

〈論 文〉

# 貯水池群으로부터 期待便益 算定을 위한 Monte Carlo 技法의 簡略化 Simplification of Monte Carlo Techniques for the Estimation of Expected Benefits in Stochastic Ananlysis of Multiple Reservoir Systems

李 光 晚\*, 高 錫 九\*\*

LEE Kwang Man and KO Seok Ku

**Abstract**□ For the system benefit optimization by considering risk or reliability from a multiple reservoir system using the Monte Carlo technique, many stochastically generated inflow series have to be used for the system analysis. In this study, the stochastically generated inflow series for the multiple reservoir system operation are preprocessed according to the considered system objectives and operating time periods. Through this procedure, several representative inflow series which have discrete probability levels and operation horizons are selected among the thousands of generated inflows. Then a deterministic optimization technique is applied to the power energy estimation from the Han River Reservoirs System which considers five reservoirs in this study. It took much lower computational requirements then using the original Monte Carlo Technique, even though estimated result was almost similar.

**要 指 :** Monte Carlo 기법을 이용하여 저수지군으로부터 危險度나 信賴度를 고려한 시스템 편익을 최적화 하기 위해서는 수많은 모의발생 유입량 資料群을 이용하여야한다. 본 연구에서는 저수지군 연계운영을 위한 모의 발생 유입량 자료를 시스템 목적함수나 운영기간등을 고려하여 前處理함으로써 수많은 모의 발생 자료 군으로부터 離散化된 확률값과 운영기간을 갖는 극히 제한된 대표 유입량을 선택한다. 선택된 대표 유입량 자료를 사용하여 확정론적 최적화 기법에 의거 이산화된 위험도나 신뢰도 수준을 갖는 기대편익을 산정하게 된다. 이와같은 기법을 5개 저수지를 고려한 漢江수계 저수지 시스템으로부터 전처리된 평가함수별 신뢰도 수준을 갖는 발전편익 산정에 적용하였으며, 적용결과 신뢰도를 고려한 기대편익은 전형적인 Monte Carlo 기법에 의한 결과와 비슷한 수준이었으나 훨씬 적은 계산만을 요구하였다.

## 1. 序 論

다목적 저수지와 같은 수자원 시설물의 최적계획이나 최적 운영에 있어 저수지 유입량과 발전이나 용수요 등과 같은 推計學的 특성을 갖는 요소들과 과거 기록 자료와 같이 확정된 값으로 간주하는 確 定論的 分析 (deterministic analysis)을 수행하거나 이러한 추계학적 요소를 等發生 확율을 갖는 無

作爲 時計列 資料集團 (random sets of equally likely sequences)으로 간주할때에는 線型計劃技法이나 動的計劃技法과 같은 최적화 기법이 가장 바람직한 방법이 될 수 있다. 그러나 저수지 유입량 자료와 같이 任意性이 강한 추계학적 성질을 갖는 자료를 입력자료로 사용할 때에는 이러한 최적화 기법을 분석에 직접 사용할 수 없는 단점이 있다. 또한 저수지 운영 정책 결정에 있어 평균 유입량이나 等價確率分布에 근거한 확정론적 분석방법은 시

\* 정희원, 한국수자원공사, 수자원연구소, 연구원, 중앙대 박사과정 수료

\*\* 성희원, 한국수자원공사, 조사계획처장, 책임연구원, 공학박사

시스템으로부터의 편익이 과대 평가될 가능성이 있으며, 비용이나 손실등은 과소 평가될 가능성이 있다고 알려져 있다(Loucks et al., 1981).

따라서 저수지 운영을 통한 기대편익의 산정에 있어 추계학적 성질을 갖는 유입량 예측의 불확실성이나 수요 변동의 불확실성으로 인하여 신뢰성 있는 결과를 얻기란 용이하지 않다. 특히 수계내에 여러 저수지와 수력 발전소가 포함된 貯水池群으로부터의 발전편익 산정은 각 저수지의 저류량의 크기나 발전 시설 규모등의 차이와 방류량에 대한 제약조건의 변화등으로 인하여 단순히 유입량의 신뢰조건에 따라 저수지로부터 기대되는 편익의 신뢰성을 직접 관련시키는 것도 저수지 운영정책 결정에 있어 誤謬를 범할 수 있다.

이러한 수문학적 불확실성을 보완하기 위하여 추계학적 분석방법으로 線型決定律을 사용한 機會制約技法(chance constrained programming: CCP) (ReVelle et al., 1969), 推計學的 動的計劃技法(Askew, 1974) 및 信賴性分析技法(Colorni and Fronza, 1976; Croley and Rao, 1979) 등이 개발되었다. 이러한 기법들 중에서 기회제약기법은 사용상의 편리성과 다른 최적화 기법들과의 적용의 용이성 때문에 많이 사용되어 왔지만, 적용결과 실제보다 더 큰 저수용량이 요구되는 등 추계학적 분석 기법으로서 적합치 않다는 일부 異論이 제기되고 있다(Hogan et al., 1981). 또한 추계학적 동적 계획 기법은 遷移確率 계산의 복잡성이나 계산 요구량 때문에 단일 저수지가 아닌 저수지군 연계운영에 있어서는 실제 적용이 거의 불가능한 상태이다.

상기와 같은 단점을 보완할 수 있는 방법으로써 Fiering (1961)과 Hufschmidt 및 Fiering (1966)에 의해서 저수지 운영의 추계학적 분석에 적용되었던 Monte Carlo 기법에서는 과거 기록치보다 장기간이면서 극한치를 포함한 유입량 자료를 模擬 發生한 후 저수지 시스템 분석의 입력자료로 사용하여 시스템으로부터의 기대편익이나 저수지 운영정책을 도출할 수 있다. 더욱이 Monte Carlo 기법은 수자원 시설물의 계획이나 운영에 있어 주어진 설계 기준이나 운영 기준에 따른 신뢰성이나 위험도를 산정할 수 있어 추계학적 분석에 있어 때

우 광범위하게 이용되고 있다.

Young(1967)은 확정론적 동적계획기법에 의한 단일 저수지의 최적 방류량을 산정하여 연간 방류량 결정을 위한 運營律 개발에 Monte Carlo 기법을 적용하였으며, Askew등 (1971)은 위험도나 신뢰도를 고려하면서 다목적 저수지 시스템으로부터 용수 공급등의 연간 最適 契約 水準을 결정하는데 Monte Carlo 기법을 적용하였다. 또한 Willis (1984)등은 이 기법을 이용하여 설정된 再現頻度에 따른 최적 저수지 방류량을 결정하는 방법을 제시하였다. 그러나 이러한 Monte Carlo 분석은 유하량 자료의 모의 발생기법에 의하여 합성한 장기간의 유하량 자료나 유하량 자료집단을 이용하여 線型이나 非線型 또는 동적계획기법과 같은 최적화 기법을 이용하여 저수지 시스템을 모의 운영한 후 결과를 분석하여야 하므로 계산량이 지나치게 많아지는 단점이 있다. McGrath와 Irving (1973)은 상태변수의 평균이나 분산이 일정한 값에 수렴하기 위해서는 1000번 이상의 모의가 필요하다고 지적하고 있어 저수지 연계운영에 최적화 기법을 분석 기법으로 이용하는 경우 대단히 많은 계산시간을 필요로 한다.

본 연구에서는 저수지 연계 운영을 위한 추계학적으로 모의 발생된 매우 많은 유입량 資料群을 貯水池群 시스템에서 고려하는 발전편익 및 용수공급등의 목적과 운영기간에 따라 前處理 과정을 거쳐 離散化된 頻度水準을 갖는 한정된 몇 개의 대표 유입량 자료군을 선택하여 확정론적 최적화 기법으로 편익을 산정하고 1000년간의 유입량 자료를 고유의 Monte Carlo 기법으로 분석하여 비교하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 과거유하량 기록자료로부터 모의 발생된 장기간의 자료를 이용하여 기회제약기법에 있어서의 계산상의 편리성을 Monte Carlo 기법에 적용할 수 있는 각 신뢰도 또는 위험도에 따른 발전편익 산정을 위한 대표 확률유입량 산정기법을 제시하여 Monte Carlo 기법을 간략하게 사용할 수 있는 방안을 제시하고자 하며, 이러한 기법을 華川, 昭陽江 및 忠州 저수지 등의 대형 다목적댐을 포함하고 있는 漢江수계 저수지군 최적 운영에 적용하였다. 적용결과 본래의 Monte Carlo

기법에 비해서 계산량을 현저하게 줄일 수 있었으며, 기대편익 산정결과와는 거의 같은 수준으로 판정되었다.

### 2. 貯水池群 最適 運營 模型 構成

Fig. 1과 같이 수계내에 直列 및 竝列로 연결된 저수지군의 연계 운영에 있어 각각의 離散化된 용수공급 조건을 만족하면서 발전 편익을 극대화시키는  $\epsilon_t$ -制約의 多目的 最適化 문제를 수학적 모형으로 나타내면 다음과 같다.

$$F = \text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n f_i(V_{i,t}, V_{i,t+1}, U_{i,t}) \quad (1)$$

subject to,

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + I_{i,t} - D_{i,t} + C \sum_{j=1}^n U_{j,t} + E_{i,t} - A_i(V_{i,t}, V_{i,t+1}) - V_{i,t} \quad (2)$$

$$V_{i,t \min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t \max} \quad V_{i,t} \quad (3)$$

$$\epsilon_{i,t \min} \leq U_{i,t} \leq V_{i,t \max} \quad V_{i,t} \quad (4)$$

여기서,  $V_{i,t}$ 는 저수지 단위 운영 기간 초기 저류량 ( $n \times 1$  vector);  $I_{i,t}$ 는 단위 운영기간  $t$ 동안의 自己 유입량 ( $n \times 1$  vector);  $D_{i,t}$ 는 저수지 상류에서 단위 운영기간  $t$ 동안의 純 직접 취수량 ( $n \times 1$  vector);  $U_{i,t}$ 는 저수지로부터의 단위 운영기간  $t$ 동안의 방류량 ( $n \times 1$  vector);  $E_{i,t}$ 는 저수지 수면으로부터의 단위 운영기간  $t$ 동안의 증발손실률 ( $n \times 1$  vector);  $A_i(\cdot)$ 는 단위 운영기간  $t$ 동안의 저수지 평균 水表面積 ( $n \times 1$  vector);  $C$ 는 저수지의 연결 상태를 나타내는 시스템 구성 매트릭스 ( $N \times N$  matrix);  $f_i(\cdot)$ 는 발전량을 나타내는 함수;  $\epsilon_{i,t}$ 는 용수 공급 조건을 나타내는 최소 방류 제약 ( $N \times 1$  Vector);  $n$ 는 저수지 및 수력 발전소의 갯수이고;  $T$ 는 저수지의 총 운영기간이다.

한편 식 (2)에서 저수지의 구성 Matrix인  $C$ 는 直列 또는 竝列로 연결된 저수지들의 위치에 의해서 결정되고 상류 저수지로부터 방류된 유출량에 따른 해당 저수지의 유입상태를 나타낸다.  $C$  매트릭스인 대각선 요소는 -1로써 自己 방류를 나타내며, 다른 저수지와 병렬로 연결되어 있을 경우에는 0이며 직렬로 연결되어 있을 경우에는 +1이다.

또한  $\epsilon_{i,t}$ 수력발전 및 용수공급등 2 개 이상의 多

目的 함수로 부터 변형된 제약조건의 하한값을 나타내며,  $\epsilon_{i,t}$ 의 값을 매개변수처럼 변화시키면서 식 (1)의 최적값을 산정하면 각 목적간의 相互 配分關係 (tradeoff relationship)를 陽解法으로 알 수 있다. 이러한 각 목적간의 상호 배분 관계로부터 시스템 분석가나 의사결정권자가 만족하는  $\epsilon_{i,t}$ 의 하한값, 즉 용수공급 목적함수의 최대값을 선택하여 단일 목적함수로 변형하여 다목적 분석을 실시할 수 있다.

이러한 기법은 Haimes 등 (1971)에 의해서 이론이 정립된후 Ko(1992) 등에 의해서 저수지 운영에 있어 다목적 함수가 능가형과 Min(Max)형, 또는 Max(Min)형의 복합함수로 구성된 경우 가장 바람직한 기법으로 제시되었다.

Monte Carlo 분석을 위해서는  $\epsilon_{i,t}$ 의 값이 사전에 확정되어야 하므로 과거의 유입량 자료에 의하여 다목적 분석을 수행한후 경험있는 시스템 분석가의 입장에서 볼때 갈수시에도 시스템 해석이 가능한 범위의 최대값을 방류제약의 최소값으로 선택하여야 한다.

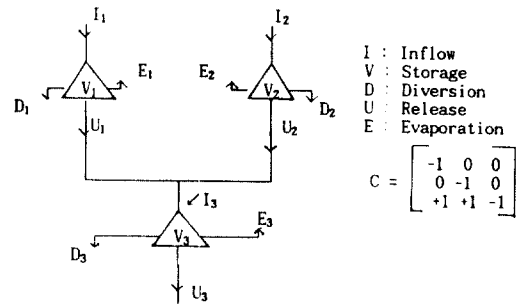


Fig. 1 Hypothetical Multiple Reservoir System

### 3. Monte Carlo 技法 簡略化의 基本 概念

Monte Carlo 기법에 의한 저수지 시스템 분석은 장기간 관측된 과거자료나 모의 발생된 많은 양의

추계학적 자료를 최적화 모형 (또는 모의모형)에 의거 반응을 산정, 時計列로 분석하여 필요로 하는 운영정책이나 운영율과 같은 규칙을 찾아내는 일이다. 이 기법의 일반적인 수행과정은 일정기간을 갖는 유입량 (또는 수요) 자료를 모의 발생하여 식 (1)~(4)의 최적화 모형에 의거 산정한다. 모형에 의하여 산정된 일정 기간동안의 목적함수 값을 분석하고자 하는 기간 동안의 유입량의 크기나 분산에 따라 상관성을 도출하거나 적용모형에 의거 산정된 각 기간별 최적 방류량을 저류상태나 유입량에 따라 시간별로 분석한다. 가능한 모든 운영 조건이나 유입량 조건이 모두 포함될 수 있도록 많은 량의 새로 발생된 모의자료에 따라 상기 과정을 반복 계산한다. 분석하고자 하는 일정 기간 동안의 유입량이나 용수수요 등의 추계학적 입력 조건에 따른 시스템으로부터의 출력을 다음과 같은 評價函數로 나타낼 수 있다.

$$Z_{f(x)} = \zeta_{g(x)} (R_1, R_2, \dots, R_n : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (5)$$

여기서,  $R_1, R_2, \dots, R_n$ 은 분석 기간 동안의 각 저수지군의 유입량이나 용수 수요와 같은 추계학적 입력자료로써 시간의 함수를 갖는 Vector 이며;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 는 저수지의 물리적 특성이나 확정론적 입력자료 및 목적함수 값  $Z$ 를 산정하기 위한

각종 매개변수를 나타내는 Vector 이고;  $\zeta$ 는 식 (1)~(4)로 나타내는 평가함수이다. 또한 첨자로 나타난  $f(x)$  및  $g(x)$ 는 추계학적 입력자료의 크기나 분산에 따라 결정되는 確率密度函數 (pdf: probability density function)로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx=1 \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(x)dx=1 \quad (7)$$

본래의 Monte Carlo 기법에서는 確率密度函數인  $f(x)$ 와  $g(x)$ 를 직접 산정하지 않기 때문에 많은 량의 계산이 필요하나 목적함수의 조건에 따라  $f(x)$ 를  $g(x)$ 로부터 산정할 수 있는 전처리 함수를 도입하면 계산을 줄일 수 있다.

$$f(x) = h\{g(x)\} | \zeta_{g(x)} \quad (8)$$

여기서, 함수  $h(\cdot)$ 는 식 (1)~(4)에 따라 산정되는 평가함수  $\zeta$ 에 의해 결정되는 轉移函數 (transfer function) 보셔 Fig. 2의 Preprocessor에 해당한다.

따라서 일정기간을 갖는 유입량이나 용수수요 자료와 같은 추계학적 입력자료로 부터 목적함수 값을 간단하게 예비 산정할 수 있는 전이함수 모형을 정의할 수 있다면, 계산량이 많이 요구되는 최적화

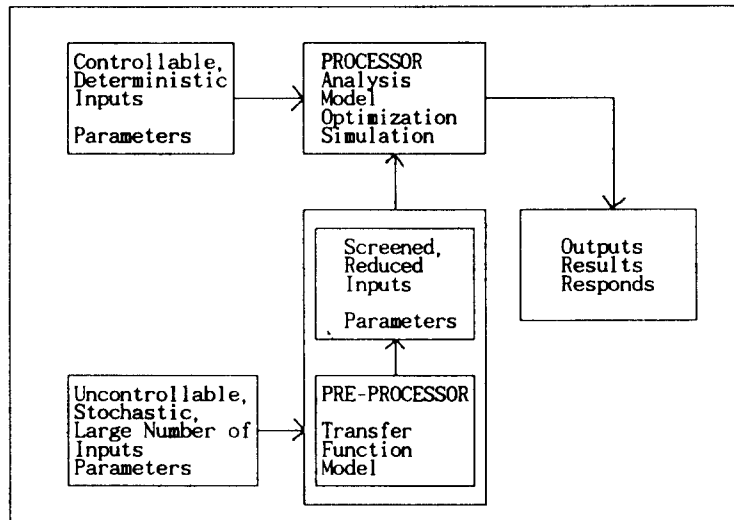


Fig. 2 Concepts of Screening Function for Monte Carlo Simplification

모형을 이용하여 모든 유입량 조건에 따라 분석하는 대신에 예비 산정된 유입량 조건만 분석하여도 된다. 특히 단일 저수지 문제가 아니고 여러 저수지가 직렬 및 병렬로 연결된 수계내의 복합 저수지군 운영 문제일 경우에는 현저히 계산량을 줄일 수 있다.

식 (8)의 전이함수는 추계학적 입력자료의 크기 및 分散 등 유입량의 분포뿐만 아니라 수계내의 시설물에 따른 물리적 특성과 운영 조건 및 목적함수의 기준에 따라 산정될 수 있다.

#### 4. 適用 : 貯水池群으로부터 發電 便益 算定

##### 4.1 對象流域 概要 및 運營條件

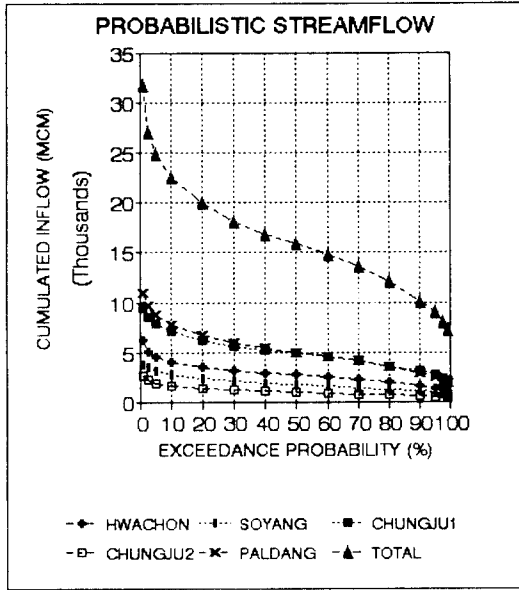
서울을 중심으로 수도권 일원에 각종 용수를 공급하고 있는 漢江 수계내에는 수력발전 시설이 있는 저수지가 9개 있으며, 이중 忠州 및 昭陽江댐은 저수용량 20억m<sup>3</sup> 이상의 대용량 다목적댐이다. 이들 댐과 Flow-Through댐인 충주 조정지댐은 韓國 水資源 公社에서 건설후 관리하고 있으며, 그밖의 1개의 대용량 저수지인 華川댐과 다른 5개의 Flow-Through댐 형식인 소규모의 저수지들은 韓國 電力 公社에서 관리 운영하고 있다. 이러한 저수지 및 댐들의 주 목적은 수력발전과 용수공급, 여가활동, 하천유지 용수 증대 등의 목적을 달성하도록 되어 있다. 본 연구에서는 대규모 다목적댐들에 비하여 규모가 적어 Flow-Through댐으로 간주할 수 있는 春川, 依岩, 淸平, 槐山댐은 고려대상에서 제외시켰으나 八 댐의 경우는 수도권지역에 대한 용수공급원으로 매우 중요한 역할을 하기 때문에 기준지점의 개념으로 포함시켰다. 서울을 포함한 수도권 지역의 용수공급을 위해서 팔당 저수지에서 1977년부터 직접 취수하여 공급하기 시작하였으며, '92년 12월말 시설용량은 3,930×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day에 이르고 있으며 1995 년까지 수도권 용수공급 제 4단계 공사가 완료되면 5,455×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day의 시설용량이 갖추어질 계획이다 (韓國水資源公社, 1992). 漢江府運開發 妥當性 調査 (産業基地開發公社, 1988)시 검토되었던 한강유역 주요 지점에서의 하류 용수공급 및 하천유지를 위한 最

小 必要 流下量과 수질보전 및 환경 측면에서 요구되는 最小 希望 流下量을 용수공급 측면에서 고려하여 Table 1과 같이 정하였으며, 수계내 주요지점에서 산정된 직접취수량은 한국 수자원 공사 (산업기지개발공사, 1986)자료를 이용하였고, 回歸水量은 생공용수는 65 %, 관개용수는 50 %로 하였다. 순 취수량은 총 직접 취수량에서 총 직접 취수량에서 회귀수량을 회귀지점에서 공제하여 산출하였다.

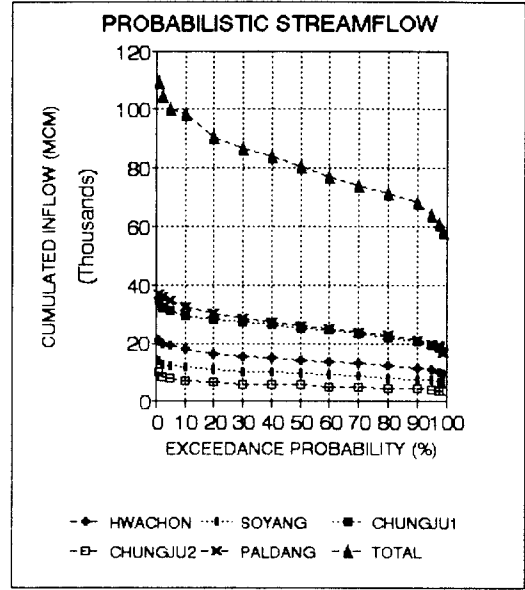
Table 1. Minimum Desired and Required Flows at the Major Control Points

Control Points	Min Required Flow		Min Desired Flow	
	CMS	MCM/M	CMS	MCM/M
North Han				
Hwacheon Dam	7.1	18.7	15.0	39.4
Soyanggag Dam	5.0	13.1	38.3	100.7
South Han				
Chungju Main Dam	10.6	28.0	18.0	47.3
Chungju R/R Dam	13.3	35.0	29.0	76.3
Han River				
Paldang Dam	75.0	197.0	200.0	525.6
Goan Gage	75.0	197.0	200.0	525.6

발전량 산정을 위한 저류상태 및 단위 발전 방류량에 따른 水頭와 전력생산 공식은 저수지 저류 상태를 독립변수로 하여 회귀분석 결과에 따라 사용하였으며 回歸式과 回歸係數는 參考文獻 (高錫九/韓國大댐會, 1990)에 수록되어 있다. 또한 한강수계 시스템 모형에서 고려하고 있는 다섯개 댐 지점에 대한 유입량 자료는 1917년부터 1940년까지의 유하량 자료와 1968년부터 1988년까지의 월별유하량 자료를 이용하였으며, 주요지점의 자기 유하량 통계분석 결과도 위의 문장에 수록되어 있다. 複數地點에 대한 월별 유하량 자료는 Salas 등 (1980)이 제안한 季節型 自己 回歸 模型인 MPAR (1) (multivariate auto-regressive lag-1 model with periodic parameters)을 高錫九等 (1992)에 의하여 汎用으로 개발된 프로그램을 사용하여 각 분석지점에 대한 월별의 모의 유하량 자료를 발생시켜 분석에 이용하였다.



(a) Duration : 1Year



(b) Duration : 5Year

Fig. 3 Probabilistic Natural Streamflow at Paldang Dam Site

4.2 轉移函數의 近似評價

복수지점에 대한 유입량 자료 모의발생 모형에 의해서 5개 지점에 대한 1,000년 동안의 월별 유하량 자료를 발생하였으며, 발생된 모의자료로부터 확률별 대표 유하량 Series를 산정하기 위한 기준은 식 (1)~(4)에 의거 산정되는 목적함수에 따라 결정되기 때문에 陽解法 (explicit solution)으로는 곤란하다. 그러나 모의 발생자료로부터 離散化된 초과 확률별 대표 유하량 Series를 가정된 基準函數에 따라 분류 (sorting)한 후 목적함수를 산정하여 보다 바람직한 전이함수를 陰解法 (implicit method)으로 평가할 수 있다.

식 (8)은 확률밀도함수 대신에 초과확률 또는 신뢰도를 고려할 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x) = H\{G(x)\} | \xi_{n(x)} \quad (9)$$

여기서  $F(x)$ ,  $G(x)$  및  $H(\cdot)$ 는 식 (8)에서 확률 밀도함수로 정의된  $f(x)$ ,  $g(x)$  및  $h(\cdot)$  대신

에 누가확률 (cumulative density function)로 나타난 것이다. 또한 한강수계 5개 저수지군으로부터 기대 발전량 산정을 위한 Monte Carlo기법 간소화의 전이함수인 식(9)의 음해학적 해석에 있어  $G(x)$ 는 유역내에 고려하는 각 저수지의 기간중 누가 자기 유입량의 합계에 대한 초과 확률 함수로 고려하였다.

또한 함수  $H(\cdot)$ 는  $G(x)$ 에서 고려했던 총 유입량에 부가하여 년간 월 유입량의 幾何平均, 각저수지의 有效 저수용량, 수력발전 시설용량, 유입량의 표준편차 및 홍수기 유입량과 같은 여러 인자중 1개 또는 몇개를 조합으로  $G(x)$ 에 추가하여 試行錯誤에 의해서 근사해석을 시도하였다. 이때 유입량은  $G(x)$ 의 초과확률 순위에 따라 고유의 값으로 이동하게 된다.

채택된 MPAR(1)에 의해서 5개의 複數地點에 대한 1,000년 동안의 월별 모의 발생자료를  $G(x)$ 의 초과확률 함수에 따른 지속 기간별 총 유하량을 Weibull의 Plotting Position에 의한 분류 결과가 Fig. 3에 나타나 있다.

4.3 適用結果 分析

離散化된  $G(x)$ 의 초과 확률 함수에 따라 분류된 Fig. 3의 지속 기간별, 빈도별, 월별 유입량 자료에 따라 식 (1)~(4)에 의한 한강수계 5개 저수지군을 동적계획기법에 의거 최적 운영한 결과의 연간 발전량이 Fig. 4에 나타나 있다. 최적 연계 운영시 용수공급의 다목적 함수로 고려되었던 식 (4)의  $\epsilon_i$ 의 값은 표의 최소 희망 유하량 값을 적용하였다.

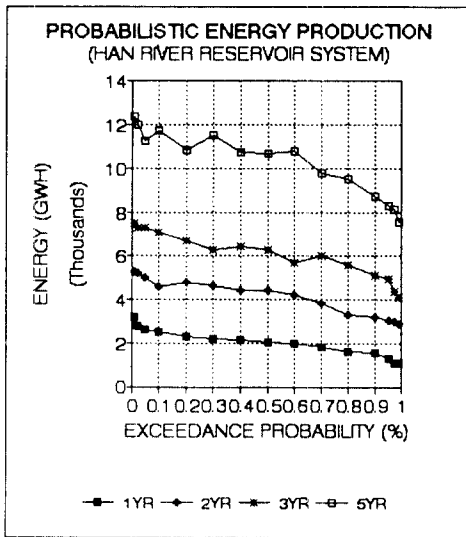


Fig. 4 Probabilistic Energy Output According to the Preprocessed Inflow Series

Table 2 Regression Coefficients of Expected Benefit Considering Exceedance Probability

Cases	Criteria for Exceedance Probability	Regression, R
1	누가 유입량	0.8424
2	년간 월유입량의 기하평균	0.8663
3	총 유입량 + 유효 저수용량	0.8747
4	총 유입량 + 발전시설용량	0.8635
5	총 유입량 - 유입량 표준편차	0.8644
6	총 유입량 - 홍수기 유입량	0.9172
7	총 유입량 + 유효 저수용량 - 유입량 표준편차	0.9078

Fig. 4는 발전량이 누가 유입량을 보여주는 Fig. 3과 같이 이상적으로 분포되어 있지는 않으나 상당히 유사하게 분포되어 있음을 보여준다. 분포의 유사성을 증대시키기 위해서 총 누가 자기 유입량에 부가하여 앞절에서 언급했던 다른 요소들을 +1 또는 -1의 가중치를 고려하여 산정한 결과가 Table 2 및 Fig. 5에 나타나 있다.

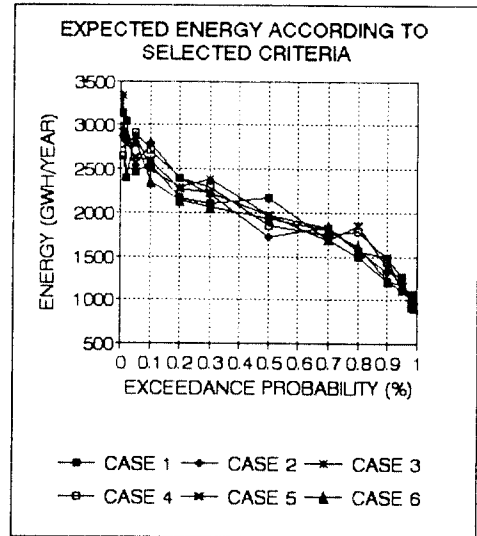
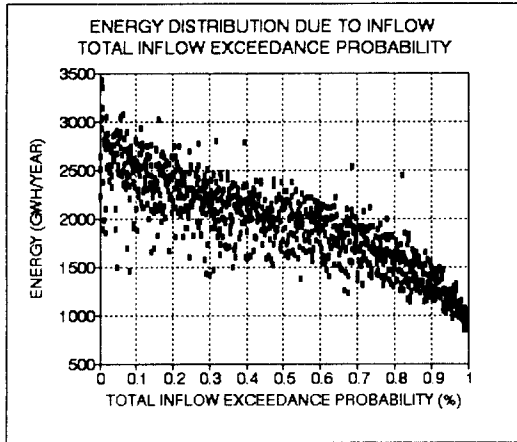


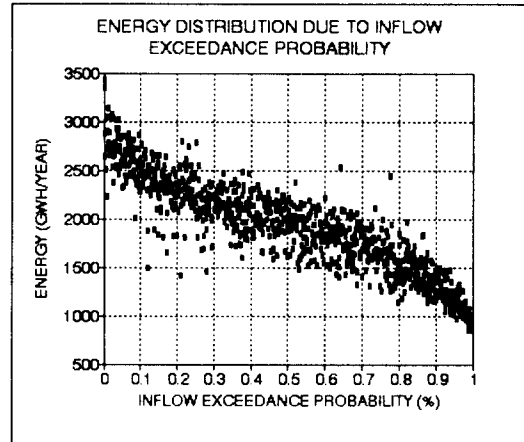
Fig. 5 Distribution of Expected Benefit According to the Selected Criteria

한편 Fig. 6에는 1000년 동안의 모의발생 확률을 이용하여 순수 Monte Carlo 기법을 적용하여 유입량의 신뢰도 수준에 따른 시스템으로부터 용수 수요를 충족하면서 발전 편익을 극대화시킨 결과를 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 6의 (a)는 Table 2의 CASE 1에 따라 분류된 초과 확률을 나타내며, Fig. 6의 (b)는 Table 2의 CASE 6에 따라 분류된 초과 확률을 나타낸다. 이 그림이 보여주듯이 그림(b)의 분포가 그림(a)보다 分散이 적음을 알 수 있다.

따라서 추계학적 특성을 갖고있는 저수지 유입량의 확률 특성을 고려하면서 Monte Carlo 기법을 이용하여 저수지 시스템으로부터 신뢰도나 위험도 등을 고려한 기대편익을 산정함에 있어서는 유입량



(a) CASE 1



(b) CASE 6

Fig. 6 Energy Distribution According to the Monte Carlo Technique

의 특성을 시스템의 물리적 특성이나 운영 목적에 따라 전처리함으로써 보다 신뢰성 있는 분석이 가능하다. 또한 이러한 신뢰성있는 전처리 과정을 기침으로써 모의 발생된 모든 자료를 분석하는 대신에 대표성있는 자료만을 선정하여 분석함으로써 계산량을 대폭줄일 수 있다.

## 5. 結 論

저수지의 중·장기 운영계획에 있어서는 저수지 유입량과 같은 수문학적 불확실성을 특히 고려하여야 한다. 이러한 불확실성으로부터 기인되는 위험도나 신뢰도등을 직접 고려할 수 있는 Monte Carlo 기법과 같은 추계학적 분석기법은 많은 량의 계산을 필요로 한다. 또한 한강 수계내의 여러개 저수지 시스템으로부터 수력발전 최적화를 포함할 때에는 문제의 非線形性 및 非볼록성으로 더욱 계산상의 어려움이 추가된다.

따라서 Monte Carlo기법을 이용하여 저수지군의 연계 최적운영으로부터 신뢰도를 감안한 수력발전량과 같은 편익을 산정하기 위해서는 매우 많은 계산과 분석이 요구되나 유입량 자료를 시스템으로부터의 목적함수 특성을 고려하여 사전에 분류함

으로서 離散化된 신뢰도 수준에 따른 대표성 있는 유입량만을 분석함으로써 Monte Carlo기법을 간략화할 수 있다.

간략화된 기법을 이용하여 한강수계내의 5개 저수지 시스템으로부터 신뢰도 수준별 발전편익 산정을 위하여 장기간 모의 발생된 각 저수지의 유입량 Series를 사전 분류하는 기준으로 운영기간중 유역내의 총 누가 유입량 뿐아니라 기간중 유입량의 분포상태나 저수지의 유효 저수용량 및 발전 시설용량 등을 각각 감안한바 유입량의 크기만을 고려하는 경우보다 분포의 신뢰도 수준이 향상되었다. 특히 기간중 유역내의 총 누계 유입량에 부가하여 홍수기 동안의 유입량을 감안하였을 경우에는 이산화된 신뢰도 수준별 발전편익의 분포가 매우 만족할 만한 수준이었으며, 이러한 요소들을 모두 동시에 고려할 경우 고려하는 인자들의 가중치 선정에 따라 분포의 신뢰성이 보다 향상될 수 있겠다.

이와같은 기법은 중·장기 계획을 위한 저수지 운영에 있어 지금까지 주로 사용되어 왔던 Monte Carlo기법이나 신뢰도 분석기법등 추계학적 분석기법의 복잡성을 감안하여 보다 적은 계산과 노력으로 신뢰도나 위험도 수준별 기대편익을 산정하는



데 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Askew, A. J. (1974), "Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of a Reliability Constraint", *Water Resources Research*, Vol.10, No.1, pp.51-56, February.
2. Askew, A. J., W. W-G. Yeh, and W. A. Hall (1971), "Use of Monte Carlo Techniques in the Design and Operation of a Multipurpose Reservoir System", *Water Resources Research*, Vol.7, No.4, pp.819-826, August.
3. Colorni, A., and G. Fronza (1976), "Reservoir Management via Reliability Programming", *Water Resources Research*, Vol.12, No.1, pp.85-88, February.
4. Creley, T. E. and K. N. R. Rao (1979), "Multiobjective Risks in Reservoir Operation", *Water Resources Research*, Vol.15, No.4, pp.807-814, August.
5. Fiering, M. B. (1961), "Queuing Theory and Simulation in Reservoir Design", *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civil Eng.*, 87(HY6), pp.39-69.
6. Haimes, Y. Y., D. A. Wismer, and L. S. Larsdon (1971), "On Bicriterion Formulation of Integrated System Identification and System Optimization", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.SMC-1, pp.296-297, July.
7. Hogan, A. J., J. G. Morris, and H. E. Thompson (1981), "Decision Problems under Risk and Chance Constrained Programming: Dilemmas in the Transition", *Management Science*, Vol.27, No.6, pp.698-716.
8. Hufschmidt, M., and M. Fiering (1966), *Simulation Techniques for Design of Water Resources Systems*, Harvard University Press, pp.212, Cambridge, Massachusetts.
9. Ko, Seok-ku, D. G. Fontane, and J. W. Labadie (1992), "Multiobjective Optimization of Reservoir Systems Operation", *AWRA Water Resources Bulletin*, Vol.28, No.1, January/February.
10. Loucks, D. P., Z. J. R. Stedinger, and D. A. Haith (1981), "Water Resources Systems Planning and Analysis", Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, N.J.
11. McGrath, E. J., and D. C. Irving (1973), "Techniques for Efficient Monte Carlo Simulation", Office of Naval Res. Reso. AD 762 721-723 (3 Volumes) (Springfield, Va: Natl. Tech. Inform. Serv.), pp.408.
12. ReVelle, C. E. Joeres, and W. Kirby (1969), "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 1. Development of the Stochastic Model", *Water Resources Research*, Vol.5, No.4, pp.767-777, August.
13. Salas, J. D., J. W. Delleur, V. Yevjevich, and W. L. Lane (1980), *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resources Publications, Fort Collins, CO.
14. Willis, R., B. A. Finney, and Chu. W. S. (1984), "Monte Carlo Optimization for Reservoir Operation", *Water Resources Research*, Vol.20, No.9, pp.1177-1182, September.
15. Young, G.K. (1967), "Finding Reservoir Operating Rules", *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civil Eng.*, 93(HY6), pp.297-321.
16. 高 錫九 (1990), "信賴度를 고려한 漢江水系 貯水池群의 最適 運營", 제10회 한국대담학회 학술 발표회 논문집.
17. 高 錫九, 高 益煥, 李 光晚 (1992), "河川流量的 模擬發生을 위한 PC 基盤 綜合 SOFTWARE PACKAGE 開發 (AR 모형을 중심으로)", 대한토목학회 1992년도 학술 발표회 개요집(II).
18. 産業基地開發公社 (1986), 全國 水資源 利用現況 및 需要調查 報告書.
19. 産業基地開發公社 (1988), 漢江舟運計劃 妥當性 調査 中間報告書, 미공병단.
20. 韓國水資源公社 (1992), 水道施設現況.

〈접수 : 3월 4일〉