

## 貯水池 시스템과 連繫된 펌핑 시스템의 最適 運營 Optimal Operation of Pumping System Connected with Reservoir Systems

이 광 만\* · 이 우 석\* · 유 양 수\*  
Lee, Gwang-Man · Lee, Woo-Seok · Yoo, Yang-Soo

---

### Abstract

The Upper Fenhe Reservoir System studied by KOWACO to supply water to Tai-yuan City, capital of Shanxi Province in China, is a very complicated one. Many reservoirs will be connected serially and it will be operated as a multi-purpose and multi-criteria system because several objectives and appraisal functions are taken into account regarding system operation. For reservoirs in the system, the critical system operation objectives are to minimize water shortage and reservoir sediment. Furthermore the reservoir system will be jointed with a large-scale pumping system, namely Yellow River Diversion Project. The water development cost in the Yellow River Diversion Project is much higher than that of reservoir system, and around the year 2020 the diversion volume will be twice of the surface water available in the Upper Fenhe Basin. In this study, an optimization technique for connecting the system of reservoirs and pumping station was developed to solve a conjunctive system operation problem between the Upper Fenhe Reservoir Systems and the Yellow River Diversion Project. The developed scheme includes a suggestion on the combining methodology of real reservoir system and pumping system using imaginary reservoir concept for the Yellow River Diversion Project, and practical examples to the minimization problem of the Yellow River diversion satisfying other reservoir operation objectives.

---

### 요 지

한국수자원공사가 수행한 중국 산서성 태원시 용수공급원인 분하강 상류 저수지 시스템은 매우 복잡하다. 이곳 저수지 시스템은 여러개의 저수지가 직렬로 연결될 계획이며, 운영에서도 여러가지 목적이나 평가항목을 고려하는 다목적, 다기준 시스템이 될 것이다. 이 시스템에서 주요 저수지 운영목적은 용수부족과 저수지 퇴사량 최소화이나 황하도수사업이라는 대규모 펌핑 시스템과 연계 운영이 필요하다. 황하도수계획에서의 용수개발비는 저수지를 통한 개발비 보다 비싼 편이며, 2020년경의 필요 도수량은 자체 유역으로부터 지표수 공급량의 두배에 이를 것으로 전망된다. 본 연구에서는 분하 상류 저수지 시스템과 황하도수 시스템의 연계 운영문제를 해결하기

---

\* 한국수자원공사 조사계획처

위하여 펌핑-저수지 시스템 최적화 모형을 개발하였다. 연구내용은 황하도수계획과 저수지 시스템의 연계 가능성을 입증하고 황하도수계획을 하나의 가상 저수지화하여 실제 저수지 시스템과 연계하는 방법을 제시하고 있다. 또한 개발된 모형을 이용하여 여러가지 기존의 저수지 운영목적 을 만족시키면서 황하도수량 최소화에 대한 실제 적용 예를 제시하고 있다.

keywords : pumping system, diversion, water supply, reservoir system, dynamic programming

## 1. 서 론

최근 세계 각지에서는 펌핑 시설을 이용한 용수공급 사업이 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라 이들 시스템을 최적으로 관리할 수 있는 연구도 많이 이루어지고 있다. 이와같은 문제에서 최우선적 해결과제는 대규모 시설물 운영에 따르는 비용의 최소화 문제이다. 대부분의 경우 수요와 공급 관계, 유지 관리상의 문제 그리고 펌핑에 소요되는 전력 요금체계 등에 의한 발생비용의 최적관리가 필요하다. 문제해법으로는 필요 수요량을 충족시키면서 운영비용을 최소화하는 방법을 많이 이용한다. 이들 시스템은 예비 용수량 확보 및 공급체계의 돌발적 사고에 대비하기 위하여 용수지를 동시에 운영하는 것이 일반적이다. 이 분야에서 Demoyer와 Horowitz (1975)는 펌핑시설의 운영 최적화를 위해 간단한 수리적 관계를 이용, 동적계획기법으로 문제를 해결하였고, Sterling과 Coulbeck (1975) 그리고 Jolland와 Cohen (1980) 등이 비슷한 문제를 다루었다. Fallside와 Perry (1975)는 용수공급 시스템을 대상으로 비용 최소화를 운영목적으로 하는 모형을 개발하였고, Shimizu (1976)와 Kokata (1977) 등도 동적계획기법을 이용하여 문제를 해결하였다. 국내에서는 Ko 등 (1994)이 구미 용수시스템을 대상으로 적용한 예가 있다.

이와같은 문제들은 주로 공급체계와 수요체계가 직접 연결되는 펌핑시스템을 대상으로 한 경우이다. 그러나 대규모 다목적 저수지 등 기타의 수자원 시설물과 간접 연계되는 경우나 유역외로부터 펌핑시설을 통하여 도수된 물을 자연하천을 통하여 유하시킨 후 용수공급이 이루어지는 경우 등 다양한 형태의 수

자원 시스템 구성이 가능하다. 예를들어 상류지역으로 대규모의 유역변경이 이루어지고 자체 유역의 저수지 시스템과 연계될 경우 펌핑 시스템 및 저수지 시스템이 동시에 최적으로 관리되어야 한다.

다목적 저수지와 펌핑 시스템이 연계될 경우 유역의 수문 조건이나 저수지 수량조건을 고려하여 펌핑 시설로부터 도수량을 조절할 수 있는데 이는 펌핑에 사용되는 전력비용을 절감할 수 있다. 본 연구에서는 대규모 펌핑 시스템과 다목적 저수지군을 최적 연계 운영할 수 있는 방법론을 개발하여 중국 산서성 태원시 용수공급 계획중의 하나인 황하도수사업에 적용하였다. 황하도수사업의 경우 자체 유역의 지표수 공급량을 초과하는 펌핑 시스템이 3개의 대규모 저수지 시스템과 연계될 계획이다. 또한 저수지에서는 퇴사 문제로 인하여 시간 경과에 따라 저수량이 지속적으로 변하고 있으며, 저수지 퇴사관리를 저수지 운영 목적으로 설정하는 경우 펌핑량과 대응관계에 놓이게 된다. 본 연구는 펌핑 시스템을 저수지 시스템과의 연계운동을 위하여 완전한 상태변수로 고려하고자 가상 저수지 기법을 개발하였다. 분석방법으로는 계획된 황하도수사업을 기준으로 저수지 시스템을 운영하는 경우와 유역의 수문 조건을 고려하여 도수량을 조절하는 경우에 대한 결과를 비교하여 펌핑 비용의 절감효과와 이에 대응하는 저수지 퇴사의 영향을 분석하였다.

## 2. 펌핑 시스템과 저수지 시스템의 연계 운영

### 2.1 연계 운영 방법

대규모 펌핑 시스템이 자연 유역으로 도수되어 저수지에 저류될 경우 두 시스템을 연계하는 방법은 개

넘적으로 매우 간단하다. 가장 간단한 방법으로는 저수지 시스템에 대하여 운영목적을 달성케하면서 펌핑 시스템에 의한 도수량을 최소화하면 된다. 또는 간단히 저수지 시스템을 통하여 우선적으로 용수공급을 달성하고 부족분만을 펌핑 시스템으로부터 공급받을 수 있다. 그러나 이와같은 문제는 펌핑 시스템과 저수지 시스템이 일체로 구성되어 있어 도수과정중 하천에서의 누수문제나 저수지 수면 증발, 저수지 바닥을 통한 침투손실 등이 경미하여 고려하지 않는 경우가 대부분이다.

그러나 유역의 지형조건이 半乾燥帶 (semi-arid) 지역이나 석회암 karst 지형으로 구성되어 있을 경우 하천이나 저수지 바닥을 통한 손실을 무시할 수 없는 경우도 있다. 또는 carry-over 형 저수지의 경우 증발 손실이나 침투손실이 수자원 공급계획을 수립하는데 문제가 될 수도 있다. 황하유역의 경우 실제 하천에서의 침투손실이 유량의 10 % 이상이며, 저수지에서 손실도 저류량의 1% 정도인 것으로 조사되고 있다 (水利電力部 등, 1993). 또한 대규모 물이 유역 상류로 도수되어 용수공급 지점까지 장거리를 유하하면서 여러 저수지를 거치는 경우는 앞에서 언급한 이유 등으로 문제해결에 유의해야 한다.

단순히 저수지 시스템에 의한 용수공급 부족량만을 도수량으로 결정할 경우 올바른 운영방안이라 할 수 없다. 이를 해결하기 위해서는 도수 시스템을 직접 저수지 시스템과 연계하는 방안이 필요한데 펌핑 시

스템도 하나의 저수지 시스템으로 처리할 수 있으면 가능하다. 즉 펌핑 시스템을 가상 저수지화하여 실제 저수지 시스템과 연계한 모형의 개발이 필요하다. 모형에서는 펌핑 시스템도 연속적인 상태방정식이 가능하도록 상태방정식을 구성하여야 하며, 펌핑량으로 나타나는 결정변수를 상태방정식에 기초하여 구할 수 있어야 한다. 또한 결정변수는 목적함수를 구성하는데 이용되어질 수 있어야 한다.

펌핑 시스템을 가상 저수지화 했을 경우 상태방정식 구성은 펌핑 시스템의 상태를 나타낼 수 있는 펌핑량을 운영변수로 고려하면 된다. 따라서 일반 저수지에서 적용하고 있는 증발량이나 누수량 등은 고려할 필요가 없다. 결국 가상 저수지화된 펌핑시스템의 운영변수는 초기 저류량과 말기 저류량, 펌핑량 그리고 이들 세변수간의 질량보존의 법칙으로 얻어지는 방류량뿐이다. 동적계획기법상에서 상태변수로 간주되는 저류량은 매 계산단계에서 초기와 말기를 차분값으로 정의할 수 있으므로 펌핑량을 알면 방류량은 쉽게 계산된다. 다만 매 계산단계에서의 펌핑량과 방류량의 차는 계속 저수지에 저류되므로 전방계산 동적계획기법 (forward DP)의 알고리즘이 필요하다.

펌핑 시스템을 가상 저수지로 만들었을때 필요한 제약조건은 일반 저수지에서와 마찬가지로 저류량 및 방류량의 제약조건이 설정되어야 한다. 방류량의 경우 펌핑 시설의 최대 및 최소 도수량 조건을 적용하면 된다. 저류량의 경우 용수공급을 위해 방류하고 남

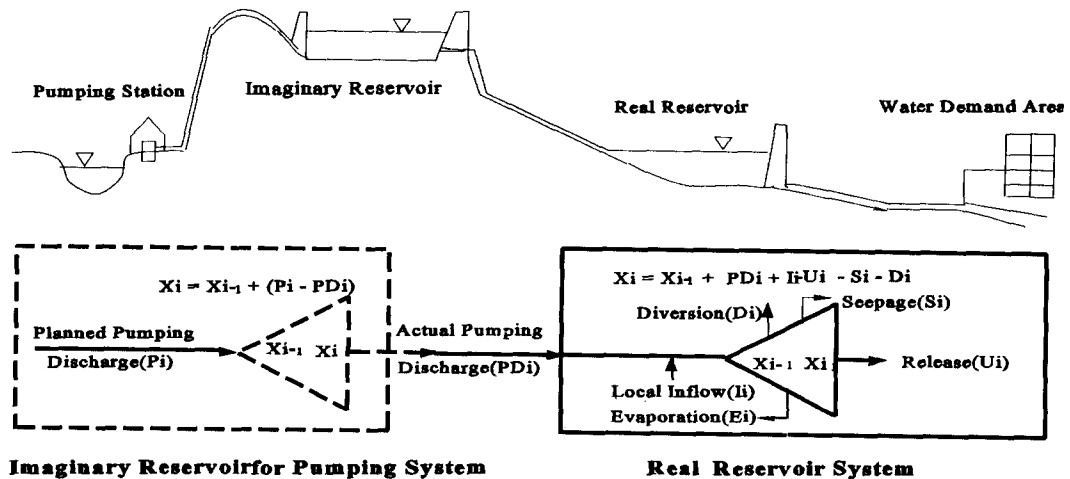


Fig. 1. Connection of Imaginary and Real Reservoir Systems

은 양은 계속해서 가상 저수지에 누가 저류되므로 계 (1)

획된 도수량을 고려하여 결정할 수 있다. 이와같은 조 건들을 적용하여 두 시스템을 연계하는 과정을 그림 1에서 도식적으로 보여주고 있다. 이 그림에서 점선 부분은 펌핑 시스템을 가상 저수지화할 경우 적용되는 운영변수를 나타내고, 실선부분은 실제 저수지 시스템의 적용 변수를 보여주고 있다.

## 2.2 모형 개발

그림 1의 연계 모식도를 근거로 펌핑 시스템 및 저수지 시스템 연계운영을 위한 최적화 모형은 다차원 문제가 되며, 다음과 같이 개발할 수 있다. 우선 복합 시스템 운영목적은 저수지 시스템 운영목적에 펌핑에 의한 도수량을 최소화하는 운영목적이 추가되어야 한다. 여기서 저수지 시스템 운영목적은 용수부족과 저수지 퇴사량 최소화로 나누어 재 구성할 수 있으며, 펌핑량을 하나의 목적으로 추가하면 다목적 운영 문제가 된다. 동적계획기법을 이용하여 다차원, 다목적 문제를 풀기 위하여 CSUDP의 IDP (incremental dynamic programming) (Labadie, 1990) 을 이용하였으며, 이 알고리즘은 information variable 에 의한 저수지 퇴사량 추적이 가능하여 저수지 운영 목적의 하나인 저수지 퇴사량 최적관리가 가능하다 (Lee 등, 1995; 이광만 등, 1995). 또한 각각의 목적 함수는 운영목적간의 경중을 조절하기 위하여 가중치 기법 (weighting method) (Zadhe, 1963)을 적용하였다.

목적함수 설정을 위한 보다 구체적인 방법은 용수 수요량을 최대한 공급하면서 부족량의 분배를 목적으로 용수공급 우선순위를 가중치로 조절하기 위하여 생활 공업용수 및 농업용수로 구분하여 각각의 용수목표치에 대한 부족량 자승의 합을 최소화하고 저수지 수명을 연장하기 위한 퇴사량 관리의 매 운영 단계마다 퇴적되는 퇴사량을 누계 형태로 적용하였다. 펌핑 시스템은 가상 저수지에서의 방류량, 즉 필요 펌핑량을 최소화하는 형태를 취하였다.

목적함수:

$$F = \text{Minimize} \sum_{i=1}^N (\omega_1 F_{1i} + \omega_2 F_{2i} + \omega_3 F_{3i} + \omega_4 F_{4i})$$

$$F_{1i} = \sum_{j=1}^M DS_{i,j} \quad (2)$$

$$F_{2i} = \sum_{k=1}^L (DWS_{i,k} + 5.)^2 + \sum_{k=1}^L (IWS_{i,k} + 5.)^2 \quad (3)$$

if  $WSD_{i,k} < WDD_{i,k}$  then  $DWS_{i,k} = WDD_{i,k} - WSD_{i,k}$  otherwise  $DWS_{i,k} = 0.0$

if  $WSI_{i,k} < WDI_{i,k}$  then  $IWS_{i,k} = WDI_{i,k} - WSI_{i,k}$  otherwise  $IWS_{i,k} = 0.0$

$$F_{3i} = \sum_{k=1}^L (AWS_{i,k} + 5.)^2 \quad (4)$$

if  $WSA_{i,k} < WDA_{i,k}$  then  $AWS_{i,k} = WDA_{i,k} - WSA_{i,k}$  otherwise  $AWS_{i,k} = 0.0$

$$F_{4i} = PD_i \quad (5)$$

제약조건:

$$PD_i = X_{i-1} - X_i + P_i \text{ for Yellow River Diversion} \quad (6)$$

$$U_{i,j} = X_{i-1,j} - X_{i,j} + I_{i,j} + \Phi \cdot PD_i - D_{i,j} - E_{i,j} - S_{i,j} \quad \text{for Reservoirs} \quad (7)$$

$$DS_{i,j} = DS_{i-1,j} + IS_{i,j} \cdot \mu_{i,j} \quad (8)$$

$$X_{i,j} \geq DS_{i,j} + \epsilon \quad (9)$$

$$X_{i,j \min} \leq X_{i,j} \leq X_{i,j \max} \quad (10)$$

$$U_{i,j \min} \leq U_{i,j} \leq U_{i,j \max} \quad (11)$$

여기서, F는 평가함수, F<sub>1</sub>은 저수지 퇴사관리를 위한 목적함수, F<sub>2</sub>는 생활용수 및 공업용수 공급 평가를 위한 목적함수, F<sub>3</sub>는 농업용수 공급 평가를 위한 목적함수, F<sub>4</sub>는 황하도수량을 최소화하기 위한 목적함수이다. N는 저수지 운영 기간 수, L는 용수공급 지점

수,  $M$ 는 저수지 수이다.  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  그리고  $\omega_4$ 는 각각의 목적함수에 적용되는 가중치,  $WDD_{i,k}, WDI_{i,k}$  및  $WDA_{i,k}$ 는 각각 계산단계  $i$ 의  $k$ 번째 용수공급 지점에서의 생활용수, 공업용수 그리고 농업용수 수요량을 나타내고,  $WSD_{i,k}, WSI_{i,k}$  및  $WSA_{i,k}$ 는 생활용수, 공업용수 그리고 농업용수 공급량을 나타내며,  $DWS_{i,k}, IWS_{i,k}$  및  $AWS_{i,k}$ 는 생활용수, 공업용수 및 농업용수 부족치를 나타낸다. 제약조건에서는  $X_{i-1,j}$ 는 계산단계  $i$ 의  $j$ 번째 저수지에서의 초기 저류량 상태벡터,  $X_{i,j}$ 는 말기 저류량 상태벡터,  $U_{i,j}$ 는 방류량 벡터,  $I_{i,j}$ 는 저수지로의 유입량,  $D_{i,j}$ 는 저수지로부터의 도수량,  $E_{i,j}$ 는 저수지에서의 증발 손실량,  $S_{i,j}$ 는 저수지에서의 누수 손실량,  $P_i$ 는 계산단계  $i$ 의 계획도수량,  $PD_i$ 는 계산 도수량,  $DS_{i-1,j}$ 는 저수지에서의 초기 저류량의 퇴사량 Information 상태벡터,  $DS_{i,j}$ 는 저수지에서의 말기 저류량에 대응하는 퇴사량의 Information 상태벡터 (이 상태벡터는 최적의 대안으로 추정되는 각각의 저수지 저류량에 대응하는 누적 저수지 퇴사량 값),  $IS_{i,j}$ 는 저수지로의 퇴사 유입량,  $\Phi$ 는 황하도수를 저수지와 연결하기 위한 시스템 Switch (도수와 연결되면 1, 연결되지 않으면 0),  $\mu$ 는 저수지 퇴사 퇴적률이며,  $\epsilon$ 는 각각의 저수지에서 저수지 환경을 고려한 보장 저류량으로, 10 MCM을 적용하였다. 식 (3) 및 (4)에서는 용수공급 목적을 우선적으로 달성하기 위해 용수부족량을 다른 목적함수와 차별화시켜 확대시키고자 부족량에 특정치를 더하여 계산하였다.

### 2.3 계산방법

앞에서 제시한 방법론을 동적계획기법 알고리즘에 적용하기 위해서는 한 가지 해결해야 할 문제가 있다. 일반 저수지의 경우 운영 시작시점의 저류량과 운영 말기 저류량, 즉 운영조건 설정은 문제의 상황에 따라서 과거 운영 자료나 운영 정책 자료에 근거하여 설정할 수 있다. 가상 저수지의 경우 초기 저류량 조건은 단순히 물이 없는 상태에서 시작할 수 있으나 말기 저류량 조건은 계획된 펌핑량중 용수공급량을 방류하고 남은 양은 계속해서 가상 저수지에 저장되므로 말기 저류량 조건을 설정하기가 쉽지 않다. 이와 같은 문제를 적절히 해결하기 위하여 몇가지 test run을

실시하였다.

우선 시행착오법으로 모형을 여러 가지 조건으로 수행한 후 그중에서 최적의 안을 찾아내는 것이다. 가상 저수지의 경우 전기간에 걸쳐 예상되는 필요 펌핑량을 가정하고 이를 기준으로 여러가지 말기 저류량에 대한 조건을 설정한 후 반복하여 계산하면 운영목적에 대한 조건을 설정한 후 반복하여 계산하면 운영목적에 최적으로 달성하는 대안을 찾을 수 있다. 이 방법은 전체 펌핑량을 차분하는 경우와 운영 말기 저류량을 차분하는 경우로 나눌 수 있다. 상세한 답을 얻기 위해서는 차분값을 작게할 수 있으나 이는 역으로 계산시간을 증가시킨다. 그림 2는 시행착오 방법중 전체 펌핑량을 적용한 계산결과를 보여주고 있다. 계산결과는 비교적 도수량을 줄이는데 따라서 용수부족이 거의 선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그림 3은 마지막 계산단계에서의 황하도수량을 고정했을 경우에 대한 년평균 용수공급량을 보여주고 있다. 이 경우 연간 총 도수량과 용수부족 관계는 전체 펌핑량을 차분하는 방법과 큰 차이가 없다. 두방법 모두 용수부족을 발생시키지 않으면서 최소 펌핑량을 연간  $335 \times 10^6 m^3$  정도를 보여주고 있다. 그러나 용수부족을 최소화하면서 펌핑량을 최소화시키는 대안을 찾기 위해서는 그림에서 보여주듯이 여러번의 계산과정을 거쳐야 한다.

시행착오법을 개선하기 위해서는 운영말기 펌핑량 조건을 고정하는 방법이 이용될 수 있다. 이 방법은 보다 간략하게 필요 황하도수량을 결정할 수 있다. 앞의 방법이 비교적 많은 계산량을 요구할뿐만아니라 조건설정에 어려움이 따른다면 이 방법은 장기간의 운영 방안 결정 문제에서 매우 용이하게 이용될 수 있다. 이 방법의 적용에는 계산 마지막 단계 말기 저류량을 적절한 값으로 고정하면 마지막 계산 단계에서 가상 저수지에 저류된 물은 損失로 처리할 수 있어 쉽게 해를 구할 수 있다. 이 값은 장기간의 수문자료에 대하여 사전분석을 실시한후 말기 저류량의 평균치를 도출하여 적용할 수 있다. 이 방법은 간단하게 계산 마지막단계의 저류량을 정할 수 있어 계산과정이 시행착오 방법에 비해 간편하다.

마지막 방법은 운영 시작 시점을 달리하는 방법이다. 표 1의 황하도수계획을 살펴보면 8월과 9월은 황하 분류상에 건설될 萬家寨 (Wanjiazhai) 저수지에서 퇴사 배사를 위하여 수위를 낮추는 시기로 도수가

불가능하다. 이와같은 운영특징을 이용하여 모형을 구성하면 최적해를 구할 수 있다. 즉 10월 초를 운영 시작시점으로 설정하면 연간운영에서 말기 운영단계는 9월말이 된다. 황하도수계획에서 9월은 도수계획이 없으므로 가상 저수지의 말기 저류량 조건을 어떤 값으로 설정하여도 답을 찾는다는 문제가 되지 않는다. 8월말까지 가상 저수지에 저류된 물은 9월말의 저류량 말기조건을 맞추기 위하여 방류되어야 하는데 도수계획이 없으므로 방류되는 전량을 계산상에서 손실로 처리하면 된다. 이 방법 역시 다년간의 황하도수 운영방안을 결정할때 매년 8월말 혹은 9월말에 저류된 물을 방류시키는 방법으로 모형을 구성하면 유익하게 이용될 수 있다.

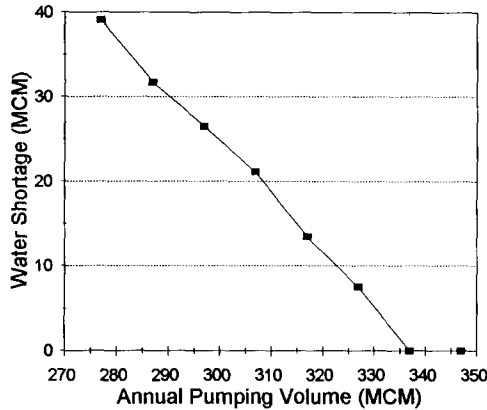


Fig. 2. Determination of Best Solution by Fixed Total Diversion Volume in Trial and Error Method

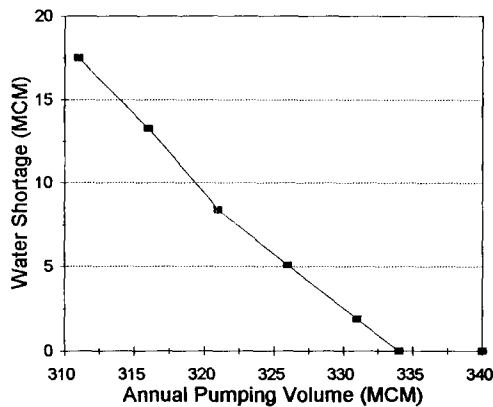


Fig. 3. Determination of Best Solution by Fixed Last Stage Diversion Volume in Trial and Error Method

### 3. 모형 적용 대상 시스템

개발된 모형을 중국 산서성 太原市 (Taiyuan) 용수 공급 계획 수립을 위한 수자원 평가에 적용하였다. 산서성 성도인 태원시 용수공급 시스템은 매우 복잡한데 그림 4에서 보여주듯이 크게 저수지로 대표되는 지표수와 karst 암반 지하수, 2차 처리 이상의 재이용수 그리고 황하분류로부터의 도수사업 등이다. 현재 이들 수자원중 지하수는 과대 개발되어 사회적인 문제를 야기시키고 있어 장래 용수공급계획은 지하수 환경을 안정시키면서 지표수 최대 개발에 역점을 두고 있다. 황하도수사업 (Yellow River Diversion Project)도 이중 하나로써 중국내에서 가장 비싼 도수사업으로 인식되고 있다. 저수지 시스템은 현재의 假河1댐 (No. 1 Fenhe Reservoir)을 기본으로 1998년까지 분하2댐이 건설될 계획이며, 1998년말 준공 예정인 황하도수를 조절하고 자체 유역의 지표수를 최대한으로 개발하기 위하여 분하3댐이 건설될 예정이다. 이 댐은 이미 기초조사가 완료된 3개 댐개발 가능지점을 대상으로 우선순위가 결정될 예정이다.

#### 3.1 황하도수계획

황하도수계획은 그림 4에서 보여주듯이 산서성 주요 공업도시인 태원시와 大同市 (Datong)의 물문제를 근본적으로 해결하기 위한 대규모 도수사업이다. 추정된 용수수요 자료와 수자원 부존량 조사결과에 따르면 2020년까지 이 지역에서는 재이용수를 포함하여 이용가능한 모든 수자원을 개발한다 하더라도  $1,187 \times 10^6 m^3$ 의 용수가 부족할 것으로 나타났다 (Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project Administration Bureau 등, 1994). 이 부족량을 황하분류로부터 공급받기 위해서는 도수과정에서의 손실량 등을 포함하여 최소한  $1,200 \times 10^6 m^3$ 의 도수는 이루어져야 하는 것으로 조사되었다 (TPDI 등, 1993).

이 계획은 산서성 북서쪽 황하분류상에 위치하는 萬家寨 (Wanjiashai) 저수지에서 펌핑하여 44.35 km를 도수한 후 대동방향의 북부간선과 태원시 용수

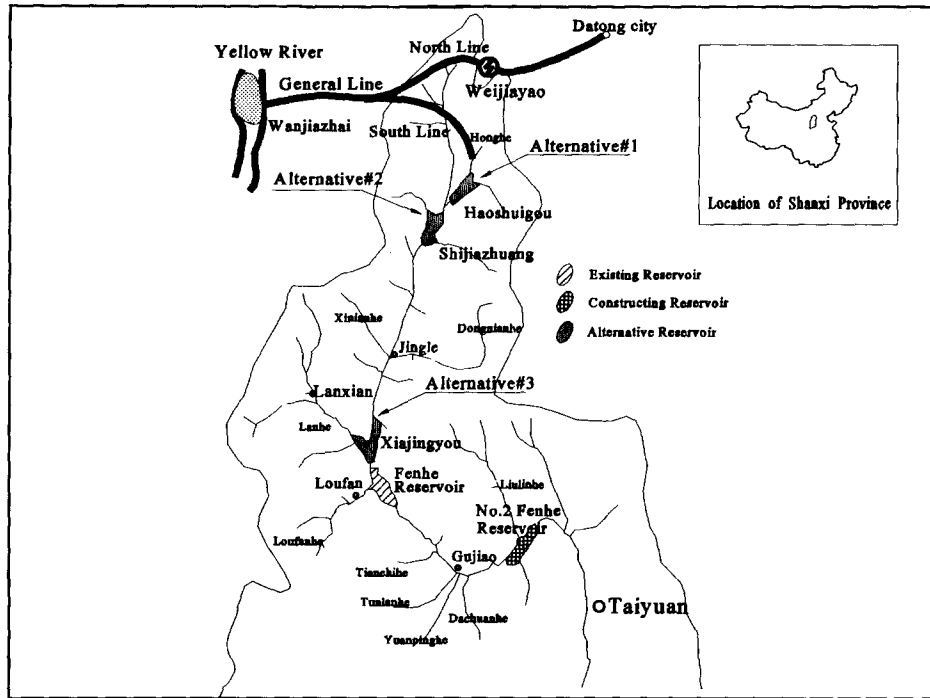


Fig. 4. Sketch of the Yellow River Diversion Project and Fenhe Reservoir Systems

공급을 위한 남부간선으로 나누어 진다. 북부간선은 총 연장 167 km에 이르며, 연간 최대 도수량은  $560 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 10개월에 걸쳐 평균  $22.2 \text{m}^3/\text{s}$ 을 도수할 계획이다. 남부간선은 총 연장 103 km에 이르며, 연간 최대 도수량은  $640 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로  $25.8 \text{m}^3/\text{s}$ 을 도수할 계획으로, 펌프 관련 특성은 표 1에 제시되었다(Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project Administration Bureau 등, 1994).

Table 1. Pump Characteristics of the Yellow River Diversion Project

Items	General Arterial Line	South Arterial Line	North Arterial Line
Number of Station	3	2	1
Pumping Head (m)	364	284	142
Number of Pump	16	8	2
Discharge Rate (cms)	4.3	4.3	4.3
Capacity (kW)	7500	7500	7500

이와같은 대규모의 물을 도수하는데 따르는 전력을 회수하기 위하여 북부간선상에 魏家窯 (Weijiayao) 발전소 건설계획이 포함되어 있다. 4기의 터빈이 설치되어 연간  $100 \times 10^6 \text{kWh}$ 의 전력을 생산할 계획이다. 그러나 황하도수계획이 계획되도록 운영된다면 용수 개발 단가는  $0.934 \text{Yuan}/\text{m}^3$  (1 Yuan은 우리나라 돈으로 100원 정도), 펌프장 운영비는  $0.687 \text{Yuan}/\text{m}^3$ 에 이르르며, 남부간선의 경우 2020년 기준으로  $640 \times 10^6 \text{m}^3$ 이 도수될 경우 연간 소비전력은 160.68 MWh로써  $335 \times 10^6 \text{Yuan}$ 의 펌핑 비용이 소요되는 것으로 조사되었다. 이들 도수 계획중 모형의 적용대상 지역인 태원시 용수공급을 위한 목표년도별 용수공급 계획을 표 2에서 보여주고 있다(The Construction Authority of the Yellow River Diversion Project of Shanxi Province, 1994).

Table 2. Planned Monthly Yellow River Diversion Volumes

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

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jly	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2000	37.41	33.83	37.41	36.22	37.41	36.21	30.54	0.0	0.0	30.36	30.20	37.41	347
2010	53.80	48.65	53.80	52.08	53.80	52.08	43.89	0.0	0.0	43.66	43.43	53.80	499
2020	66.63	60.25	66.63	64.50	66.63	64.50	54.36	0.0	0.0	54.08	53.79	66.63	618
2030	66.63	60.25	66.63	64.50	66.63	64.50	54.36	0.0	0.0	54.08	53.79	66.63	618

### 3.2 분하강 (Fenhe) 상류 저수지 시스템

태원시 용수공급을 위한 수자원 시스템은 크게 지표수와 지하수로 대표된다. 지표수의 경우 황하도수 계획을 포함하면, 2020년 기준으로  $1,117 \times 10^6 \text{m}^3$ 에 이른다. 이는 지하수 이용 가능량의 3배에 이르며, 역시 재이용수의 3배에 해당하는 수치이다. 분하1댐으로 대표되는 이 지역의 지표수 시스템은 1998년말 준공된 분하2댐과 황하도수를 조절하고 자체 유역의 지표수를 최대로 개발하기 위한 분하3댐의 개발로 이어질 전망이다. 이들 시스템은 그림 4에서와 같이 직렬로 구성되며, 운영상에서도 상호 밀접한 관련을 맺을 것으로 예상된다.

이들 저수지 시스템들은 궁극적으로 자체 유역의 수자원을 최대로 개발하면서 황하도수량을 조절할 것으로 기대되며, 황하도수계획이 표 2에서와 같이 연간 10개월에 걸쳐 이루어지므로 저수지 수가 증가됨에 따라 이를 분산시킬 수 있다. 현재 분하3댐으로 검토되고 있는 댐개발 가능 지점은 3개로써 모두 기존의 분하1댐 상류에 위치한다. 어느댐이 분하3댐으로 건설되든간에 저수지 운영방안은 이 지역의 강우특성과 농업용수 수요형태에 의해 영향을 받는다. 즉, 생활용수 및 공업용수는 계절적인 변화가 적은 반면 농업용수는 주로 3월부터 6월에 걸쳐 전체 수요량의 70%가 이용된다. 현재 분하1댐의 운영방안이 홍수기 유입량을 저류하였다가 이듬해 농업용수를 공급하고 있는 운영조건을 고려하면 이후 다수의 저수지가 건설된다 하더라도 유역의 지표수 이용 가능량의 한계로 이와같은 운영방안이 계속 유지될 것으로 전망된다.

이들 저수지 운영과정에서 보다 심각하게 대두되는 문제는 저수지 퇴사이다. 대개 주요 퇴사 발생원은 분하1댐 상류와 石家庄댐 (Shijiazhuang) 개발 가능 지점 사이로써 분하1댐으로 유입된 퇴사를 하류로 배

사시킨다 할지라도 이 퇴사는 다시 분하2댐으로 유입되며, 여기서 어느정도 침적이 이루어진 후 하류로 배사된다. 이와같은 문제는 홍수기 잉여수량을 배사에 이용하여야 하는데 황하도수를 최소화하는 경우 보다 많은 양의 퇴사를 유발한다. 따라서 황하도수와 연계된 저수지 운영방안은 용수공급은 물론 저수지 퇴사량을 고려하여 결정하여야 한다.

## 4. 모형 적용

황하도수 시스템을 분하강 저수지 시스템과 연계하여 최적 운영하기 위한 방법으로 도수 시스템을 가상 저수지화하여 실제 저수지 시스템과 연계하는 방법에 대하여 설명하였다. 황하도수 시스템을 상태변수 및 결정변수를 갖는 저수지 시스템으로 적용하는데 따르는 계산상의 문제점 해결 방법을 제시하고 일례를 들어 장단점을 비교하였다. 이 방법은 단순히 유역의 지표수량을 평가한 후 부족분을 도수를 통하여 충족시키는 방법보다 도수량이 저수지 시스템에 미치는 영향을 직접 고려할 수 있다는 장점이 있다. 제시된 방법중 황하도수량을 계산하는 방법으로는 계산의 편의성을 고려하여 두 번째 방법인 마지막 운영 단계의 도수량을 고정하는 방법을 이용하였다.

펌핑 시스템과 저수지 시스템이 연계된 운영에서 황하도수계획의 펌핑량 최소화를 위해 개발된 모형의 검증에 위하여 2개의 저수지 운영방안을 적용하였다. 첫째는 분하3댐의 건설시기를 고려하여 2003년부터 2010년까지 그리고 다른 하나는 2011년부터 2015년까지 두 개의 시나리오를 만들어 적용하였다. 저수지 시스템은 분하1댐과 2댐의 2차원 저수지 시스템을 대상으로 2000년 기준의 도수계획과 2010년의 도수계획을 각각 적용하였다. 본 조사사업에서는 Fig. 4에서 보여주듯이 3개의 분하3댐 대안중 하나가 선택될 경우 이를 포함할 수 있게 4차원으로 모형이 개발되었으나 본 연구에서는 황하도수사업을 2개



의 저수지와 연계된 경우로 한정하고 분석기간도 실제 2030년까지 계획되었으나 2015년까지 2개의 경우에 대해서만 결과로 제시하였다. 저수지 운영조건은 2000, 2010 그리고 2020년 기준 용수수요 추정 자료를 운영기간을 고려하여 적용하였으며, 1957년부터 1988년까지의 32년간 유량 및 유사량 자료를 운영기간별로 분할하여 모의한후 전체를 하나의 자료계열로 간주하여 분석하였다.

펌핑 시스템을 저수지 시스템과 연계하여 펌핑에 소요되는 비용을 최소화하기 위한 분석방법으로 분하 저수지 시스템 및 황하도수 시스템 운영목적을 고려하여 황하도수 최소화를 모형에서 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우에 대한 두가지 분석을 실시하여 비교하였다. 우선 용수공급 이행도 분석은 분하 저수지 시스템 운영목적이 용수공급을 달성하면서 저수지에 퇴적되는 퇴사량을 최소화하는 방안이므로 용수공급 평가는 공급 신뢰도를 기준으로 하였다. 이 중 용수공급 신뢰도는 생활 공업용수를 우선적으로 달성하고 농업용수를 공급하는 방안이므로 두 경우로 나누어 분석하였다 (KOICA 등, 1996).

우선 그림 5 및 6에서는 생활용수와 공업용수 공급량을 공급 신뢰도별로 운영기간 2003년부터 2010년, 2011부터 2015년까지 모의된 결과를 각각 보여주고 있다. 계산된 결과는 두 경우 모두 신뢰도 90%까지 용수부족이 없을뿐만아니라 그 이상의 확률분포에서도 같은 경향을 보여주고 있어 생활용수 및 공업용수 공급에는 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 농업용수의 공급 신뢰도의 경우는 그림 7 및 8에서 보여주고 있는데 운영기간 2003~2010의 결과를 보여주는 그림 7의 경우는 두가지 운영방법 모두 보장 신뢰도가 비슷한 25% 정도를 보이니 부족량은 도수량을 최소화하는 경우가 다소 많은 경향을 보여주고 있다. 운영기간 2011~2015년의 경우는 두 운영방안이 잘 일치되는 경향을 보여주고 있다. 따라서 위에서 제시한 두가지 조건으로 운영했을 경우 용수공급 측면에서는 대체적으로 두 경우 모두가 같은 경향을 보인다고 할 수 있다.

한편 두 운영방안의 황하도수량을 비교해 보면 표 3에서 보여주듯이 황하도수량을 최소화하는 운영방안에서는 계획된 도수량을 상당히 줄일 수 있다. 운영기간 2003~2010의 경우는 연간  $108.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 의

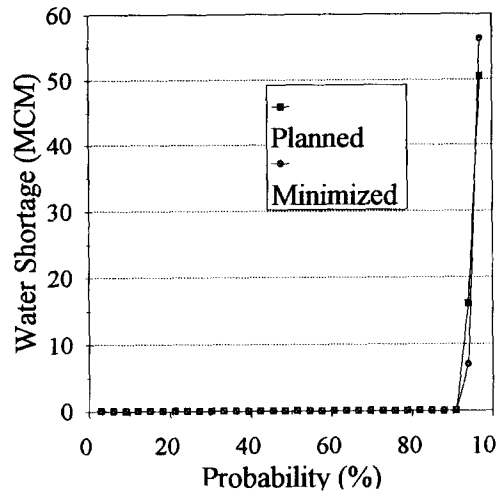


Fig. 5. Comparison of Planned and Minimized Cases on Domestic and Industrial for Operation Year 2003~2010

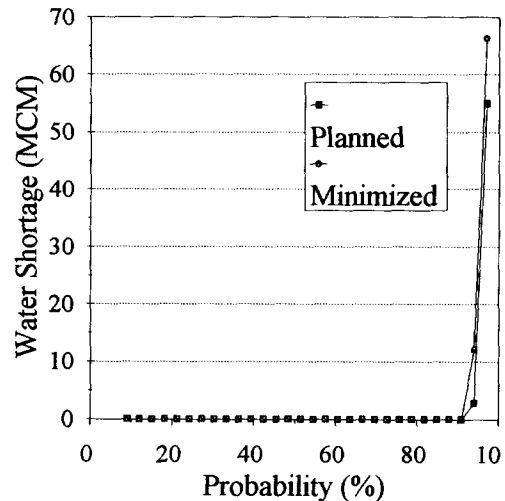


Fig. 6. Comparison of Planned and Minimized Cases on Domestic and Industrial for Operation Year 2011~2015

펌핑량을 줄일 수 있고, 운영기간 2011~2015의 경우는  $102.1 \times 10^6 \text{m}^3$ 의 펌핑량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이는 각각 표 2에서 제시한 계획량의 31.4 및 20.5%에 해당되는 양이다. 이를 3.1절에서 설명한 펌핑비용 원단위를 적용하여 돈으로 환산하면 표 4에서 보여주듯이 운영기간 2003~2010의 경

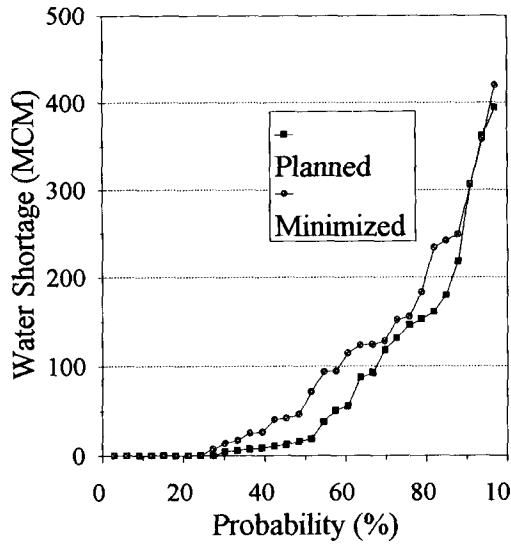


Fig. 7. Comparison of Planned and Minimized Cases on Agricultural Water Supply for Operation Year 2003~2010

우 년간  $72.0 \times 10^6$  Yuan을, 운영기간 2011~2015의 경우는  $70.2 \times 10^6$  Yuan의 비용을 절감할 수 있을 것으로 나타나 펌프 운영의 획기적인 개선이 기대된다.

Table 3. Comparison of Diversion Water

Month	2003~2010		2011~2015	
	Plan ( $10^6\text{m}^3$ )	Minimize ( $10^6\text{m}^3$ )	Plan ( $10^6\text{m}^3$ )	Minimize ( $10^6\text{m}^3$ )
Jan	37.41	28.19	53.80	46.30
Feb	33.83	26.33	48.65	46.07
Mar	37.41	27.10	53.80	48.88
Apr	36.22	27.63	52.08	48.83
May	37.41	27.80	53.80	43.47
Jly	30.54	15.54	43.89	22.06
Aug	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct	30.36	17.31	43.66	31.08
Nov	30.20	15.43	43.43	27.51
Dec	36.71	27.34	53.80	42.04
Total	346.30	237.60	498.99	396.81

Table 4. Comparison of Pumping Costs

Month	2003~2010		2011~2015	
	Plan ( $10^6\text{¥}$ )	Minimize ( $10^6\text{¥}$ )	Plan ( $10^6\text{¥}$ )	Minimize ( $10^6\text{¥}$ )
Jan	25.70	19.37	36.96	31.80
Feb	23.24	18.09	33.42	31.65
Mar	25.70	18.62	36.96	33.58
Apr	24.88	18.98	35.78	33.54
May	25.70	19.10	36.96	29.87
Jun	36.21	24.96	52.08	40.58
Jun	24.87	17.14	35.78	27.88
Jly	20.98	10.67	30.15	15.15
Aug	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct	20.85	11.82	29.99	21.35
Nov	20.74	10.60	29.83	18.90
Dec	22.52	18.78	36.96	28.88
Total	235.18	163.17	342.79	272.60

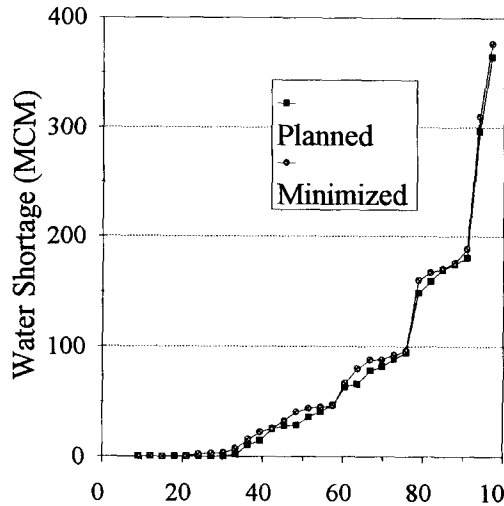


Fig. 8. Comparison of Planned and Minimized Cases on Agricultural Water Supply for Operation Year 2011~2015

마지막으로 저수지 운영결과를 퇴사관리 측면에서 살펴보면 그림 9에서 보여주듯이 황하도수를 최적화 하는 방안은 저수지 퇴사량을 증대시키고 있다. 이 그림은 운영기간 2003년에서 2015년까지 모형에서 추

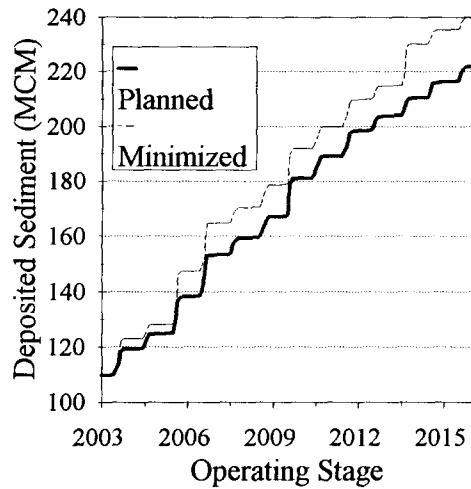


Fig. 9. Cumulated Reservoir Sediment During Operation Year 2003~2015

정된 월별 퇴사량을 시간에 따라 누계한 것이다. 황하 도수를 운영목적으로 하지않는 경우는 13년간  $221 \times 10^6 \text{m}^3$ 의 퇴사가 분하 1 및 2댐에 퇴적되었으나 황하 도수를 운영목적에 포함시키는 경우  $235.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 의 퇴사가 쌓이는 것으로 계산되었다. 두 운영방안에 의한 차이는  $14.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 로 이 지역의 수자원 부족량 및 댐 개발 가능지점을 고려할 때 적은량이 아니므로 도수량과 퇴사량간의 tradeoff 분석이 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대규모 펌핑 시스템과 다목적 저수지 시스템이 연계된 운영에서 두 시스템을 최적으로 관리할 수 있는 방법론을 제시하였다. 본 연구에서 이용한 방법은 동적계획법 알고리즘에서 펌핑 시스템을 가상 저수지화하여 실제 저수지 시스템과 연계하는 방법을 이용하였다. 이와같은 방법은 분하강 상류 유역처럼 도수량이 장거리에 걸쳐 유하되면서 여러개의 저수지를 통과할때 유입량처럼 저수지 운영에 미치는 영향을 완전하게 고려할 수 있다는 장점이 있다. 또한 적용된 결과는 개발된 방법이 실제 운영방안 결정에 적절히 이용될 수 있음을 보여주고 있다. 이 방법은 우리나라의 용수공급 시스템중 펌핑 시스템과 저수지 시스템이 연계된 경우 매우 적절한 운영

방안을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 펌핑량과 저수지 퇴사량 관계는 분하강 유역이 대표적인 황하의 지류인 점을 감안할때 황하도수를 최소화하는 방안은 저수지 퇴사를 증가시킴으로 보다 상세한 분석을 통하여 두 목적간의 최적의 대안이 결정되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국국제협력단의 해외원조사사업의 일환으로 한국수자원공사가 수행한 중국 산서성 분하강 유역조사사업의 일부성과로서 국제협력단의 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 參 考 文 獻

- 이광만, 유양수, 이우석 (1995). “분하강 수자원 평가를 위한 모의-최적화 모형의 이용.” 1995년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 53-56.
- 水利電力部, 山西省 水利勘测设计院 (1993). 山西省假河二庫初步設計報告 第二分册 工程地質 勘察与工程測量, pp. 42-45.
- DeMoyer, R., and Horowitz, L. (1975). *A system approach to water distribution modeling and control*. Lexington Books, Lexington, Mass.
- Fallside, F., and Perry, P.F. (1975). “Hierarchical optimization of a water-supply network.” *Proceedings IEE*, Vol. 122, No. 2, pp. 202-208.
- Jolland, G., and Cohen, G. (1980). “Optimal control of water distribution network by two multilevel methods.” *Automatica*, Vol. 16, pp. 83-88.
- KOICA, KOWACO (1996). *The Comprehensive Management Study Of Upper Fenhe River Basin And Pre-Feasibility Study of No. 3 Fenhe Multi-Purpose Dam Project*, pp. II-6-2~II-6-4.
- Ko, S.-K., Oh, M.-H., and Lee, K.-M. (1994). “Application of a multiobjective technique for the optimum operation of pumps and reservoirs in Service water transmission systems.” Submitted to *Conference on Application of Goal Programming and Multiobjective Analysis* prepared by Portmouths University, United Kingdom of

- British.
- Kokata, T. (1977). "A Methodology on the optimal operation of service water transmission systems." *Journal of Japanese Water Supply Association*, Vol. 510, pp. 2-11, (written in Japanese).
- Labadie, J.W. (1990). "Dynamic programming with the microcomputer: Program CSUDP." *Encyclopedia of Microcomputers*, Vol. V, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Lee, G.-M., Fontane, D.G., Lee, J.-G., and Zheng, H. (1995). "Development of information variable dynamic programming to consider reservoir sediment management." *1995 Annual Symposium*, Korea Water Resources Association, pp. 378-383.
- Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project Administration Bureau and Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project General Corporation (1994). Document for World Bank Investigation-2 : Design of Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project.
- Shimizu, H. (1976). "Optimization of service water transmission systems." *Toshiba Review*, Vol. 31, No. 1, pp. 12-15 (written in Japanese).
- Sterling, M., and Coulbeck, B. (1989). "A dynamic programming solution to optimization of pumping costs." *Proc.*, Institute of Civil Engineers, London, England, 59(part 2), pp. 813-818.
- The Construction Authority of the Yellow River Diversion Project of Shanxi Province (1994). *World Bank Investigation File 4 : Investment Estimation of the Yellow River Diversion Project of Shanxi Province*.
- Tianjin Prospecting & Design Institute (TPDI) of Ministry of Water Resources and Electric Power, and Shanxi Investigation & Design Institute of Water Conservancy and Hydropower (SIDI) of Ministry of Water Resources and Electric Power (1993). *Comprehensive Specifications on The Preliminary Design of Wanjiashai Yellow River-Shanxi Diversion Project*, pp. 96-101
- Zadhe, L.A. (1963). "Optimality and non-scalar-valued performance criteria." *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-8, No. 1, pp. 59-60.

〈접수 : 1996년 6월 24일〉