H.A. and M.A. Marino, "Risk Analysis for Reservoir Operation," *Water Resources Research*, Vol.22, No.4, p.483~488, 1986.
 25. Loucks D.P., "Computer Models for Reservoir Regulation", *J. of the Sanitary Engineering Div.*, ASCE, Vol.94, No.SA4, 1968.
 26. Plate, E.J., and G.A. Schultz, "Flood Control Policies Developed by Simulation", Proceedings of the 2nd International Symposium in Hydrology, Sept. 11~13, 1972. at Fort Collins, Colo, USA.
 27. Loucks D.P., and L.M. Falkson, "A Comparison of Some Dynamic Linear and Policy Iteration Methods for Reservoir Operation," *Water Resources Bulletin*, Vol.6, No.3, 1970.
 28. Loucks D.P. and O.T. Sigvaldson, "Multiple-reservoir Operation in North America" in *Operating of Multiple Reservoir Systems*, ed. by Z. Kaczmarek and J. Kindler, International Institute for Applied Systems analysis, Laxenburg, Austria, 1982.
 29. Manne, A.S. "Linear Programming and Sequential Decisions," *Management Sciences*, Vol.6, No.3, p.259~267, 1960.
 30. Marino, M.A. and H.A. Loaiciga, "Dynamic Model for Multireservoir Operation", *Water Resources Research*, Vol.21., No.5, p.619~630, 1985a.
 31. Marino, M.A. H.A. Loaiciga, "Quadratic Model for Multireservoir Management Application to Central Valley Project", *Water resources Research*, Vol.21., No.5, p.631~641, 1985b.
 32. Marino, M.A. and S. Simonovic, "Single Multipurpose Reservoir Design: A modified Optimal Control Problem by Chance-Constrained Programming" *Advanced Water Research* 4(1), p.43~48, 1981. Ripple, W., "The Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply", *Proceedings of the Institute of Civil Engineers (Brit.)*, 3 페이지로 계속 ➡