

수리계획 모형 자료구조를 활용한 수자원 운영 계획 시스템의 설계

Design of Water Resource Planning System Utilizing Special
Features in Mathematical Programming Data Structure

JaeHee Kim*, Youngjoon Park*, Sheung-Kown Kim*

*Department of Industrial Engineering, Korea University

Abstract

Due to the complexities of the real-world system, a water resource management program has to deal with various types of data. It appears that management personnel who has to use the program usually suffers from the technical burdens of handling large amount of data and understanding the optimization theory when they try to interpret the results.

By combining the capabilities of database technology and modeling technique with optimization procedure we can develop a reliable decision supporting tool for multi-reservoir operation planning, which yields operating schedule for each dam in a river basin. We introduce two special data handling methodology for the real world application. First, by treating dams, hydro-electric power generating facilities and demand sites as separate database tables, the proposed data handling scheme can be applied to general water resource system in Korea. Second, by assigning variable names using predetermined key words, we can save searching time for identifying the meaning of the variables, so that we can quickly save the results of the optimization run to the database.

1. 서론

현재 우리 나라의 연간 강수량은 세계평균보다 높은 편이지만 연도별, 지역별, 계절별 강수량의 차이가 크고 변화의 폭이 큰 것에 비하여 총 댐 저류량의 규모가 작은 편이어서 수자원 관리에 매우 불리한 조건을 갖고 있다. 특히 1990년대 들어서는 지역적으로 물 부족이 발생하고 있으며 지금의 수요추세라면 2000년대에 심각한 부족이 일어날 것으로 예상되고 있다. 따라서 한정된 수자원을 효율적으로 관리할 필요가 있으며 이것은 21세기 국가 경쟁력 확보차원에서 매우 중요한 일이라 할 수 있다¹⁾.

수자원의 효율적 사용을 공급측면에서 생각해보면 댐에 저수된 물을 효과적으로 이용하는 문제로 귀결될 수 있는데 이것은 시스템의 관점에서 확보된 수자원을 댐 건설의 목적에 따라 시간 및 공간별로 적절하게 할당 시키는 것이라고 할 수 있다. 댐의 공급목적은 용수공급, 수력발전, 주운, 수질보전, 생태계보전, 오락 및 휴식공간의 확보, 홍수조절 등의 대체로 한가지 이상의 목적과 관련되어 있다[1].

여기서 댐 운영이라 함은 정해진 시점에 얼마의 용수를 방류해야 하는지를 결정하는 문제로 적절한 운영방안을 찾기 위해서 시뮬레이션 기법과 최적화 기법들이 사용되고 있다. 그런데 유입량 예측 자료의 불확실성이나 댐 운영의 다중 목적 등의 특징으로 인해 적합한 운영 대안을 도출해 내기는 그

리 쉬운 일이 아니다. 즉 일정기간 동안의 운영 계획을 수립하기 위해서는 가능한 수문 조건에 대해 수 차례의 모의실험을 통한 충분한 분석을 거쳐야 한다. 한편 시뮬레이션 기법이든 최적화 기법이든 분석과정에는 방대한 입출력 자료가 발생하며 이로 인해 전체 분석 시간의 엄청난 증가를 가져올 수 있다. 따라서 효과적인 수자원 운영 계획 수립을 위해서는 입출력 자료의 체계적인 관리와 함께 방대한 자료를 쉽게 처리하는 사용자 시스템의 지원이 필요하다.

컴퓨팅 기술의 발달과 더불어 성공적인 수자원 운영 계획 및 관리를 위한 컴퓨터 지원 시스템들이 속속 구현되고 있다. 이러한 컴퓨터 프로그램은 다양한 운영 대안을 제시할 수 있는 의사결정 지원 시스템(DSS)의 형태를 띄고 있다.

수자원 운영 계획 수립을 위한 대표적인 의사결정 지원 시스템으로 AQUATOOL, DELFT RIBASIM, WaterWare 등을 꼽을 수 있다. AQUATOOL은 스페인의 Segura River와 Tagus River를 대상으로 적용되고 있으며 OPTIGES라는 최적화 모형을 이용해서 수자원 운영 계획 및 관리를 하고 있다[3]. DELFT의 RIBASIM은 시뮬레이션 기법을 통해 다양한 수문조건에 대한 모의실험 결과를 도출하고 이를 토대로 수자원 운영 정책을 결정할 수 있다. WaterWare는 WRA(Water Resource Assessment)라는 시뮬레이션 모형을 통해 수자원 운영 계획 및 정책 수립을 도와주는 기능을 갖추고 있다[4]. 이외에 수자원 운영문제의 다중 목적 특징을 고려하기 위해 다기준 분석기법(Multi-criteria decision aid)을 활용한 전략적인 차원에서의 수자원 운영 방안 수립을 시도한 사례도 찾을 수 있다[7]. 이러한 과제들은 대

¹⁾ http://www.moct.go.kr/mct_hpg/mctthpg_wa/mcthp_wa/mcthp15_1.htm

부분 국가적인 차원에서 추진되고 있으며 기본적으로 자국의 수자원 시스템 실정을 반영할 수 있도록 설계되어 있다.

국내의 경우 네트워크 모형 기반의 혼합 정수계획 모형을 사용하여 댐 군의 최적 운영방안 도출을 시도한 CoMOM (Coordinated Multi-reservoir Operating Model)을 예로 들 수 있다. 이 모형은 국내 한강 수계의 실제 적용을 위해 개발되었으며 이의 효과적인 활용을 위해 사용자 프로그램으로 구현되었다. 그리고 CoMOM 의 모의 실험 결과는 CoMOM 을 적용하지 않았을 때 보다 우수한 결과를 보여주고 있다[6]. 그런데 소프트웨어 사용자 입장에서 볼 때는 한강 수계에만 적용될 수 있는 점, 댐 운영자를 위한 다양한 의사결정 지원 기능의 미약하다는 점, 그리고 분석수행 시간이 오래 걸린다는 점으로 인해 실제 활용과정에는 어려움이 있었다. 특히 수학 모형 관련 자료와 데이터베이스와의 연계과정에서의 방대한 데이터베이스 트랜잭션으로 인해 1년 정도를 분석하는데 20분 정도가 소요 되었다.

본 연구에서는 CoMOM 의 구현 소프트웨어에서 나타난 문제점을 극복할 수 있는 방법들을 제안해 본다. 즉 프로그램 수행의 핵심 단계인 수학모형 입력자료 생성과 최적화 결과의 해석단계에서 대부분의 데이터 트랜잭션이 발생한다는 점에 착안해서 수학모형의 입출력 자료처리 속도를 향상시킬 수 있는 데이터 처리 방법을 시도해 보았으며 이를 통해 빠른 프로그램 수행을 보장할 수 있었다. 그리고 특정 수계에 국한되지 않고 국내의 다른 수계에도 범용적으로 적용될 수 있도록 하였다. 마지막으로 여기서 제안한 시스템 구현 방법론을 CoMOM 의 발전된 형태인 SJ-CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model for Sum-Jin River Basin)에 적용해서 섬진강 수계의 댐 운영 계획 수립 과정에 활용하고 그 타당성을 검토해 보았다[5].

2. 의사결정 지원 시스템

2.1 시스템 모듈 구성

댐 군 연계 운영을 위해 다음과 같은 시스템을 설계해 보았다. 전체적으로는 최적화 부분을 담당하는 분석부분과 이를 중심으로 사전 처리부분(Preprocessor)과 최적화 결과를 그래픽 형태로 출력해 주는 후처리 부분(Postprocessor)의 세 부분으로

나눌 수 있다. 사전처리와 후처리 부분에서는 모든 데이터를 서버측의 DBMS 에 저장하고 원하는 형태로 가공하는 역할을 담당하고 있다. 특별히 후처리 부분에서는 마이크로소프트 엑셀 원격 자동화를 통해 데이터베이스 형태의 자료를 엑셀파일로 저장시키고 원하는 형태의 그래픽 자료를 출력할 수 있도록 했다. 핵심 부분인 최적화 부분에서는 데이터베이스 내부 자료와 최적화 모듈과의 통합 인터페이스를 제공해서 의사결정 지원 시스템이 최적화 기능을 포함할 수 있도록 했다.

최적화 수행은 CPLEX Callable Library 의 DLL 호출 기법을 사용함으로써 외부 최적화 툴이 사용되는지 느낄 수 없을 정도의 일관된 유저 인터페이스를 구현했다.

프로그램은 Microsoft Visual Basic 6 으로 개발되었으며 DBMS 는 ORACLE 8, 최적화 툴은 CPLEX 6.5 를 사용했다. 프로그램 구동 환경은 서버 측에 Windows NT 4.0, 클라이언트 측에 Windows NT 4.0 또는 Windows 98/95 를 사용할 수 있다. 데이터 베이스 연동은 속도 향상을 위해 Visual Basic 자체의 ODBC 구현 방식인 RDO 나 ADO 를 사용하는 대신 직접 ODBC API 를 사용해서 데이터베이스 운용의 성능향상을 꾀했다.

의사결정 지원 시스템의 구성 모듈들을 도식화 하면 <그림 1>과 같다.

2.2 주요 기능 설명

2.2.1 네트워크 구조(Network Specification)

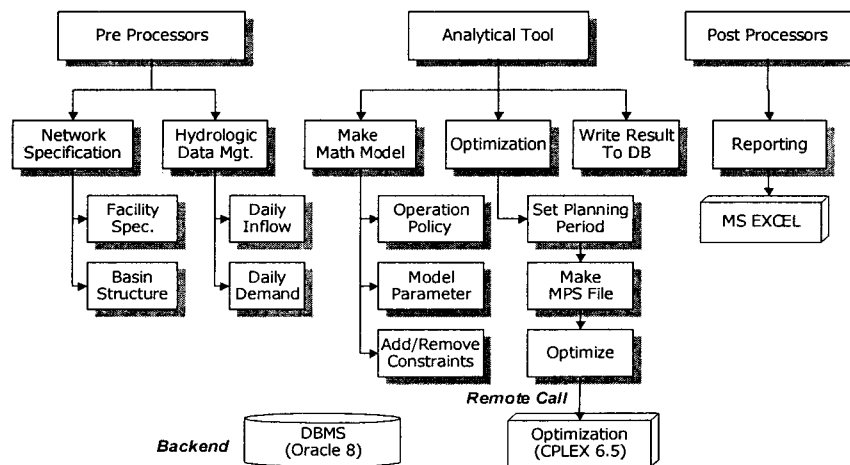
수계 내의 댐, 수력발전소, 수요지와 같은 주요 시설물의 제원을 관리하고 추가/삭제 할 수 있으며 이들 간의 위치 상관관계를 입력해서 수계의 구조를 정의한다. 이 부분은 댐, 발전소,수요지를 별도의 테이블로 관리하고 이들간의 상관 관계를 관리하는 별도의 테이블을 유지함으로써 이들 데이터만 수정하면 수계구조가 바뀔 수 있도록 했다. 이렇게 함으로써 개발된 시스템이 특정 수계에만 국한 되지 않고 다른 수계 구조에도 적용할 수 있도록 했다.

2.2.2 수문자료관리(Hydrologic Data Management)

일 자료 형태로 유입량과 수요량을 관리한다.

2.2.3 최적화 모형 구성(Make Math Model)

- 1) 운영 정책(Operation Policy)의 선호도 선택
크게는 저수위주정책과 발전위주 정책 간의 선



<그림 1> 의사결정 지원 시스템 모듈 구성

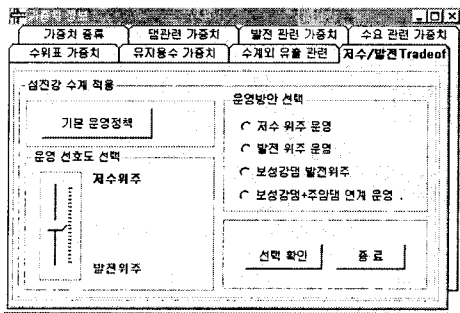
호도를 선택할 수 있고 댐간의 저수 우선순위나 용수 공급의 우선순위를 결정한다. 그리고 특정 수계에만 해당하는 운영 정책을 선택적으로 사용할 수도 있다[그림 2].

2) 모형 매개변수 (Model Parameter)조정

CoMOM에서는 극단(extreme point) 해를 찾아가는 선형계획 모형의 단점을 극복하기 위해 댐의 저수구간과 수요를 구간별로 선형화(Piecewise Linearization) 시켰는데 여기서 그 구간의 수를 결정한다[6].

3) 운영 조건의 추가/삭제

댐 연계운영시 필요한 조건 제약을 선택적으로 적용할 수 있다. 예를 들어 관개기를 대비해서 관개기 시작 전에 반드시 유지해야 하는 수위를 지정할 수도 있고 각 댐별로 최소한의 발전 방류량을 지정할 수도 있다. 또한 분석기간 말 각 댐이 만족해야 하는 목표 저수위를 고려할 것인지 여부를 선택할 수 있다.



<그림 2> 데모화면 : 운영 선호도 선택

2.2.4 최적화(Optimization)

1) 분석기간 설정(Set Planning Period)

분석을 원하는 기간의 시작 날짜와 끝 날짜를 정하고 분석기간의 크기를 정한다.

2) 모형 파일 생성(Make MPS File)

데이터베이스에 저장되어 있는 일 자료 형태의 유입량, 수요량 자료를 분석기간에 맞게 가공해서 데이터베이스에 저장하고 이들 자료와 네트워크 정보를 이용해서 수확모형의 입력파일을 MPS 형태로 생성한다.

3) 최적화 수행(Optimize)

혼합 정수계획문제의 최적화를 수행하고 그 결과를 저장한다.

2.2.5 결과 저장

최적해 결과를 데이터베이스로 변환한다.

2.2.6 결과 출력

데이터베이스에 저장된 최적화 결과를 마이크로소프트 엑셀 파일 형태로 저장하고 텍스트 형태와 그래픽 형태의 결과를 출력한다.

3. 수리 계획 모형 자료 구조 활용

3.1 DSS와 최적화 모듈의 인터페이스

최적화 모형을 구동하는 부분은 크게 수확모형 입력파일 생성 단계, 최적화 수행 단계, 최적화 결과의 해석 단계로 나눌 수 있다. 부연하면 데이터베이스의 자료내용과 수리계획 모형을 정의하는 로직에 의해 최적화 모형의 입력파일을 생성해서 최적화 모듈로 넘겨주고 CPLEX의 Callable Library를 DLL 호출하는 방식으로 최적화를 수행한 다음, 최적화 결과로 만들어지는 텍스트 형태의 파일을 해

석해서 사용자 데이터 베이스에 저장하는 순서로 진행된다.

수확모형의 입력자료는 LP 또는 MPS 표현방식에 의해 파일로 저장할 수 있다. 여기서 MPS 형식은 수리계획 모형을 각 변수입장에서 해석해서 변수들이 각 제약식에 어떤 계수치를 가지고 있는지를 표현함으로써 모형식을 정의하고 있다. 변수입장에서 모형을 해석한 이 방식은 변수의 추가 삭제나 변수의 계수치 수정작업이 용이해서 수확모형의 입력파일로 널리 사용되고 있으며 본 연구에서는 이 방식을 채택했다[2].

<그림 3,4>는 MPS 파일과 최적화 모형 결과파일의 모습이다. 최적화 수행을 위해서 <그림 3>과 같은 형태의 MPS 파일을 만들어 CPLEX에 입력하면 최적화 수행 후 <그림 4>와 같은 형태와 파일을 생성한다. 최적화 모듈을 DSS에 포함시키는 데 가장 중요한 부분은 입력파일 처리의 인터페이스와 관련되어 있다.

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				

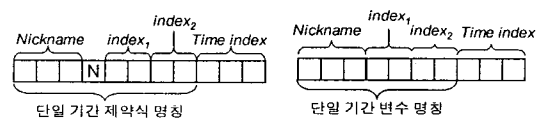
<그림 3> MPS 파일(예제)

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

<그림 4> 최적화 결과 파일(예제)

3.2 CoMOM 자료 구조 특성을 활용한 수리계획 모형 입출력 파일 처리

CoMOM에서는 분석기간이 1년만 되더라도 8,281개의 변수와 9,021개의 제약식이 포함된다. 따라서 <그림 4>와 같은 결과를 읽어 각 변수가 어느 기간, 어느 댐에서 어떤 역할을 하는지를 파악하고 데이터베이스에 저장하기 위해서는 변수의 미 파악에 필요한 모든 데이터를 미리 데이터베이스에 저장해 놓고 있어야 하며 해석과정에서 상당한 데이터베이스 트랜잭션을 필요로 한다. 이 문제를 해결하기 위해 변수 의미 파악에 필요한 데이터의 저장과 조회를 피하고 변수명 자체만으로 대략적인 의미를 파악할 수 있도록 <그림 5>와 같은 제약식과 변수의 명명법을 적용해 보았다.

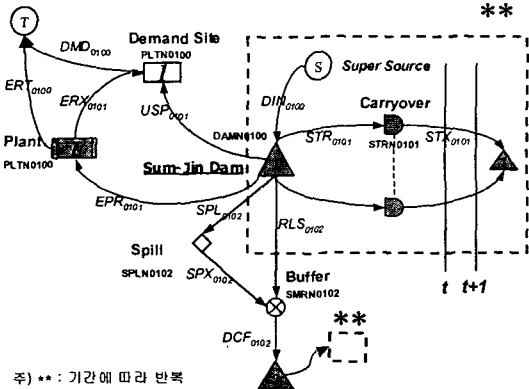


<그림 5> 제약식, 변수명칭 부여 방

그림에서 맨 오른쪽 3개의 컬럼은 기간변호표시를 위해 할당되어 있다. 이것은 CoMOM에서 사용

한 네트워크 구조가 분석기간에 따라 동일한 패턴이 반복되는 동적 네트워크 모형 형태를 갖는 특성을 반영한 것이다. 참고로 동적 네트워크 모형 중 단일 기간에 대한 네트워크에서 일부분을 발췌해서 도시하면 <그림 6>과 같다. 그림에서 각 노드의 모양은 그 역할에 따라 달라지며 같은 역할을 하는 노드의 경우 동일한 모양이 네트워크에 여러 개 그려질 수 있다. 따라서 유량의 흐름을 의미하는 아크 역시 양쪽 끝 노드의 모양에 따라 그 역할이 정의된다. 한편 각 노드는 유량 보존 법칙에 해당하는 제약식에 해당하며 아크는 변수를 의미한다.

제약식과 변수명의 맨 앞 3 개의 컬럼은 제약식



<그림 6> 단일 기간 네트워크 구조

과 변수의 닉네임에 해당되며 그 역할을 의미하는 문자열로 구성된다. 따라서 제약식의 닉네임은 노드의 모양에 의거해서 부여된다. 예를 들어 삼각형으로 표시되는 '댐'노드에 대한 유량보존 제약은 'DAMN'이라는 닉네임을 부여 받는다. 변수의 닉네임 역시 양쪽 끝 노드 조합에 의해 식별되는 아크 모양에 따라 닉네임을 부여했다. 예를 들어 수력발전량을 의미하는 변수는 '댐'을 의미하는 삼각형에서 '발전소'를 의미하는 세로줄이 있는 사각형으로 향하는 아크에 해당되며 'EPR'이라는 닉네임이 부여된다.

제약식과 변수명의 4~7 번째 컬럼에 해당하는 index1 과 index2 는 단일기간 네트워크 그림에서 닉네임외에 정보를 추가함으로써 아크를 유일하게 식별할 수 있도록 해준다. 예를 들어 'EPR'아크의 경우 index1 은 댐번호, index2 는 발전소 번호를 의미해서 같은 발전이라 하더라도 어느 발전소의 수력발전을 의미하는지 구별해 준다. 다른 노드와 아크에 대해서도 비슷한 규칙이 적용된다. 이상의 규칙으로 변수명을 할당한다면 네트워크 구조상의 모든 변수와 제약식을 그 이름만으로 식별할 수 있으며 <그림 6>을 완성할 수 있다. <표 1>은 일부 아크의 닉네임 할당 결과를 보여주고 있다.

<표 1> 아크 닉네임 부여 결과(예시)

[EPR, DAMN, PLTN], [SPL, DAMN, SPLN]
[SPX, SPLN, SMRN], [SPW, SPLN, PLTN]
[DIN, SSRN, DAMN], [STR, DAMN, STRN]
[STX, STRN, DAMN], [RLS, DAMN, SMRN]
[RLX, PLTN, SMRN], [DCF, SMRN, DAMN]

한편 네트워크 모형에서는 각 노드에서의 유량 보존 법칙에 의해 많은 아크에 대한 해석이 불필요하다. 예를 들어 <그림 6>에서 SPL0102 와

SPX0102 는 같은 값을 갖는 것이 당연하다. 이러한 특성을 감안해서 최적화 결과 파일을 데이터베이스로 변환시킬 때는 아크 닉네임을 기준으로 사용자가 필요로 하는 변수 종류만을 찾아서 데이터베이스로 변환했다.

최적화 파일의 해석 이전 단계에서 MPS 파일을 작성할 때 <그림 6>과 같은 네트워크 정보를 내부적으로 만들 수 있어야 한다. 이 과정에서 기존 데이터베이스에 대한 조회 트랜잭션이 발생한다. 그런데 <그림 6>에서 알 수 있듯이 단일 기간에 대한 네트워크 정보가 매 기간마다 반복되기 때문에 단일기간에 대한 네트워크 모형만 구성하고 이 정보를 메인 메모리에 저장했다 분석기간이 늘어남에 따라 반복적으로 사용했다.

이상의 절차를 적용한 결과 1 년을 분석하는 경우 MPS 파일 작성과 최적화 결과를 데이터베이스에 저장하는 데 1 분 정도가 소요되었으며, 초기 데이터 가공에서부터 결과 출력까지 모든 과정을 수행하는 데는 약 4 분 정도가 소요되어 빠른 수행도를 보였다

4. 결론 및 의의

제한한 데이터 모델링 방법을 심진강 수계의 댐군 연계운을 위한 의사결정 지원 시스템에 적용해서 실제 업무에 활용할 수 있었고 다른 수계에도 그대로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 제한한 모델링 방법론은 여타의 수리계획 모형 구현 과정에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

References

1. 김승권, "저수지 운영방안의 방법론적인 고찰", 한국수문학회지, 제 21 권, 제 1 호, pp. 16~25, 1998
2. ILOG Inc., CPLEX User Manual, 1998
3. J. Andreu, J. Capilla, E. Sanchis, AQUATOOL, A generalized decision support system for water-resources planning and operational management, Journal of Hydrology, Vol. 177, pp269~291, 1996
4. K. Fedra, D.G. Jamiecon, The 'WaterWare' decision-support System for river-basin planning. 2. Planning Capability, Journal of Hydrology, Vol 177, pp177-198, 1996
5. Kim, Sheung-Kown, Jae-Hee Kim, Youngjoon Park, "Water Supply Planning with the Inter-Basin Transfer by optimization Model, Proceeding of the 4th International Conference on Hydrosience and Engineering, KWRA, Seoul, Korea(accepted), March, 2000
6. Kim, Sheung-Kown, Y.J. Park, "Coordinated Multiple reservoir Operating Model(CoMOM)", 1998 spring Meeting Vol.79, No. 17, 1998, Supplement, S77, Paper Number H21B-12]
7. Tarik Al-Shemmeri, Bashar Al-Kloub, Alan Pearman, Computer aided decision support system for water strategic planning in Jordan, European Journal of Operations Research, Vol 102, pp455-472, 1997