

수자원 운영계획 시스템의 구현을 위한 수리계획 모형 자료구조의 활용

김재희¹ · 김승권^{1*} · 박영준²

¹고려대학교 산업시스템정보공학과 / ²한국전자통신연구원

Utilization of a Mathematical Programming Data Structure for the Implementation of a Water Resources Planning System

Jaehee Kim¹ · Sheung-Kown Kim¹ · Youngjoon Park²

¹Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

²Internet Economy Research Team, ETRI, Daejeon, 305-600

This paper reports on the application of the integration of mathematical programming model and database in a decision support system (DSS) for the planning of the multi-reservoir operating system. The DSS is based on a multi-objective, mixed-integer goal programming (MIGP) model, which can generate efficient solutions via the weighted-sums method (WSM).

The major concern of this study is seamless, efficient integration between the mathematical model and the database, because there are significant differences in structure and content between the data for a mathematical model and the data for a conventional database application. In order to load the external optimization results on the database, we developed a systematic way of naming variable/constraint so that a rapid identification of variables/constraints is possible. An efficient database structure for planning of the multi-reservoir operating system is presented by taking advantage of the naming convention of the variable/constraint.

Keywords: database, mathematical programming, decision support system, water resources system

1. 서론

현재 우리나라의 연간 강수량은 세계 평균보다 높은 편이지만 연도별, 지역별, 계절별 강수량의 차이가 크고, 변화의 폭이 커서 수자원 관리에 매우 불리한 조건을 갖고 있다. 그 결과 90년대 들어서는 지역적으로 물 부족이 발생하고 있으며 지금의 수요추세라면 2000년대에 심각한 부족이 일어날 것으로 예상되고 있다(MOCT, 2002). 실제로 UN산하의 국제인구행동연구소(PAI)는 우리나라를 이미 영국, 벨기에, 폴란드, 남아프리카

공화국 등과 같이 물 부족 국가로 분류하고 있는 실정이다 (PAI, 2000). 여기에 최근의 영월댐 백지화에서 보듯 환경에 대한 관심이 고조됨에 따라 더 이상의 수자원 개발이 어려워지고 있어서, 한정된 수자원의 효율적 관리는 더욱 중요한 문제가 되고 있다.

수자원의 효율적 사용을 공급 측면에서 생각해 보면 댐에 저수된 물을 효과적으로 이용하는 문제로 귀결될 수 있는데, 이것은 시스템의 관점에서 확보된 수자원을 댐 건설의 목적에 따라 시간 및 공간별로 적절하게 할당시키는 것이라고 할 수

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 일부 지원(과제번호 : 1-6-1)에 의해 수행되었음.

*연락처 : 김승권 교수, 136-701 서울시 성북구 안암동5가 1번지 고려대학교 산업시스템정보공학과,

Fax : 02-929-5888, E-mail : kimsk@korea.ac.kr

2003년 2월 접수, 1회 수정 후 2003년 10월 게재 확정.

있다(Kim, 1988; ReVelle, 2000). 그리고, 이 문제의 적절한 운영 대안을 찾기 위해 다양한 최적화 기법과 시뮬레이션 기법들이 사용되어 왔다. 그런데, 최적화 기법이든 시뮬레이션 기법을 적용하는 유입량 예측자료의 불확실성이나 댐 운영의 다중 목적 등의 특성으로 인해 적합한 운영 대안을 도출해 내기는 그리 쉬운 일이 아니다. 즉 일정기간 동안의 운영계획을 수립하기 위해서는 다양한 시나리오를 반영한 수차례의 모의실험을 통해 충분한 분석을 거쳐야 한다. 더욱이 반복적인 모형 수행 과정에서 발생하는 방대한 입출력 자료는 모형의 현실 적용과정에서 무시할 수 없는 장애가 되곤 했다. 따라서, 댐 운영 전문가와 상호작용을 통해 납득할 만하고 실제 적용 가능한 운영 대안을 제시할 수 있는 의사결정 지원 시스템(DSS)을 구현하는 것이 매우 중요하다.

최근 들어 컴퓨팅 기술의 발달과 더불어 수자원 운영계획을 위한 사용자 지원 시스템들이 속속 구현되고 있다. 대표적인 사례를 살펴보면, 먼저 Andreu *et al.* (1996)은 스페인의 Segura River와 Tagus River를 대상으로 OPTIGES라는 최적화 모형을 적용하여 수자원 운영계획을 수립할 수 있는 AQUATOOL을 구현하였다. 또, Fedra and Jameicon (1996)은 WaterWare에서 WRA (Water Resource Assessment)라는 시뮬레이션 모형을 통해 수자원 운영계획 및 정책수립을 도와주는 시스템을 제안했다. Stam *et al.* (1998)는 물-기반 시뮬레이션 모형을 4세대 컴퓨터 언어인 IFPS(Interactive Financial Planning System)으로 구현하고 이 시스템을 Lake Kariba 저수지 시스템에 적용했다. 한편, AlShemmeri *et al.* (1997)은 최적화 기법이나 시뮬레이션 기법 대신 다기준 의사결정 분석 기법(multi-criteria decision analysis)을 적용하여 전략적인 차원에서 수자원 정책을 수립할 수 있는 사용자 시스템을 제안하기도 했다.

이러한 수자원 운영계획 시스템들은 그 대상수계나 모형의 형태만 달리할 뿐, 모두 데이터베이스 기술과 모형의 분석 기능이 결합된 소프트웨어로 요약할 수 있다. 즉, 방대한 수문(水文) 자료를 데이터베이스를 통해 체계적으로 관리하고, 이를 입력자료로 활용해서 최적화 모형이나 시뮬레이션 모형을 수행하는 프로세스가 핵심이 된다. 그런데, 통상 수문 데이터베이스와 분석 모형을 연동하는 부분에서 시스템 구현상의 가장 큰 어려움이 따른다. 특히, 최적화 모형을 구현할 경우 수리계획 모형의 자료가 인사, 회계 등과 같은 데이터베이스 설계 예제로 흔히 소개되는 일반적인 형태의 자료와는 그 구성이나 내용이 크게 달라, 모형을 위한 데이터베이스의 구축이 쉽지 않다는 문제가 있다 (Fourer, 1997). 또한, 최적화 엔진으로 외부의 최적화 소프트웨어를 활용하는 경우가 많은데(본 연구에서는 CPLEX를 사용), 이 때도 수리계획 모형 자료 구조의 특성으로 인해 최적화 엔진과 데이터베이스 관리 시스템 간 자료 교환에 어려움이 따른다. 즉, 자료 교환 과정에서 많은 데이터베이스 트랜잭션이 발생하고 전체 분석 시간의 상당 부분을 여기서 소비하게 된다.

이에 본 연구에서는 텍스트 기반의 CPLEX 결과를 데이터베

이스에 로딩하는 과정의 데이터 트랜잭션을 줄이기 위해, CPLEX 모형의 변수명 자체로 하여금 의미를 가진 데이터베이스 역할을 할 수 있도록 구조화된 변수명/제약식명을 적용해 보았다. 이를 통해 수행도 저하를 가져오는 불필요한 릴레이선이 제거된 효율적인 형태의 데이터베이스를 설계할 수 있었다. 아울러, 여기서 설계된 데이터베이스를 활용해서 한강 수계(水系)의 수자원 운영계획 수립을 위한 의사결정 지원 시스템을 구현할 수 있었다.

2. 댐 군 최적 연계 운영문제

2.1 문제 정의

댐의 공급목적은 대개 용수공급(관개용수, 생활용수, 공업용수 등), 수력발전, 주운, 수질보전, 생태계보전, 오락 및 휴식 공간의 확보, 그리고 홍수조절 등의 여러 목적을 달성하기 위하여 운영되며, 그 운영방법은 크게 두 가지 운영방안으로 대별된다. 하나는 치수관점에서 홍수조절을 위한 방법이 있을 수 있고 또 다른 하나는 본 연구에서 고려하고 있는 이수관점에서의 용수공급을 위한 운영이다(Kim, 1988).

본 연구에서 고려하는 댐 군 연계 운영이란 이수차원의 목적에서 <그림 1>과 같이 병렬 혹은 직렬로 연결된 댐들을 유기적으로 연계시켜 운영하는 것이다. 즉, 용수공급, 수력발전, 수질보전 등의 목적을 고려하면서 매 기간 각 댐에서 얼마의 용수를 방류해야 하는지를 결정하는 문제가 된다. 사실 이 문제는 재고 관리 모형에서 재고량, 생산량(주문량), 방출량이 각각 저수량, 댐 유입량, 방류량으로 바뀐 것으로 볼 수 있어서 재고관리 모형의 일종이라고 할 수 있다(ReVelle, 2000). 다만 방류의 형태에 경제적인 이득을 수반하는 발전방류와 가급적 피해야 하는 여수로 방류의 구분이 있고, 생태계 유지를 위한 의무 방류와 같은 몇 가지 세부 조건에서 차이가 있을 뿐이다. 이런

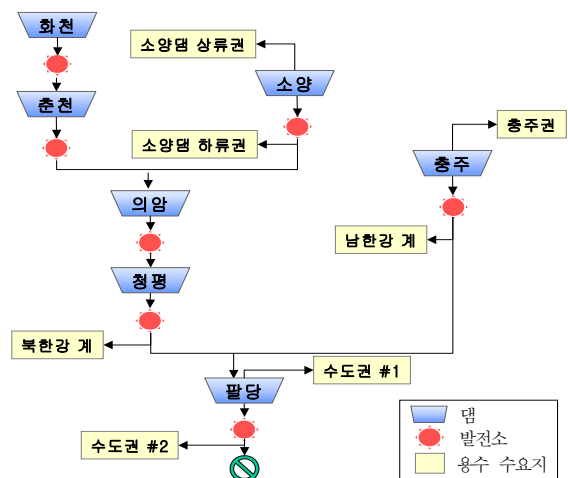


그림 1. 한강 수계 용수공급 모식도.

사실 때문에 댐 군 연계운영 문제에는 경영과학의 다양한 시스템 분석 기법이 적용되어 왔다. 즉, 선형 계획법, 동적 계획법, 비선형 계획법, 혼합 정수 계획법 등과 같은 최적화 기법이나 사용자가 지정한 규칙(rule)에 따라 댐 운영을 모사(模寫)하는 시뮬레이션 기법이 사용되어 왔다(Shih and ReVelle, 1995).

2.2 댐 군 연계 운영을 위한 최적화 모형

본 연구에서 다루는 댐 군 연계 운영 문제는 Kim and Park (1998)이 한강 수계 댐 군 연계 운영을 위해 수립한 최적화 모형인 CoMOM (Coordinated Multi-reservoir Operating Model)을 근간으로 하고 있다. CoMOM은 <그림 1>과 같은 한강 수계의 댐 군을 대상으로 용수 수요와 수력발전을 동시에 고려하여 연계 운영 방안을 도출하기 위한 모형으로서, <그림 2>와 같은 네트워크 흐름 모형을 근간으로 하고 있다. 대부분 아크의 흐름은 실제 물의 이동을 의미하며 점선 박스와 쇄선 박스는 각각 저수(貯水)와 용수 부족 상황을 선형 구획화로 표현한 것이다. 특히 점선 박스의 저수 부분은 기간 말 저수량이 다음 기간으로 이월되는 것을 나타내는 것으로, 전체 그림은 기간에 따라

동일한 패턴이 반복되는 동적 네트워크 흐름 모형이 된다. 여기에 댐의 수위가 정해진 한계값을 초과할 경우만 여수로(餘水路) 방류가 발생하는 것을 표현하기 위해 조건 제약식을 이용한 혼합 정수 계획(mixed integer programming, MIP) 모형으로 표현하고 있으며, 수력발전 에너지량 계산을 최적화 사후 계산으로 하고 있다는 점을 특징으로 하고 있다(Kim, 1999).

본 연구에서 적용한 모형은 기존 CoMOM의 골격을 유지하면서 분석 기법 목표 저수위와 목표 방류량 제약을 목표 계획법(goal programming)으로 고려하는 등 현실성을 높인 모형이다. 이때 적용된 목표 계획법은 열등하지 않은 해(efficient solution)를 구하는 다목적 계획법의 해법 절차로 활용된 것이 아니라, 비가능해(infeasible solution)를 유발할 염려가 있는 제약식을 목표값을 가진 Soft Constraint로 수식화하는데 사용된 것이다. 이 모형에 가중합계법(weighted-sums method) (Klein and Hannan, 1982; Steuer, 1986)을 이용하여 수력 발전과 저수 간의 상충 관계를 감안한 다중목적 문제의 열등하지 않은 유효해(efficient solution)를 발견함으로써 보다 현실적인 대안을 도출하도록 하였다. 적용된 모형의 자세한 수식은 부록에 수록되어 있다.

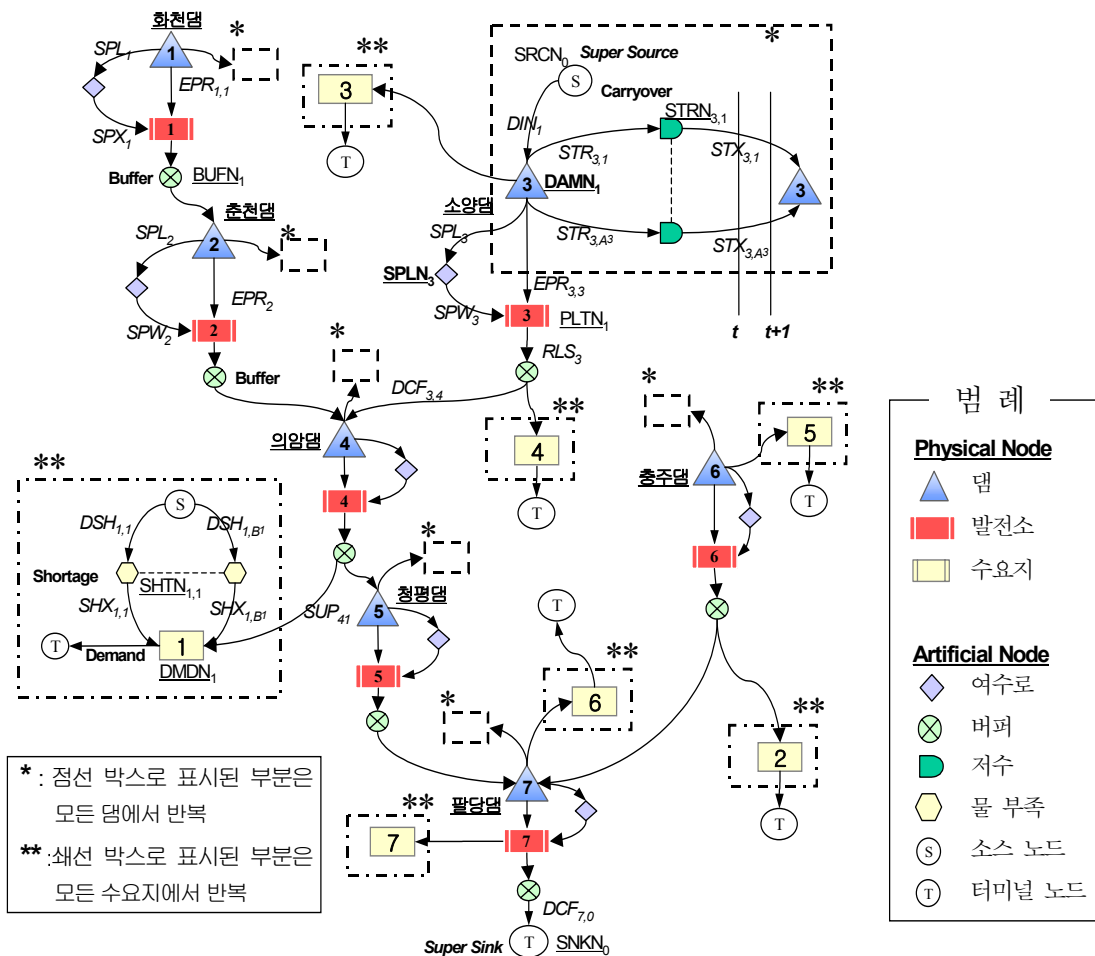


그림 2. 한강 수계를 위한 네트워크의 흐름 모형.

3. 수자원 운영계획 시스템 (DSS)

3.1 시스템 구조

DSS는 <그림 3>과 같은 구성도로 나타낼 수 있다. 즉, 서버 측에 데이터를 저장하는 ORACLE이 위치하며, 클라이언트 측에는 최적화를 담당하는 CPLEX와 결과를 도시하는 스프레드시트(EXCEL) 프로그램, 그리고 전체 DSS를 통제하는 클라이언트 프로그램이 위치한다. 이 클라이언트 프로그램은 모형관리(model management), 자료관리(data management), 리포트 출력(report generation) 기능을 담당한다. 한편, CPLEX는 외부의 독립된 프로그램이지만, ILOG Concert Library를 통해 원격 호출함으로써 DSS의 다른 부분과 일관된 사용자 인터페이스를 구현할 수 있었다(CPLEX Division, 2000).

시스템이 작동하는 과정을 순차적으로 살펴보면 다음과 같다. 일단 사용자가 GUI를 통해 CoMOM에 필요한 사용자 자료를 입력하면 이 자료는 자료 관리 모듈을 통해 ORACLE 데이터베이스에 저장된다. 그러면, 자료관리 모듈은 필요할 때마다 embedded SQL문을 이용해 데이터베이스 내용을 모형관리 모듈에 전달한다. CoMOM을 형성하는 모형관리 모듈은 전달된 자료를 MPS (Mathematical Programming System) 형식의 CPLEX 입력 파일로 변환하고, CPLEX는 MPS 파일을 입력받아 최적해를 구하고 그 결과를 파일에 저장한다. 그리고, 저장된 결과 파일은 DSS의 모형 관리 모듈을 통해 해석되어 데이터베이스 서버에 저장된다. 마지막으로 리포팅 모듈은 데이터베이스 서버에 저장된 최적화 결과를 자료관리 모듈을 통해 전달받아, 비주얼 베이직 컴포넌트를 이용해 그래프를 도시하거나 엑셀 원격 자동화(EXCEL OLE Automation) 기능을 통해 EXCEL 형식의 보고서로 출력한다.

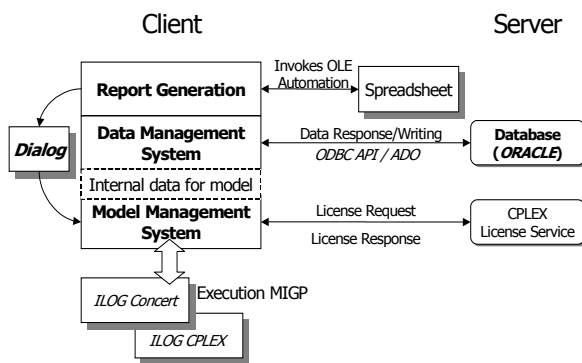


그림 3. DSS의 세부 모듈 구성도.

한편, <그림 3>과 같은 DSS 구현의 핵심은 데이터베이스와 수리계획 모형(CoMOM)을 연동하는 부분에 있다. 이것은 ‘변수’와 ‘제약식’으로 정의되는 수리계획 모형을 ‘테이블’ 형태의 데이터베이스와 연동시키기 쉽지 않기 때문이다(Fourer, 1997). <그림 4>는 CPLEX의 입력 자료로 사용되는 MPS 파일

<그림 4.a>과 CPLEX 결과 파일 <그림 4.b>의 형태를 보여주고 있다(CPLEX Division, 2000).

NAME				
ROWS				
N obj				
L c1				
L c2				
COLUMNS				
x1 obj	-1	c1	-1	
x1 c2	1			
x2 obj	-2	c1	1	
x2 c2	-3			
RHS				
rhs c1	20	c2	30	
BOUNDS				
UP bnd x1			40	
LO bnd x2			10	
ENDATA				

(a) MPS 파일 예제

Solution status 102. Objective value 29.97617489	
...COLUMN....	...ACTIVITY...
X1 :	2.00000000
X2 :	6.00000000

(b) CPLEX 결과 파일

그림 4. CPLEX의 입출력 자료 형태.

이와 같은 형식의 수리모형 입출력 자료를 데이터베이스로 관리하기 위해서 Fourer (1997)는 [제약식]과 [변수], 그리고 제약식과 변수의 관계를 설정하는 [계수] 릴레이션을 기본 개념으로 하는 일반화된 데이터베이스 스키마를 제안하였다. 그러나, 그의 방식은 일반적인 개념으로서 상당히 유용하지만, 모형의 규모가 매우 큰 실제상황에 대해서는 과도한 데이터베이스 트랜잭션을 수반해서 시스템의 수행도 저하를 가져오는 단점이 있다. 예를 들어, 텍스트 기반의 CPLEX 결과 <그림 4.b>를 데이터베이스에 저장하는 단계를 보자. 이 경우 변수 리스트에 대한 역할 정보를 어떤 방식으로든 미리 저장해 놓아야 하는데, Fourer (1997)의 방식은 <그림 5>와 같은 릴레이션을 두고 각 변수가 언제(기간_ID), 어디(객체 구분 & 객체_ID; 예 : 댐 3)에서 어떤 역할(VARIABLE종류; 예 : 저수, 여수로 방류)을 하는지 파악하는 방식이다. 그러나, 모형의 규모가 커질 경우에 방대한 크기의 릴레이션을 유지하고 이를 탐색하는 것은 비효율적이다. 아울러, CoMOM은 네트워크 흐름 구조와 목표 계획법을 활용한 독특한 구조를 하고 있어, 특별히 여기에 적합하게 설계된 데이터베이스를 활용하는 것이 바람직하다.

VARIABLE
VARIABLE_ID
기간_ID
객체구분
객체_ID
VARIABLE종류
가중치
OPTIMAL_VALUE

그림 5. 최적화 결과 저장을 위한 릴레이션의 예.

이에 본 연구에서는 CPLEX 결과를 데이터베이스에 저장하는 단계의 데이터베이스 트랜잭션을 줄이면서, CoMOM의 모형 정보를 효과적으로 관리할 수 있는 데이터베이스 스키마를 설계해 보았다.

3.2 최적화 모형을 위한 데이터베이스의 설계

최적화 모형과 데이터베이스 간의 효율적인 연계를 위해, 본 연구에서는 <그림 5>와 같은 변수 릴레이션을 지양하고 최적화 모형의 변수명 자체로 하여금 의미를 가진 데이터베이스 역할을 할 수 있도록 구조화된 변수명을 부여하는 방법을 적용하였다. 즉, 수행도 저하의 원인이 되는 <그림 5>와 같은 릴레이션을 사용하는 대신, CPLEX에서 사용되는 변수에 <그림 6.a>와 같은 명명법을 적용했다. 이 명명법을 통해 다른 데이터베이스 검색 없이 변수 명칭만으로도 각 변수의 의미를 파악할 수 있도록 했다. 아울러 제약식의 명칭에도 비슷한 명명법을 적용했다<그림 6.b>. 이 규칙은 네트워크 흐름 형태에 적합하도록 설계되었지만, 비-네트워크 흐름 모형의 형태에도 적용될 수 있다.

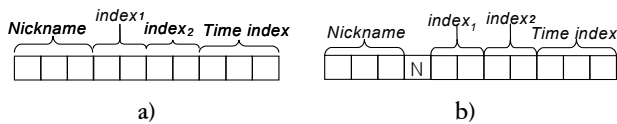


그림 6. MPS 파일의 a) 변수명, b) 제약식명.

<그림 2>와 같은 네트워크 흐름 모형의 경우 Nickname은 노드나 아크의 종류를 구분하는 키워드가 되고, 변수명의 index1과 index2는 tail node, head node를 식별하며, 제약식명의 index1과 index2는 노드를 식별하는 역할을 한다. 예를 들어, STR0301이라는 아크(변수)를 살펴보면, STR은 저수량을 나타내는 변수의 Nickname을 의미하고, 03은 3번째 댐(소양댐)을, 01은 첫 번째 저수 구획구간을 의미한다. 또, 소양댐 노드는 3번 댐의 의미로 DAMN0300으로 표시하고, 그 옆의 STRN0301은 3번 댐의 1번째 저수 구획 노드라는 것을 뜻한다. 그리고, 기간마다 동일한 네트워크 패턴이 반복되기 때문에 문자열 맨 뒤에 기간번호를 표시하는 숫자, Time index만 추가하면 전기 간에 대한 제약식과 변수명을 표현할 수 있다.

한편, 비-네트워크 흐름 부분 역시 키워드 문자열과 index1, index2의 역할만 달라질 뿐 제시한 명명법을 사용하여 모든 제약식과 변수를 표현할 수 있다. 부록의 식 (11)~(12)처럼 기간 정보가 필요 없는 제약식은 Time index를 빈 문자열로 처리하면 된다.

이상과 같이 구조화된 변수와 제약식의 명명법을 적용한 결과, 데이터베이스 상에 변수 리스트와 제약식 리스트 관리를 위한 릴레이션을 둘 필요가 없게 되었다. <그림 7>은 댐 군 연계 운영 모형의 구현을 위해 설계한 데이터베이스 스키마이다. 개체-관계 다이어그램 (ERD; Entity Relationship Diagram) 표기를 위한 방법론은 정보공학 (information engineering) 기법을 따랐다. 모형의 입력정보 관리 부분과 출력정보 관리 부분으로 나누어 설명하면 다음과 같다.

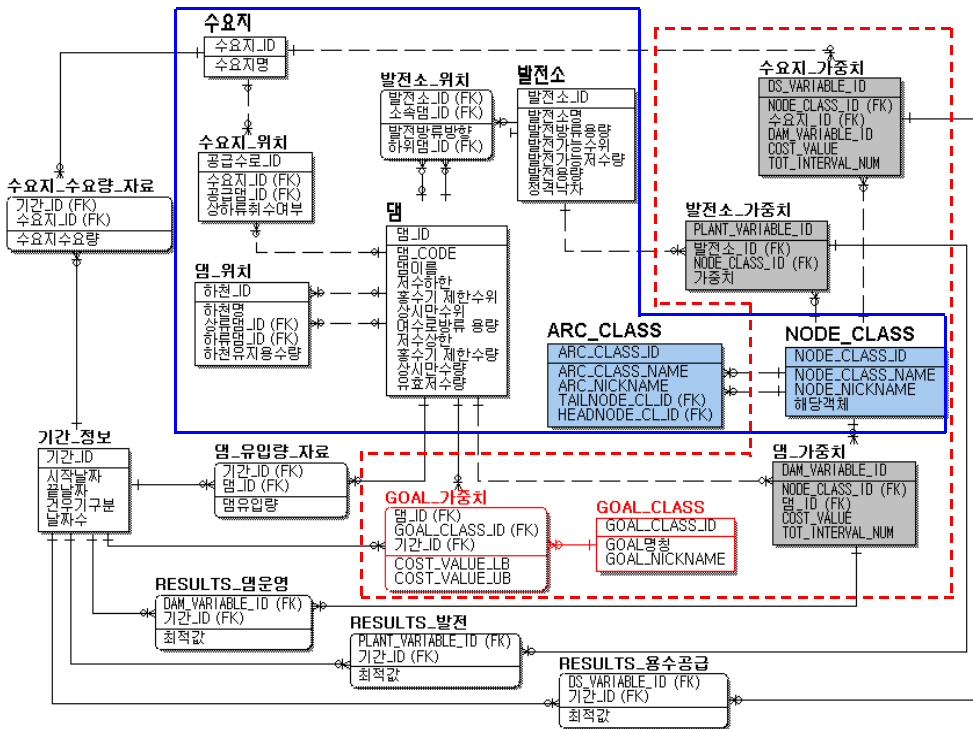


그림 7. 댐 군 연계 운영 모형을 위한 데이터베이스 개체-관계 다이어그램 (ERD).

3.2.1 모형 입력정보(MPS 파일)를 위한 데이터베이스

부록의 식 (1)~(12)에서 목적함수의 가중치, 네트워크 구조 정보, 목표저수량, 발전방류 상하한, 저수 상하한 등과 같은 사용자 정의 상수에 대해서 데이터베이스를 이용하여 관리한다. 즉, 사용자의 정의에 따라 달라질 수 있는 매개변수나 상수만을 데이터베이스 관리 대상으로 한 것이다. 이것은 (3)~(12)의 좌변과 같이 확정적인 내용의 경우, 굳이 데이터베이스화할 필요 없이 DSS의 비즈니스 로직에 포함시키는 편이 효율적이기 때문이다. 전체 스키마를 ① 네트워크 구조를 정의하는 부분, ② 목적함수 가중치 값을 저장하는 부분, ③ 식 (3)~(12)의 사용자 정의 상수를 관리하는 부분으로 나누어 설명하면 다음과 같다.

첫 번째, 네트워크 구조를 정의하는 부분은 실선 박스 안의 [댐_위치], [발전소_위치], [수요지_위치], [NODE_CLASS], [ARC_CLASS] 릴레이션이 중심 역할을 한다. 앞의 3개의 릴레이션은 댐, 발전소, 수요지 간의 상관관계를 정의한다. 그리고, [NODE_CLASS] 릴레이션은 <그림 2>에서 사용된 노드를 역할에 따라 분류한 리스트를 담은 것으로, 그 내용은 <표 1>과 같다. [ARC_CLASS] 릴레이션은 <표 2>와 같이 두 개 노드의 조합에 따라 고려할 수 있는 아크 종류들을 정의한다. 이상 5개 릴레이션의 정보를 조합할 경우 <그림 2>의 네트워크 흐름 모형 구조를 표현할 수 있게 된다.

두 번째, 목적함수 가중치 값을 저장하는 부분은 우측의 점선 박스로 표시된 부분이다. 이 중 [NODE_CLASS]와 [GOAL_CLASS] 릴레이션은 각각 네트워크 모형과 목표 계획법이 적용된 부분의 가중치 종류(변수 종류) 리스트를 저장한다(표 1, 3 참조). 그리고, [NODE_CLASS], [GOAL_CLASS] 릴레이션과 [댐], [발전소], [수요지] 릴레이션을 조인한 [댐_가중치], [발전소_가중치], [수요지_가중치], [GOAL_가중치]에서 식 (1)의 모든 가중치를 관리하게 된다.

한편, 앞서 네트워크 구조를 정의하는 부분에서 노드 종류 리스트를 제공한 [NODE_CLASS] 릴레이션이 여기서는 가중치 종류(변수 종류) 리스트로 재사용된 점에 주목할 필요가 있다. 통상, 네트워크 흐름 모형의 변수는 아크에 대응되므로 가중치 종류 리스트는 아크 종류 리스트, 즉 [ARC_CLASS]에서 관리할 수도 있다. 그러나, 본 네트워크 흐름 모형의 경우 상당수의 아크가 목적함수에 포함되지도 않고, 단지 노드의 흐름량 보존 제약을 위한 용도로만 사용된 점을 감안해야 한다. 예를 들면, <그림 2>에서 소양댐 여수로 방류를 표현한 SPL3, SPW3 아크 중, SPW3는 SPL3의 흐름량과 같고 목적함수에는 포함되지 않아 이 아크에 대한 가중치를 관리할 필요가 없다. 차라리, 노드(SPLN3) 정보에서 가중치(여수로 방류 벌점)를 함께 관리하고, 이 가중치를 노드의 특정한 유입량(SPL3)에 곱해 목적함수를 구성하는 방법이 자료 관리상 효율적이다. 따라서, 레코드 수가 많은 [ARC_CLASS] 릴레이션(<표 2>) 대신 [NODE_CLASS] 릴레이션 (<표 1>)에서 네트워크 흐름 모형 부분의 가중치 종류 리스트를 관리하도록 했다.

<표 1>과 <표 3>의 우측 맨 끝 열은 목적함수 식 (1)의 표현을 위해 [NODE_CLASS], [GOAL_CLASS] 릴레이션이 관리하는 각각의 가중치 종류를 정리한 것이다.

표 1. [NODE_CLASS] 릴레이션의 내용과 가중치 종류와 관계

Node_Class	Node Nickname	해당 객체	아크 (변수)	목적함수 가중치 종류
수퍼소스	SRCN	Null	해당 없음	해당 없음
수퍼싱크	SNKN	Null	해당 없음	해당 없음
댐 노드	DAMN	댐	DIN	제외(=0)
여수로 노드	SPLN	댐	SPL	pspl
발전소 노드	PLTN	발전소	EPR	pepr
하천 노드	BUFN	댐	RLS	제외(=0)
저수 구간 노드	STRN	댐	STR	pstr
수요지 노드	DMDN	수요지	DMD	제외(=0)
물 부족 노드	SHTN	수요지	DSH	pdsh

표 2. <그림 2>를 위한 [ARC_CLASS]의 내용(일부 발췌)

Arc Name	Arc Nickname	Head Node Class	Tail Node Class
댐으로 물 유입	DIN	SRCN	DAMN
댐 저수	STR	DAMN	STRN
댐 저수 (dummy)	STX	STRN	DAMN
발전 방류	EPR	DAMN	PLTN
여수로 방류	SPL	DAMN	SPLN
여수로 방류 (dummy)	SPW	SPLN	PLTN
⋮	⋮	⋮	⋮
수요 미충족	DSH	SRCN	DSHN
수요 미충족 (dummy)	SHX	DSHN	DMDN

표 3. [GOAL_CLASS] 릴레이션의 내용

Goal 명칭	Goal Nickname	목적함수 가중치 종류
홍수기 제한수위 이하로 유지	OVR	povr
관개기를 대비한 최저수위 확보	BSR	pbsr
분석기말 목표 저수위 초과 금지	OTG	potg
분석기말 목표 저수위 미달 금지	UTG	putg

세 번째, 식 (3)~(12)의 사용자 정의 상수를 정의하는 부분은 사이트 제원정보를 관리하는 [댐], [발전소], [수요지] 릴레이션, 그리고 [댐_유입량_자료], [수요지_수요량자료] 릴레이션으로 구성된다. 기간 정보를 담은 [PERIOD_INFO] 릴레이션은 기간에 따라 달라지는 정보들을 효율적으로 저장할 수 있게 한다.

3.2.2 모형 출력 정보를 위한 데이터베이스

<그림 7> 하단 부분의 [RESULTS_댐], [RESULTS_발전소], [RESULTS_수요지] 릴레이션은 CPLEX의 최적화 결과를 저장해서 DSS의 결과 분석 과정에서 활용할 수 있게 한다.

3.3 DSS의 수행 절차

댐 군 연계 운영계획을 위한 DSS의 수행 절차는 <그림 8>과 같이 사전 처리 도구(pre processors), 분석 도구(analytical tool), 사후 처리 도구(post processors)의 3단계로 구성되어 있다. 첫 번째, 사전 처리 단계에서는 <그림 1>과 같은 수계의 물리적인 형태를 정의하고 유입량과 수요량을 입력한다. 두 번째, 분석 단계에서는 전 단계에서 입력된 자료와 모형의 주요 매개변수, 그리고 운영 옵션 설정을 결합하여 수리모형을 정의하고 다중 목적 최적화 과정을 거친다. 마지막, 사후 처리 단계에서는 모형 수행 결과를 다양한 형태의 표와 그래프로 확인할 수 있다.

댐 군 연계 운영 문제의 정의는 <그림 9>와 같은 네트워크 편집기에서 시작된다. 이 화면은 우리나라의 어떤 수계의 형태도 표현할 수 있도록 설계되어 있다. 수계 정의가 완료되면 각 댐별 유입량과 수요지별 수요량을 입력한다.

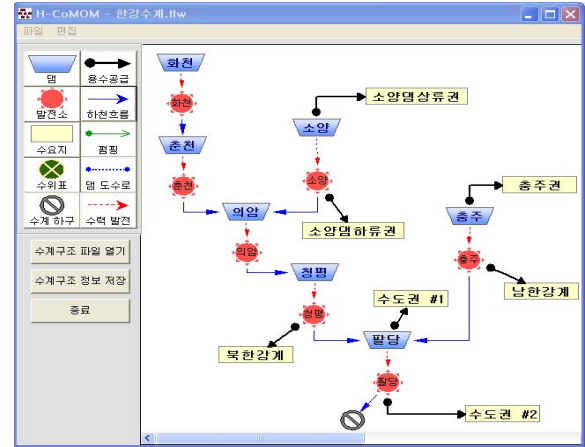


그림 9. 네트워크 구조 설계.

수자원 관련 자료를 입력한 후에는 목적함수 계수, 비선형 함수의 선형 근사화를 위한 구획 구간 수와 같은 수리 모형의 매개변수를 결정한다. 여기서 목적함수 계수는 수동으로 입력할 수도 있지만, <그림 10-b>와 같이 운영정책의 선택 결과에 따라 내장된 계수값이 입력될 수도 있다. <그림 11>은 관개기의 최저확보 수위와 분석기말의 최종 목표 저수위, 그리고 방류량 목표값을 입력하는 화면이다.

수리 모형의 정의를 위한 모든 자료들이 입력된 후에는 <그림 12>와 같은 화면을 통해 다중 목적 계획법을 위한 실험 계획을 수립한다. 즉, 화면과 같이 가중치를 조정하면서 실험할 횟수를 입력하고 기본 가중치에 곱해질 계수값들을 입력하면 된다. 그리고, 화면상의 '가중치 적용' 버튼을 클릭하면 기본 가중치에 계수값이 곱해진 목적함수 가중치들이 반복적으로 적용되면서 지정된 횟수의 실험을 자동으로 수행한다.

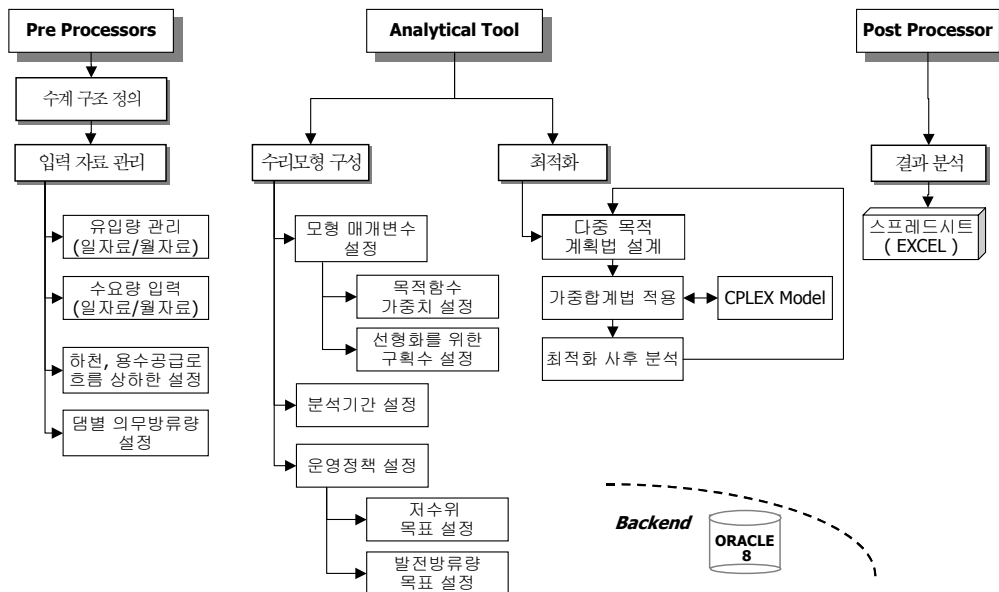


그림 8. DSS의 하부 메뉴 구성도.

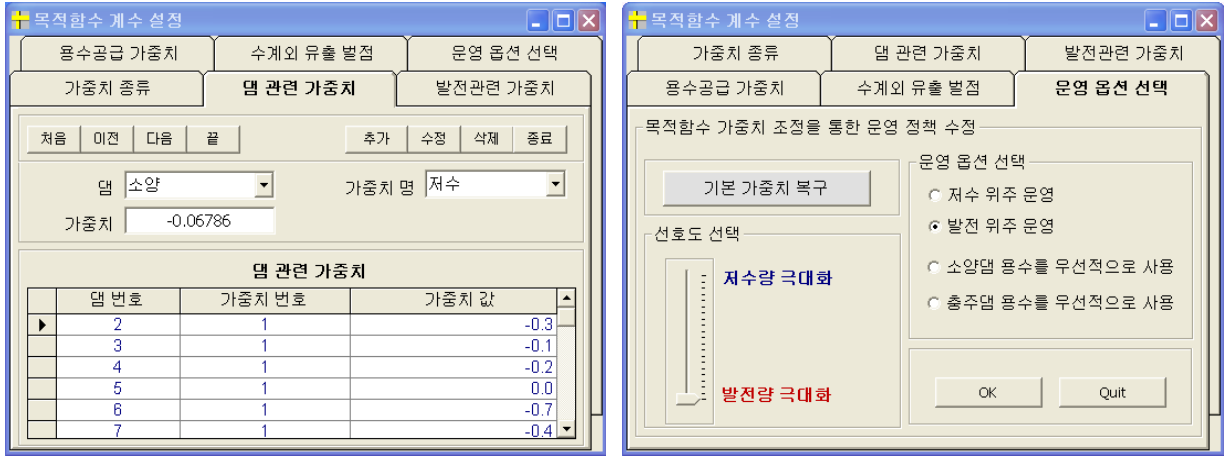


그림 10. 가중치 관련 운영 옵션 설정; (a) 램 관련 가중치 직접 입력, (b) 운영 선호도 설정.

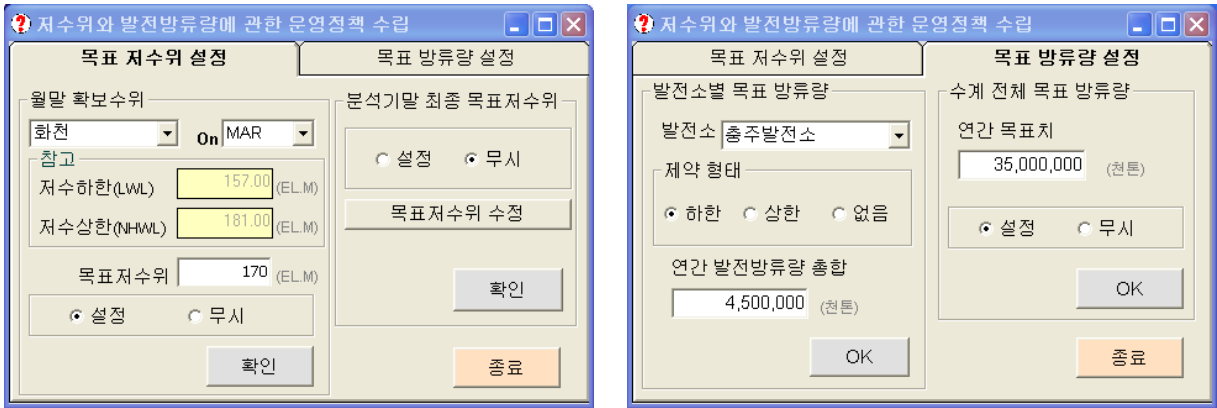


그림 11. 목표(Goal) 관련 운영 옵션 설정; (a) 목표 저수위 설정, (b) 목표 방류량 설정.

Microsoft Excel - Experiments Results(Han River; 2002-12-08).xls

실험 계획표																
저수 가중치							발전 가중치									
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7		
	화전	운전	소양	의양	평형	충주	갈당	화전	운전	소양	의양	평형	충주	갈당		
기본 가중치	-1346.00	-697.00	-3393.00	-669.72	-865.00	-1356.00	-362.00	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18		
변경 여부	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes		
실험 횟수	20		가중치 적용				DSS 메인으로									
ID	값	값	값	값	값	값	값	값	값	값	값	값	값	값		
1	10/1	-13,460.0	-6,970.0	-33,930.0	-6,697.2	-8,650.0	-13,560.0	-3,620.0	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
2	5/1	-6,730.0	-3,485.0	-16,965.0	-3,348.6	-4,325.0	-6,780.0	-1,810.0	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
3	1/1	-1,346.0	-697.0	-3,393.0	-669.7	-865.0	-1,356.0	-362.0	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
4	1/10	-134.6	-69.7	-339.3	-67.0	-86.5	-135.6	-36.2	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
5	1/50	-26.9	-13.9	-67.9	-13.4	-17.3	-27.1	-7.2	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
6	1/100	-13.5	-7.0	-33.9	-6.7	-8.7	-13.6	-3.6	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
7	1/200	-6.7	-3.5	-17.0	-3.3	-4.3	-6.8	-1.8	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
8	1/300	-4.5	-2.3	-11.3	-2.2	-2.9	-4.5	-1.2	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
9	1/400	-3.4	-1.7	-8.5	-1.7	-2.2	-3.4	-0.9	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
10	1/460	-3.0	-1.5	-7.5	-1.5	-1.9	-3.0	-0.8	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
11	1/500	-2.7	-1.4	-6.8	-1.3	-1.7	-2.7	-0.7	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
12	1/500	-2.2	-1.2	-5.7	-1.1	-1.4	-2.3	-0.6	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18
13	1/500	-1.0	-0.5	-2.6	-0.5	-0.6	-1.0	-0.3	1/1	-1.79	-4.00	-5.13	-3.50	-2.60	-8.39	-3.18

그림 12. 다중 목적 계획법을 위한 실험계획 화면.

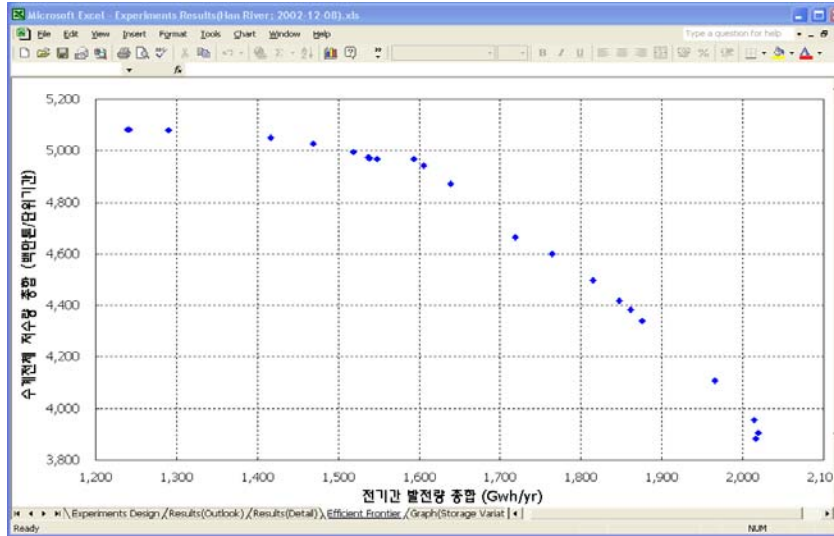


그림 13. 발전량과 저수량의 상관관계를 보여주는 efficient frontier.

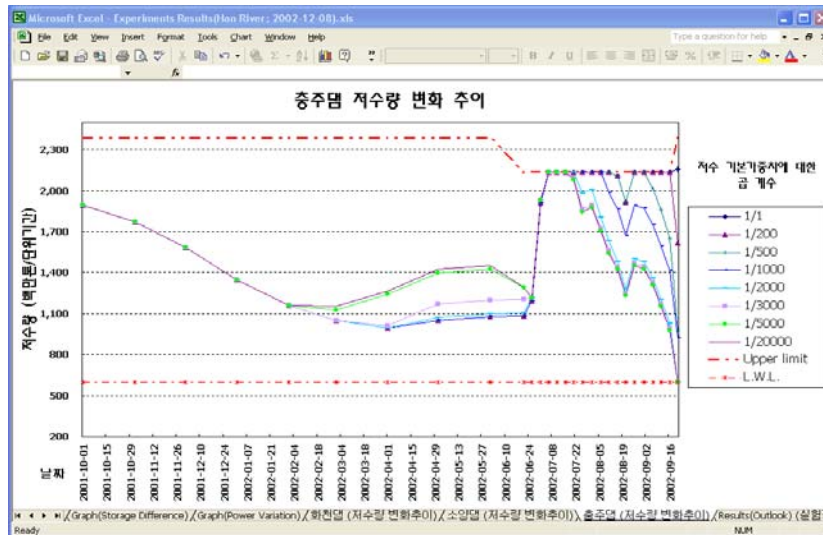


그림 14. 가중치에 따른 저수 변화 추이 비교 (중주담).

<그림 13>은 실험 결과의 예로 저수위와 발전량의 상관관계를 보여주는 유효해 집합의 efficient frontier를 도시하고 있다. 그리고, <그림 14>는 사용자로부터 선택받은 일부 가중치를 적용할 경우의 저수위 변화추이를 보여주고 있다.

사용자는 <그림 13>과 <그림 14>를 통해 적절한 운영대안을 선택할 수 있다. 만일 원하는 결과가 포함되지 않았다면 <그림 12>의 실험 계획단계로 돌아가 다른 가중치들을 적용하거나 <그림 10>과 <그림 11>화면에서 운영 옵션을 변경하고 수행할 수 있다. 한편, 시스템의 전체 수행시간은 자료 준비에서 그래프 출력까지 약 2~3분 정도로 실무 적용하기에 적당한 수준이었다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 수자원 운영계획 시스템과 같이 최적화 모형을 사용자 지원 시스템으로 개발하는 경우, 모형과 데이터 베이스의 자료 구조상의 차이로 인해 발생하는 모형 구현상의 어려움을 극복하고자 하는 것이다. 특히, 최적화 엔진으로 CPLEX와 같은 외부의 최적화 소프트웨어를 활용하는 경우 CPLEX의 최적화 결과를 해석해서 데이터베이스에 로딩하는 과정에서 방대한 데이터베이스 트랜잭션이 발생하는 등, 두 부분 간 자료 구조의 차이로 전체 분석 시간의 상당 부분을 소비하는 문제가 해결해야 할 과제이다.

본 연구에서는 수자원 운영계획을 위한 사용자 지원 시스템

의 효과적인 구현을 위해 수리 계획 모형의 자료 구조를 활용하는 방법을 제안해 보았다. 즉, 모형의 변수와 제약식의 명칭에 대해 동적 네트워크 모형의 특징을 활용한 구조화된 명명법을 적용하였다. 이 명명법을 토대로 최적화 모형의 변수명 자체가 데이터베이스 릴레이션 역할을 할 수 있게 되었으며, 댐 군 연계 운영 모형의 구현에 적합한 데이터베이스 스키마를 설계할 수 있었다. 여기서 설계한 데이터베이스를 토대로 한강 수계의 댐 군 연계 운영계획 수립을 위한 의사결정 지원 시스템을 구현할 수 있었다. 이 시스템은 현재 한국수자원 공사를 통해 한강 수계와 섬진강 수계의 효율적인 운영계획 수립 과정에 실제 적용되고 있다.

한편, 본 연구에서 제시한 데이터베이스 스키마는 다른 수리 계획 모형의 구현에 참고자료가 될 수 있을 것이며, 특히 네트워크 흐름 형태를 기반으로 하는 최적화 모형에 잘 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 연구 과제로는 구조화된 명명법이 자료 처리 속도에 어느 정도의 개선효과를 주는지에 대한 정량적인 분석을 수행하고, 객체 지향 또는 객체 관계형 데이터베이스와 같은 다른 형태의 데이터베이스와의 성능비교를 통해 수리계획 모형을 위한 더 나은 형태의 데이터베이스를 구현하는 것이다.

부록

◆ 상수 정의

- TS: 총 계획기간 집합={1,2,...,T}
- RES: 수계 내 댐들의 집합
- DMS: 수계 내 수요지들의 집합
- PLT: 수계 내 발전소들의 집합
- FLP: 홍수기 기간 집합
- FRP_i: 관개기를 대비하여 댐 i의 목표 저수위(하한)가 설정된 기간 집합
- MWL_i: 댐 i의 홍수기 제한 수위(상한)
- STR_i^{max}: 댐 i의 최대 저수 상한
- SPL_i^{max}: 댐 i의 여수로 방류 상한
- STR_k^{opr}: 발전소 k의 발전 방류가 가능한 최저확보 저수량
- EPR_k^{max}: 발전소 k의 발전 방류 상한
- RST_i^t: 댐 i의 관개기 t의 목표 저수위(하한)
- TAR_i: 댐 i의 분석기말 최종 목표 저수위
- A_i: 댐 i의 저수 구획 구간 개수
- B_j: 수요지 j에서 용수 공급 구간 개수
- TPW_k^{min}: 발전소 k의 연간 총 발전방류 요구량
- TPW^{min}: 수계 전체의 연간 총 발전방류 요구량
- pstr_{is}: 댐 i의 s 번째 저수 구획 구간의 저수 가중치
- pspl_i: 댐 i의 여수로 방류 가중치
- pepr_k: 댐 k의 발전 방류 가중치
- pdsh_{js}: 수요지 j의 s 번째 용수 공급 구간의 부족 별점

- povr_i: 댐 i의 홍수기 제한수위 초과에 따른 별점
- pbsr_i: 댐 i의 관개기 목표 저수위(하한) 미달에 따른 별점
- potg_i: 댐 i의 기말 목표 저수위 초과에 따른 별점
- putg_i: 댐 i의 기말 목표 저수위 미달에 따른 별점

◆ 변수 정의

- STR_{is}^t: 기간 t에서 댐 i의 s 번째 저수구간 저수량
- SPL_i^t: 기간 t에서 댐 i에서의 여수로 방류량
- EPR_k^t: 기간 t에서 발전소 k의 발전 방류량
- DSH_{js}^t: 기간 t에서 수요지 j의 s 번째 공급 구획 구간 부족량
- OVR_i^t: 기간 t에서 댐 i의 제한수위 초과 저수량
- BSR_i^t: 관개시 t에서 댐 i의 목표 저수위 미달량
- TGR_i⁺: 분석 기말 댐 i의 목표 저수위 초과량
- TGR_i⁻: 분석 기말 댐 i의 목표 저수위 미달량
- B_SPL_i^t: 기간 t에 댐 i의 여수로 방류가 가능하면 1, 아니면 0
- B_EPR_k^t: 기간 t에 발전소 k의 발전방류 가능하면 1, 아니면 0

◆ 모형 수식

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{t \in TS} \left[\sum_{i \in RES} \left(\sum_{s=1}^{A_i} pstr_{is} \cdot STR_{is}^t \right) + pspl_i \cdot SPL_i^t \right] \\
 & + \sum_{t \in TS} \left[\sum_{k \in PLT} pepr_k \cdot EPR_k^t + \sum_{j \in DMS} \sum_{s=1}^{B_j} pdsh_{js} \cdot DSH_{js}^t \right] \quad (1) \\
 & + \sum_{i \in FLP} \sum_{i \in RES} povr_i \cdot OVR_i^t + \sum_{t \in FRP_i} \sum_{i \in RES} pbsr_i \cdot BSR_i^t \\
 & + \sum_{i \in RES} (potg_i \cdot TGR_i^+ + putg_i \cdot TGR_i^-)
 \end{aligned}$$

s.t.

■ 네트워크 흐름 모형 부분

$$\text{각 노드의 흐름량 보존 제약} \quad (2)$$

$$\text{각 아크의 흐름량 상하한 제약} \quad (3)$$

■ 조건 제약식을 혼합 정수 계획법으로 표현한 부분

$$B_SPL_i^t \leq \left(\sum_{s=1}^{A_i} STR_{is}^t \right) / STR_i^{\max} \quad i \in RES, t \in TS \quad (4)$$

$$SPL_i^t \leq SPL_i^{\max} \cdot B_SPL_i^t \quad i \in RES, t \in TS \quad (5)$$

$$B_EPR_k^t \leq EPR_k^t / STR_k^{opr} \quad k \in PLT, t \in TS \quad (6)$$

$$EPR_k^t \leq EPR_k^{\max} \cdot B_EPR_k^t \quad k \in PLT, t \in TS \quad (7)$$

■ 저수 목표 (Goal) 옵션을 표현한 부분

$$\sum_{s=1}^{A_i} STR_{is}^t - MWL_i - OVR_i^t \leq 0 \quad i \in RES, t \in FLP \quad (8)$$

$$\sum_{s=1}^{A_i} STR_{is}^t - RST_i^t + BSR_i^t \geq 0 \quad i \in RES, t \in FRP_i \quad (9)$$

$$\sum_{s=1}^{A_i} STR_{is}^t - TGR_i^+ + TGR_i^- = TAR_i \quad i \in RES, t = T \quad (10)$$

■ 발전 방류량 요구 옵션을 표현한 제약식

$$\sum_{t \in TS} EPR_k^t \geq TPW_k^{\min} \quad k \in PLT \quad (11)$$

$$\sum_{t \in TS} \sum_{k \in PLT} EPR_k^t \geq TPW^{\min} \quad (12)$$

■ 이진 정수 변수 제약

$$B_SPL_i^t \in \{0, 1\} \quad i \in RES, \quad t \in TS \quad (13)$$

$$B_EPR_k^t \in \{0, 1\} \quad k \in PLT, \quad t \in TS \quad (14)$$

참고문헌

Al-Shemmeri, T., Al-Kloub, B., and Pearman, A. (1997), Computer aided decision support system for water strategic planning in Jordan, *European Journal of Operations Research*, 102, 455-472.
 Andreu, J., Capilla, J., and Sanchis, E. (1996), AQUATOOL, A generalized decision support system for water-resources planning and operational management, *Journal of Hydrology*, 177, 269~291.
 CPLEX Division (2000), CPLEX 7.0 Users Manual, ILOG, Incline Village, NV.
 Fedra, K. and Jamiecon, D. G. (1996), The "WaterWare" decision-support System for river-basin planning. 2. Planning Capability, *Journal of Hydrology*, 177, 177-198.
 Fourer, R. (1997), Database structures for mathematical programming models,

Decision Support Systems, 20, 317-344.
 Kim, S.K. (1999), Hydro Energy from Multiple Reservoir Operation, HYDRO'S FUTURE Technology, Markets, and Policy, Proceedings of the WATERPOWER '99 Conference, Las Vegas, USA, Water Resources Session 23: *Decision Support System II*, 2.
 Kim, S. K. (1988), Methodologies for Reservoir Operation (Bibliographical Review), *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, 21(1), 16~24.
 Kim, S. K. and Park, Y. J. (1998), A Mathematical Model for Coordinated Multi-reservoir Operation, *Journal of Korea Water Resources Association*, 31(6), 777~791.
 Klein, D. and Hannan, E. (1982), An Algorithm for the Multiple objective Integer Linear Programming Problem, *European Journal of Operational Research*, 9, 378-385.
 MOCT (Ministry of Construction & Transportation) (2002), http://www.moct.go.kr/DH/mct_hpg/mcthp_g_wa/mcthp_wa/mcthp4.htm
 PAI (Population Action International) (2000), People in the Balance: Population and Natural Resources at the Turn of the Millennium, PAI, Washington, DC., 8-9.
 ReVelle, C. (2000). Research challenges in environmental management, *European Journal of Operational Research*, 121(2), 218-231.
 Shih, J. S. and ReVelle, C. (1995), Water Supply Operations during Drought: A Discrete Hedging Rule, *European Journal of Operational Research*, 82(1), 163-175.
 Stam, A., Salewicz, K.A., and Aronson, J.E. (1998). An interactive reservoir management system for Lake Kariba, *European Journal of Operational Research*, 107(1), 119-136.
 Steuer, R. E. (1986), Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application, John Wiley & Sons.



김재희

고려대학교 산업공학 학사
 고려대학교 산업공학 석사
 고려대학교 산업공학 박사 수료
 현재: 고려대학교 정보통신기술공동연구소 연구원
 관심분야: 다목적 계획법, 물류 및 교통 시스템 분석, 수자원 및 환경 시스템 분석



박영준

고려대학교 산업공학 학사
 고려대학교 산업공학 석사
 고려대학교 산업공학 박사
 현재: 한국전자통신연구원 인터넷경제연구팀 선임연구원
 관심분야: 경제성분석, CRM, 의사결정 지원시스템, 수자원 및 환경시스템 분석



김승권

서울대학교 기계공학 학사
 Stanford University 산업공학 석사
 UCLA 시스템공학 박사
 현재: 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수
 관심분야: 경제성 분석, 다기준 의사결정 분석, 생산 및 설비 관리의 DBMS를 활용한 의사결정 지원 시스템의 개발, SCM, 수자원 시스템 분석 등의 시스템 분석 기법의 현실적 응용 분야