

# 水量 및 水質을 考慮한 貯水池群의 綜合管理

## Water Quantity and Quality Management Through A Multiple Reservoir System

高錫九\* · 金修三\*\* · 李光晚\*\*\* · 李基宗\*\*\*\*

Ko, Seok Ku · Kim, Soo Sam · Lee, Kwang Man · Lee, Ki Jong

### Abstract

The quantity point has been considered prior to the quality point in the water resources development and management. However, the quality problems have become as important as quantity problems due to the industrialization and civilization.

This paper presents a methodology of the integrated management of multiple reservoir systems by considering both water quantity and quality problems. It also presents a long-term forecasting technique of reservoir water quality by using the developed phosphorous model. The methodology was applied to the Han river reservoirs operation, in which five major reservoirs were considered. The result shows that the spatially and temporally distributed water quantity and quality resources can be utilized by meeting all the required constraints.

### 요 지

수자원의 개발 및 관리 문제에 있어 양적인 문제가 질적인 문제에 우선하여 왔으나 산업화와 생활수준의 향상에 따라 질적인 문제도 量적인 문제만큼 중요하게 되었다.

본 연구에서는 수량과 수질문제를 동시에 고려하면서 수계내의 저수지 시스템을 종합관리하는 방안을 제시하며, 개발된 磷收支 模型에 따라 저수지 수질을 장기예측하는 기법도 제시한다. 개발된 기법은 5개의 저수지 운영을 감안한 한강 유역의 저수지군 관리에 적용하였으며, 적용 결과 수량적인 면과 수질적인 면에 있어 시간과 공간적으로 편기된 수자원을 모든 制約 條件을 만족시키면서 활용할 수 있다는 것을 입증하였다.

### 1. 緒 論

일반적으로 수계내의 저수지 시스템은 용수공급, 수력발전 및 홍수조절등 水量的인 측면에서 1개 이상의 몇 가지 기능을 갖도록 계획되어 운영되고 있으나 인구증가 및 산업화와 더불어 水質的인 문제가 水量的인 기능에 부가되어 중요한 문제로 대

\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구실 책임연구원, 공학박사

\*\* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구실연구원, 중앙대 박사과정

\*\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 환경관리처과장, 단국대 박사과정

두되고 있다. 그러나 저수지 및 湖沼의 水質을 보호 관리하거나 수질을 복원하기 위한 문제는 水量 管理 문제에 비교하면 아직 초보적인 단계이며, 과학의 새로운 분야에 속한다. 선진공업국이나 개발도상국에서 지난 수 년간 많은 돈을 투자하여 下水處理場의 건설과 産業 廢棄 用水의 저수지 유입을 방지하고, 國土 管理法의 제정 및 연구개발 등을 수행하였으나 저수지의 수질은 크게 향상되지 않았으며 오히려 汚染이 심화되어 점차 심각한 단계에 이르고 있다.

호소의 富營養化는 가장 보편적인 수질 관리 문제이며, 과다한 植物 營養素인 유기물질과 流砂 등의 유입으로 藻類와 有根 植物이 급증하여 생활 및 공업용수와 관개용수의 용수원으로서의 물의 가치를 상실할 뿐 아니라, 호소의 미적인 면이 없어지고 휴식이나 여가 선용으로도 부적합한 상태가 된다. 또한 조류의 水花 現狀(algae blooms)이나 유독성 냄새 등의 증세는 음용수의 수질뿐 아니라 어육을 오염시키고 溶存酸素의 부족으로 물고기의 폐 죽음을 야기하며, 붕어 등 弊性魚群을 증대시킨다. 이로 인해서 음용수의 처리비가 증가하게 되며 여가 산업이 위축되거나 이를 대체할 수 있는 새로운 저수지를 건설하여야 한다.

저수지의 최적운용을 포함한 수계의 양적관리는 1960년대 이래 수 많은 연구가 계속되어 왔으며<sup>(10)</sup> 수질적인 문제도 1970년대부터 연구가 본격 추진되어 왔다.<sup>(11)</sup> 그러나 수량적인 면과 수질적인 면을 동시에 고려하면서 수계내의 저수지를 종합 관리하는 연구는 교과서적인 범주를 벗어나지 못한 것으로 보이며, 국내에서는 이러한 연구가 아직 없는 실정이다.

본 논고에서는 수계내의 저수지 시스템 운영에 있어 시스템에 주어진 기능을 충족시키면서 기대편익을 증대시킬 수 있는 水量 管理 方案과 수계내의 저수지 시스템에 대한 長期 水質 豫測과 더불어 물의 질적인 측면에서 유역내에 서로 편기된 수자원을 효율적으로 배분하여 용수공급 지점에서 수량 및 수질기준을 유지할 수 있는 방안을 제시코져 한다.

## 2. 貯水池의 水質 豫測 模型

저수지(湖沼 포함)의 水理 현상은 비교적 긴 滯留 時間의 영향으로 임의성이 강한 특성을 갖으며, 체

류시간이 길수록 바람이나 온도의 영향에 따라 흐름이 결정된다. 그러나 저수지내의 영양성분의 이동을 나타내는 數學 模型이 1960년대 초부터 사용되기 시작하였으며, 環境 成分 要素의 평형을 나타내는 CFSTR(continuous-flow stirred-tank reactor) 모형이 대표적인 Input-Output 平衡 方程式이다.

Biffi<sup>(2)</sup>는 이러한 개념을 이용하여 저수지내의 화학성분 요소의 평형 방정식을 처음 사용하였는데 그의 이론을 이용하면 시간의 변화에 따른 저수지의 수질변화 등을 예측할 수 있다. 이 모형에서는 저수지내의 수질분포상태 및 흐름이 일정하다고 가정하고 유입하는 유입수 및 유입성분이 즉시 저수지내로 擴散되어 일정하게 분포된다고 가정하여 저수지로부터 방류되는 성분의 수질분포는 저수지내의 어떠한 지점의 수질과도 동일하다는 전제하에서 사용하여야 한다. 이러한 가정하에서 CFSTR 모형에 의한 수질성분 "a"에 대한 평형방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dC_a}{dt}V = Q C_{ai} - Q C_a + r_a V \quad (1)$$

여기서,  $C_a$ 는 저수지내의 "a" 성분 濃度(ppm)이며,  $V$ 는 저수지의 저류량( $m^3$ )이고,  $Q$ 는 저수지내로 유입하여 방류되는 유하량( $m^3/s$ ),  $C_{ai}$ 는 저수지내로 유입하는 유입수의 "a" 성분농도(ppm),  $r_a$ 는 저수지내에서 "a"성분의 反應 速度(ppm/s)이다.

식 (1)의 좌측항은 "a" 성분요소가 시간에 따라 저수지에 집적되는 양의 변화를 나타내며, 우측의 제 1항은 단위시간 동안에 유입수에 포함된 "a" 성분요소의 유입량을, 제 2항은 유출량을 나타내고, 제 3항은 저수지 내에서의 화학작용 등에 따라 증가되는 양을 나타낸다. 우측의 제 3항 요소중 반응속도는 저수지내의 "a" 성분농도에 따라 線型으로 증가(또는 감소)된다고 보면 반응속도  $r_a$ 는 반응속도상수  $k$ 와 성분농도와의 乘인  $k C_a$ 로 볼 수 있으며, 식 (1)에 대입한 후 적분하면 다음 식과 같다.

$$C_a = \frac{C_{ai}(1 - e^{-(1 - k\theta_T)/\theta_T})}{1 - k\theta_T} \quad (2)$$

여기서  $\theta_T$ 는 저수지의 평균 水理 遲滯 時間으로써  $V/Q$ 이며 시간의 차원을 갖는다. 식 (2)에서 반응속도계수가 "0"일 경우,  $t/\theta_T = 5$ 에서 저수지의 수질이

유입수 수질과 거의 같아짐을 알 수 있다. 따라서 저수지 내에서 수질변화를 일으킬 수 있는 요소가 없다고 하더라도 상류에서 유입하는 유입수의 수질이 일정할 경우 저수지 滯留 時間의 5배에 이르면 저수지의 수질이 유입수의 수질과 거의 같아짐을 알 수 있다.

저수지(湖沼 포함)의 부영양화는 일반적으로 호수 생물인 식물 플랑크톤의 생장에 제한 영양염으로 작용하는 인의 증가로 야기되며, 많은 학자들이 인 농도를 지표의 한 부분으로 사용하였으며, Lerman<sup>(5)</sup>은 총 인농도를 기준으로 하였다. 인 모형은 저수지나 호소의 부영양화 상태를 평가할 수 있는 가장 중요한 요소중의 하나로써 Vollenweider<sup>(6)</sup>의 기본 모형인 CFSTR 모형의 평형방정식을 저수지 내의 인(P) 수치모형에 적용하였다. 이 모형에서는 유입수에 포함되는 인 유입량과 방류수에 포함되어 배출되는 인 유출량뿐 아니라 저수지내의 堆砂에 흡착되어 침강되는 인 손실 부분과 저수지내의 양어장이나 여가 활동 등에 따라 직접 투입되는 인 증가부분의 4개항으로 구분하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_c}{dt} V = Q P_i - Q P_c - k_1 P_c V + (1 - k_2) W_p \quad (3)$$

인증가    인유입    인유출    인손실    인투입

여기서,  $P_c$ 는 저수지내의 인 성분농도( $ML^{-3}$ );  $P_i$ 는 저수지로 유입하는 유입수의 인농도( $ML^{-3}$ );  $W_p$ 는 양어장에서 사료의 사용 등 저수지내의 활동에 의해서 직접 투입되는 인의 량( $MT^{-1}$ );  $Q$ 는 저수지내로 유입하는 유입량( $L^3 T^{-1}$ );  $V$ 는 저수지의 저류량( $L^3$ );  $k_1$ 는 저수지 堆砂에 흡착되어 침강되는 인 손실율( $T^{-1}$ );  $k_2$ 는 직접 투입되는 인의 침전 등에 따른 손실율(dimensionless)이며,  $t$ 는 시간(T)이다. 식 (3)의 常微分 방정식을  $t=0$ 에서  $P_c=0$  및  $t=t$ 에서  $P_c=P_t$ 의 조건으로 적분 하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_c = \frac{[P_i + W_p(1 - k_2)/Q] \{1 - e^{-\left(\frac{1}{\theta_T} + k_1\right)t}\}}{1 + k_1\theta_T} \quad (4)$$

여기서,  $\theta_T$ 는  $V/Q$ 로써 지체 시간을 나타낸다. 식 (4)는 모든 함수들이 상수라고 가정한 결과에 의해서 도출되었으나 실제의 인 收支를 산정하는 저수지의

수질 예측모형에 있어서는 流入水나 인 투하량 등 모든 입력자료를 시간의 연속함수로 나타내기에는 거의 불가능하다. 따라서 식 (3)을 수치해석방법으로 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{P_{ct+1} - P_{ct}}{\Delta t} V = Q_t P_{it} - 0.5 Q_t (P_{ct+1} + P_{ct}) - 0.5 k_1 V (P_{ct+1} + P_{ct}) + (1 - k_2) W_{pt} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{ct+1} (1.0 + 0.5 \frac{Q_t}{V} \Delta t + 0.5 k_1 \Delta t) \\ = P_{ct} (1.0 - 0.5 \frac{Q_t}{V} \Delta t - 0.5 k_1 \Delta t) + \frac{Q_t P_{it}}{V} \Delta t \\ + \frac{1.0 - k_2}{V} W_{pt} \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $I_t$ 는  $Q_t \Delta t$ (단위기간 동안의 유입량,  $L^3$ )이며,  $C_1$ 은  $k_1 \Delta t$ (인 손실율, dimensionless)이고,  $P_{it}$ 는  $W_{pt} \Delta t$ (단위기간 동안의 인 투입량, M) 이므로, 식 (6)는 다음과 같이 된다.

$$P_{ct+1} = \frac{(1.0 - 0.5 C_1)V - 0.5 I_t}{(1.0 + 0.5 C_1)V + 0.5 I_t} P_{ct} + \frac{I_t P_{it} + (1.0 - k_2) P_{it}}{(1.0 + 0.5 C_1)V + 0.5 I_t} \quad (7)$$

따라서 일별이나 월별 등 단위기간별로 산정된 유입량이나 저수지 내의 인 투입량 및 손실율 등의 자료를 적용하여 순차적으로 식 (7)을 사용하면 필요한 시기의 저수지의 인 농도를 예측할 수 있다.

### 3. 水量 및 水質 綜合 管理 模型

#### 3.1 水量管理의 最適化

동일 수계내에 直列 및 並列의 조합으로 연결된 복합 다목적 저수지 시스템의 운영에 있어서는 여러개(2개 이상)의 目的 函數를 동시에 고려할 필요가 있을 때가 있으며, 예로써 利水 目的을 위한 저수지 운영에 있어 制御 地點에서 용수공급량을 증대시키면서 기간 중 시스템으로부터의 발전량을 증대시키는 경우 등이다. 이러한 다목적 함수문제는 일반적으로 제어 지점에서의 유하량을 용수 소요량 이상으로 제약한 후 발전량만을 극대화 하는 단일 목적함수로 처리할 수 있다.

$$F = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(X_{it}, X_{it+1}, Q_{it}) \quad (8)$$

Subject To :

$$X_{t+1} = X_t + I_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - D_t + C_t Q_t \quad (9)$$

$$X_t \min \leq X_t \leq X_t \max \quad (10)$$

$$Q_t \min \leq Q_t \leq Q_t \max \quad (11)$$

for  $t=1, \dots, T$

여기서, N은 저수지(발전소)의 수이며, T는 저수지 운영기간이다.  $f(\cdot)$ 는 발전량을 나타내는 함수이며,  $X_t$ 는 저수지의 기간 초 저류량을 나타내는 Vector이며,  $I_t$ 는 기간 t에 있어서 유입량이고,  $Q_t$ 는 저수지로부터의 방류량이다. 또한  $E_t$ 는 저수지 수면 증발율을 나타내는 Vector이고,  $D_t$ 는 댐 상류에서의 純 導水量 Vector이며, C는 수계내의 저수지가 直列 또는 並列로 연결된 상태를 나타내는 시스템 構成 行列을 나타낸다.

위 제약 조건중 식 (9)는 저수지 내로 유입하거나 저수지 밖으로 나가는 물수급의 균형을 나타내는 시스템 상태방정식이며, 식 (10)의 제약조건은 각 저수지가 유지하여야 할 기간별 허용 최대 및 최소 貯留量 등을 나타내고, 식 (11)의 제약조건은 각 댐 직하류에서의 최소 保障 유하량과 하천의 通水 能力 등을 감안한 허용 유하량에 따라 결정된다.

### 3.2 水量 및 水質을 考慮한 貯水池群의 連繫 運轉

수량과 수질관리를 위한 저수지군의 연계운영에 있어서는 제어 지점에서의 수량 및 수질기준을 충족시키면서 저수지 운영에 따른 상태방정식 및 환경기준 평형방정식 등 제반 제약조건을 만족하고 운영기간 동안에 기대되는 발전 편익 등의 목적함수 값을 극대화시킬 수 있어야 한다. 따라서 목적함수는 식 (8)과 동일하며 제약조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_1(X_t, X_{t+1}, Q_t) = 0.0 \quad (12)$$

$$G_2(Q_t, C_t) = 0.0 \quad (13)$$

$$G_3(Q_t, C_t) = 0.0 \quad (14)$$

$$X_{t+1} \leq V_{t+1} \quad (15)$$

$$Q_t \leq U_t \quad (16)$$

for  $t=1, \dots, T$

여기서, 식 (8)의 목적함수 F는 N개의 저수지로부터 단위기간 t동안에  $Q_{it}$ 의 방류량에 의하여 발생되는 목적함수  $f_i(\cdot)$ 의 값을 전기간 T까지의 누계값 편익을 극대화하는 것이다.  $X_{t+1}$ 은 저수지의 기간말 저류량을 나타내는 Vector이며,  $Q_t$ 는 저수지로부터 단위기간 동안의 방류량을 나타내는 Vector이다. 식 (12)의  $G_1(\cdot)$ 은 식 (9)와 같은 시스템 상태방정식으로써 유입량 및 방류량 등에 따라 단위기간 동안의 저수지 저류량의 변화를 나타내는 제약조건이다. 식 (13)의  $G_2(\cdot)$ 는 直列 및 並列로 연결된 상류 저수지로부터의 방류량에 포함되어 제어지점에 유입하는 環境 濃度  $C_t$ 의 평형방정식을 나타내며, 식 (14)의  $G_3(\cdot)$ 는 방류량에 포함된 환경 농도 값이 河道를 따라 유하할 때 변화되는 溶存 酸素나 BOD 등의 수질변화 방정식을 나타낸다. 식 (15) 및 식 (16)은 각 저수지의 저류량과 방류량의 상한값 및 하한값을 나타내는 제약조건이다.

## 4. 適用 事例 및 考察

### 4.1 適用 概要

수량 및 수질관리를 고려한 저수지군의 연계 운영기법을 漢江 유역의 주요 저수지 운영에 적용하였다. 한강유역에는 수력발전소가 있는 저수지가 10개소가 있으며, 이 중에서 昭陽 및 忠州 본댐 등 대용량 다목적 저수지 2개소와 1개의 Flow-Through 댐인 충주 조정지댐은 韓國 水資源 公社(KOWACO)에서 건설하여 관리하고 있고, 그 밖의 1개의 대용량 저수지인 華川댐과 春川댐, 衣岩댐, 淸平댐, 槐山댐, 道峯댐 및 八堂댐 등 다른 6개소의 소규모 저수지들은 韓國電力公社(KEPCO)에서 운영관리하고 있다.

이번 연구를 위해서 다목적 저수지들에 비해서 규모가 상당히 적어 Flow-Through-Reservoir로 간주될 수 있으며, 한국전력공사에서 운영하는 소규모 댐들은 Case Study 대상에서 제외시켰다. 그러나 팔당댐은 수도권 지역에 대한 용수 공급원으로 매우 중요한 역할을 하기 때문에 다른 다목적댐들과 같이 수질 및 수량 관리를 위한 저수지 연계운영의 고

려대상에 포함시켰으며, 적용된 댐들에 대한 제원 및 세부내용은 참고문헌<sup>(11)</sup>에 나타나 있다.

#### 4.2 模 型에 의한 水質 豫測

제 2장에서 고려한 인 수지모형을 이용하면 저수지의 수질을 예측할 수 있는데 이 모형을 사용하기 위해서는 저수지의 저수용량 및 유입량 등의 水文學的 입력자료와 유입 인 負荷量 산정을 위한 많은 환경관계 입력자료가 필요하다. 水文 자료 및 저수지 자료로는 예측 목표년도 까지의 일별 또는 월별 유입량 및 각 저수지의 저수용량 자료가 필요하며, 환경관계 입력자료로는 년도별 유입량 대 인농도 相關 조사성과, 일별 또는 월별 예측 유입량에 대한 추정 인농도, 저수지 堆砂에 흡착되는 인손실율 및 목표 년도까지 일별 또는 월별 저수지에 직접 투입되는 糞 자료가 필요하다. 내수면 양식장 관계 입력자료로는 양식장 설치면적 및 운영기간, 양식 어종 및 사료의 종류와 투입량, 사료의 인 함량 및 魚類 흡수량, 사료의 침전량 및 可溶性 인 비율, 침전 인으로부터의 재 용출량 및 사료 증식계수(사료 투여 乾 중량/어류 생산 濕 중량) 등이 필요하다.

이와 같은 자료들의 대부분은 장기간의 조사와 이의 분석으로부터 산정할 수 있으나 현실적으로 모든 자료를 측정이나 현지조사에 의해서 구한다는 것은 매우 어려운 경우가 많아 특히 우리나라와 같은 경우에는 대부분의 자료가 미측정 또는 미조사 되었거나 측정기간이 짧아 그 신뢰성이 매우 낮다. 본 연구를 위한 주요 환경관계 입력자료로는 참고 문헌<sup>(12)</sup>에 나타나 있으며, 기타 자료는 가정이나 추정에 의하여 적용하였다. 이러한 조건하에서 한강 수계 주요 저수지에 대한 인 농도 추정을 식 (7)에 의해서 수행하였으며, 내수면 양식장의 존속기간, 사료의 인 함량 및 유입수의 추정 인 농도에 따라

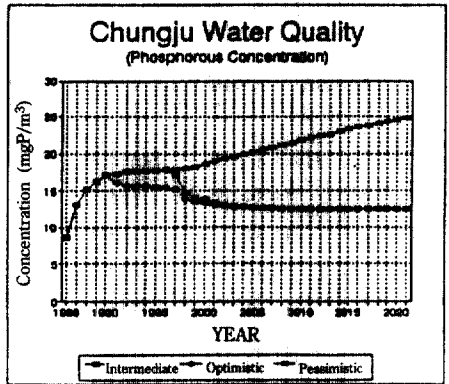
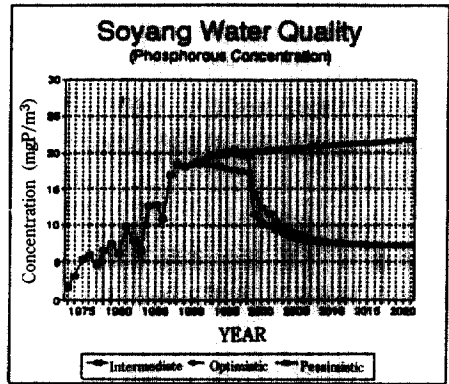
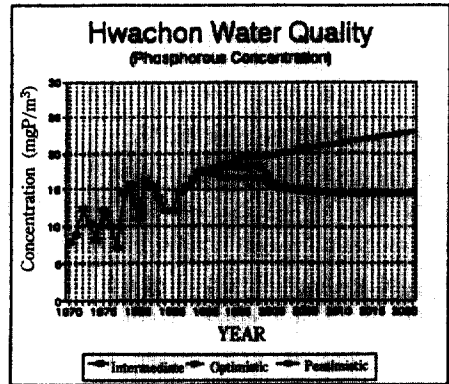


그림 1. Forecasted Results of the Phosphorous Concentration

표 1. Assumed Conditions for Reservoir Water Quality Forecasting

Conditions	Phosphorous Content of Surface Inflow	Duration of Fish Farm	Phosphorous Content of Fish Feed
Optimistic	1990 Level	No Renewal after after Expiration of Current Permits	1.0%
Intermediate	1990 Level	No Renewal after after Expiration of Current Permits	1.8%
Pessimistic	Increase at the Rate of 1990 Level	Renewal of all Permits	1.8%

Table 1과 같이 3가지의 조건으로 구분하였다. 한편, 하천 유입수의 인 농도는 상류에 위치한 도시규모와 경작지, 축산업의 형태 등에 따라 개략 조사된 결과를 토대로 추정하여 사용하였다.

위의 입력자료 및 조건을 고려하여 산정된 각 저수지에 대한 인 농도는 그림 1과 같이 예상되며, 내수면 양식장을 현재의 수준으로 존치시킬 경우 Forsberg와 Ryding<sup>(4)</sup>의 저수지 營養化 기준에 의하면 대부분의 저수지가 현재의 中營養 상태에서 점차 악화되어 2020년 이후에는 富營養 상태에 이를 전망이다. 그러나 내수면 양식장을 현재 허가된 기간까지만 존치시키고 허가기간 이후에는 신규면허를 재발급하지 않는다면 대부분의 저수지 수질은 中營養 상태를 유지하다 1990년대 말부터 수질이 개선되어 2000년대 초부터는 貧營養 상태로 수질이 개선될 전망이다.

#### 4.3 水量 및 水質 綜合 管理 模型

저수지의 수질복구 방법으로는 장, 단기대책이 있을 수 있으며, 이의 방법으로써는 營養閾類의 제어기법과 수중 식생물의 제어기법이 있다. 장기적인 복구대책으로는 내수면 양식장의 규제 및 사료의

개선과 아울러 유역으로부터의 영양염류 유입증가를 통제하는 방법 등이다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 단기적인 수질복구대책 중 水量 관리와 직접 관련이 있는 稀釋(dilution)에 의한 개념을 도입하여 유역내의 상류에서 수질적으로 편기된 수자원을 하류의 생·공용수 공급지점에서 수질기준에 알맞도록 水量을 배분하면서 수력발전 등에 미치는 영향을 검토하였다.

식 (8)의 목적 함수와 식 (12)에서 (16)까지 고려했던 수질 및 수량관리 제약조건에 있어 수질기준을 인의 농도로 볼때 저수지로부터 방류된 방류수는 하천을 따라 유하하는 동안 수질이 변화되지 않는다고 가정할 수 있으므로 하천 수질모형인 식 (14)는 고려할 필요가 없다. 따라서 한강수계 5개 저수지의 水質 및 水量 관리모형은 다음과 같다.

$$F = \max \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(X_{it}, X_{it+1}, Q_{it}) \right] \quad (17)$$

Subject To :

$$X_{t+1} = X_t + I_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - D_t + C Q_t \quad (18)$$

$$Q_{pt} \leq Q_p \quad \max \quad (19)$$

표 2. Monthly Phosphorous Concentration & Target Values for the Year of 2000, Case Study

Month	Phosphorous Concentration (mg/m <sup>3</sup> )					Target Value at Paidang
	Hwachon <sup>(1)</sup>	Soyang <sup>(2)</sup>	Chungju 1 <sup>(2)</sup>	Chungju 2 <sup>(3)</sup>	Paldang <sup>(3)</sup>	
1	16.39	11.97	12.48	9.42	15.72	15.00
2	14.61	11.52	13.39	10.23	15.16	〃
3	13.39	11.16	14.63	11.62	15.44	〃
4	13.45	10.94	15.67	12.83	16.87	〃
5	14.29	10.81	16.27	13.48	17.61	〃
6	14.73	10.61	15.98	13.98	17.51	〃
7	22.63	12.71	15.78	14.42	25.40	20.00
8	30.82	14.77	16.14	14.66	26.30	〃
9	30.12	14.65	11.71	10.86	25.42	〃
10	26.18	13.73	10.61	9.72	18.13	15.00
11	22.18	12.70	11.30	9.79	17.64	〃
12	18.93	11.95	11.70	9.70	16.51	〃
Average	19.80	13.80	13.80	11.73	18.98	

(1) Pessimistic Estimation of Phosphorous Concentration

(2) Intermediate Estimation of Phosphorous Concentration

(3) Phosphorous Concentration of Local Inflow

$$X_t \min \leq X_t \leq X_t \max \quad (20)$$

$$Q_t \min \leq Q_t \leq Q_t \max \quad (21)$$

for  $t=1, \dots, T$

여기서,  $Q_t$ 는 각 저수지로부터 방류된 방류량의 인 성분농도를 나타내며, 다른 기호들은 앞에서 정의한 바와 동일하다. 환경관계 제약조건인 식 (19)에 대하여는 목표 년도인 2000년의 월별 저수지 수질 예측 결과(인 농도)를 종합관리 모형의 입력자료로 사용하였으며, 忠州 조정지댐 및 八堂댐은 Flow-Through-Reservoir로 간주할 수 있어 局部 유입량(local inflow)에 대한 인 농도값을 입력자료로 사용하였다. 또한 昭陽, 華川 및 忠州댐에서 방류한 放流水는 八堂댐에서 완전히 혼합된다고 보았고 팔당댐에서 방류한 방류수의 인 농도가 목표 년도에서 설정한 기준치 이하가 되도록 하였다.

Case study는 표 2에 나타난 바와 같이 세가지 조건별로 예측한 각 저수지의 수질예측 결과에 따라 목표 년도의 수질기준 및 용수 수요량을 만족시키면서 발전량을 극대화 하도록 하였다. 이 표에 나타난 입력자료는 식 (7)에 따라 예측한 2000년의 수질예상 결과로써, 소양댐 및 충주댐은 표 1의 수질예측 조건의 중간기준을 사용하였으며 화천댐은 최악의 조건을 적용하였다. 이 표에서 알 수 있듯이 예측한 2000년의 수질상태가 공간 및 시간적으로 서로 편기되어 있다. 또한 유입량 자체도 수계내에서 시간 및 공간으로 서로 다르게 발생하기 때문에 용수공급 지점인 팔당댐 하류에서는 水量的인 문제 외에 水質的인 문제를 고려하여 수량 및 수질을 동시에 제어할 필요가 있다.

일반적으로 저수지의 운영에 있어 수력발전에 대한 목적함수는 非線型이며 Nonconvex 형태의 함수이므로 선형계획기법은 비선형함수를 선형화하기 전에는 직접 사용할 수가 없다. 저수지의 운영과 같이 시간적으로 多段階 분석이 요구되는 최적화문제에 있어서는 Bellman의 離散型 動的 計劃 技法(discrete dynamic programming)이 가장 이론적으로 적합하다고 알려져 있다. 더욱이 목적 함수나 제약조건의 선형, 비선형에 관계없이 동적계획기법은 거의 모든 조건하에서 적용할 수 있기 때문에 유리하다.

위와같은 수질조건에 推計學的方法으로 모의 발

표 3. Simulated Operation Results for Water Quantity and Quality Management (Year of 2000, Han River Reservoirs System)

Exceed. Probability	Annual Energy (GWH)		Water Quality deviation	
	CASE-A	CASE-B	CASE-A	CASE-B
0.010	2699.4	2407.4	9.22	7.51
0.025	2633.8	2149.9	7.35	2.05
0.050	2592.5	2182.7	2.27	0.08
0.100	2600.4	2280.2	3.02	0.03
0.200	2202.9	1926.7	11.68	5.18
0.300	2179.9	2051.9	4.44	1.03
0.400	2134.0	1996.5	4.69	2.64
0.500	1940.5	1877.1	9.19	1.87
0.600	2090.4	2076.1	3.13	0.00
0.700	1826.9	1796.6	3.89	0.01
0.800	1637.6	1599.9	7.07	0.01
0.900	1532.5	1515.6	3.91	0.00
0.950	1339.4	1317.4	6.93	0.00
0.975	1093.0	1069.9	6.66	1.88
0.990	1089.9	1062.6	5.17	0.00

CASE-A: Water Quantity Management Only

CASE-B: Water Quantity and Quality Management

생하여 빈도별로 분류된 1년 지속기간의 유입량 자료에 따라 동적계획기법을 적용하였다. 유입량 자료는 Salas 등<sup>(7)</sup>이 제안한 복수지점에 대한 季節型自己 回歸 模型(multi-variate auto-regressive lag-1 model with periodic parameters)에 의거 汎用으로 개발되어 한강수계를 대상으로 적합성 검증을 완료한 MPAR 모형<sup>(8)</sup>에 의거 5개 지점에 대한 1000년간의 월별 유입량 자료를 모의 발생하여 빈도별로 분류하였다. 빈도별로 분류된 모의 발생 자료에 의한 동적계획기법의 적용에 있어 수질관리를 위한 제약 조건 유무에 따라 시스템으로부터의 발전량과 용수 공급에 미치는 영향을 검토한 결과는 표 3과 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 수량관리에 포함하여 수질 제어시에는 용수공급 지점인 팔당댐에서의 수질(인 농도)이 공급기준 목표에 알맞도록 제어할 수 있다. 그러나 이러한 수질기준을 만족시키기 위해서는 시스템으로부터의 전력량 등의 수량적인 면의 Tradeoff이 불가피하여 진다. 이러한 점을 고려할 때

수계의 통합관리가 바람직하나 관리의 多元化 현실을 고려할 때에는 수량 및 수질의 Tradeoff의 불가피성을 감안하여 관리의 사전 조정이 필수적이다.

## 5. 結 論

본 논고에서는 水量的 수자원 관리에 부가하여 水質 측면을 포함한 수계내의 저수지군을 연계 운영하는 방안을 제시하였다. 이러한 수량 및 수질종합관리 모형은 저수지 수질 예측모형의 예측 결과를 수량 관리자료와 함께 綜合 管理 模型의 입력자료로 사용하여 수량관리 모형에 수질 제약조건을 추가하도록 되어 있다. 수질관리 제약조건으로는 저수지에서 분류한 방류수에 포함된 環境 關係 成分(DO, BOD, 인 농도 등)의 하천 유하에 따른 상태변화와 제어 지점에서의 환경성분의 최대값 또는 최소값의 제한 등을 고려하여야 한다.

이러한 종합관리 모형을 漢江 수계의 5개 주요 저수지의 연계 운영에 적용하였다. 적용 모형에서는 3개의 대용량 저수지에 대한 장기 수질 예측(인 농도) 결과를 이용하여 유역내에 시간과 공간상으로 수량 및 수질적인 면에서 편기된 수자원을 수도권 용수공급 지점에서 수량 및 수질기준에 알맞도록 제어하면서 시스템으로부터 기간 동안의 누계 전력량을 극대화 하도록 하였다. 적용 결과 수질 제약을 하지 않을 경우 연간 상당기간 동안의 용수 공급량이 제어 지점에서의 수질기준(인 농도)을 초과하였으나 수질 제약을 둘 경우에는 어떠한 水文 條件 하에서도 거의 전 기간 동안 수량 및 수질기준을 만족시킬 수 있었으나 시스템으로부터의 발전 편익의 감소가 불가피하였다. 따라서 水系의 통합관리가 곤란할 경우에는 관리 기관간의 사전조정이 필요하다.

본 논고에서는 수질관리 대상을 인 농도에 국한하였으나 그 밖의 溶存 酸素(DO)나 生物學的 酸素 要求量(BOD) 및 水溫 등 여러가지 환경자료를 동시에 고려하여 분석할 수 있도록 체계적인 현지 측정 및 조사와 아울러 모형의 개발이 뒤따라야 하겠다.

Research, Vol.23, No.8, pp.1393-1442, August 1987.

2. Biffi, F., "Determining the Time Factor as a Characteristic Trait in the Self Purifying Power of Lago d'Orta in Relation to a Continual Pollution," 1st, Ven. Sci. Lettl. Arti. 121: pp.131-136, 1963.
3. Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson and P.R. Newroth, "Lake and Reservoir Restoration," Butterworths Publishers, Stoneharm, MA, 1986.
4. Forsberg, C. and S.O. Ryding, "Eutrophication Parameters and Trophic State Indices in 30 Swedish Waste Receiving Lakes," Arch Fur Hydrobiol, 89, pp.189-207, 1980.
5. Lerman, A., "Eutrophication and Water Quality of Lakes: Control by Water Residence Time and Transport to Sediments," Hydrological Science Bulletin XIX, pp.25-33, 1974.
6. Ko, S.K., "Optimizing Reservoir Systems Operation with Multiobjective Decision Analysis," Dissertation Submitted for the Degree of Ph. D., Colorado State University, Fort Collins, Co., 1989.
7. Salas, J.D. and G.G.S. Pegram, "A Seasonal Multivariate Multilag Auto-regressive Model in Hydrology," in Modeling Hydrologic Processes, H. Morel-Seytoux, J.D. Salas, T.G. Sanders, and R.E. Smith(ed.), Water Resources Publications, Fort Collins, CO, 1978.
9. Vollenweider, R.A., "Input-Output Model with Special Reference to the Phosphorous Loading Concept in Limnology," Schweiz. Z. Hydro.37: pp. 53-84, 1975.
10. Yeh, W.W-G, "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review," Water Resources Research, Vol.21, No.12, pp.1797-1818, December 1985.
11. 高錫九, 李光晚, 李基宗, 李翰九, "水量 및 水質을 고려한 貯水池群의 綜合管理," 韓國水資源公社/日本水資源開發公團 제 8회 기술교류 자료, pp.31-63, 한국수자원공사, 1991.
12. 韓國水資源公社, "內水面 養殖場이 水質汚染에 미치는 影響에 관한 研究報告書," 江原大學校 環境研究所, 1991.

(接受 : 1991. 12. 20)

## 參 考 文 獻

1. Beck, M.B., "Water Quality Modeling: A Riview of the Analysis of Uncertainty," Water Resources