

범용 수자원모의 모형 CALSIM 소개

유 승 업* · 강 신 욱* · 맹 승 진**

*한국수자원공사 수자원연구원 연구원

**충북대학교 지역건설공학과 교수



1. 개 요

우리나라의 연평균 강수량은 1,274 mm로 세계 평균 강수량 973 mm를 상회하나, 1인당 강수량은 2,900 mm/년으로 일본 5,200 mm/년의 약 56%, 세계 평균 26,800 mm/년의 11% 수준에 불과한 실정이다. 더욱이, 연 강수량의 2/3가 우기인 6~9월에 집중되어 여름철에는 홍수, 겨울과 봄에는 가뭄이 빈발하고 있는 실정이다. 또한 우리나라 하천의 하상계수는 300이상으로 외국의 하천(테임즈강 8, 세느강 23, 라인강 14등)에 비해 매우 커서 효율적인 수자원관리가 매우 불리한 실정이다(건설교통부, 2001). 이와 같은 이유로 우리나라는 홍수기에 물을 가두어 홍수를 조절하면서 비홍수기에 확보된 물을 지역적으로 고르게 배분하기 위하여 다목적댐과 광역상수도를 건설하여 수자원을 개발하고 관리하여 왔다.

신규 수자원개발 및 적절한 수자원계획을 위해서는 효율적인 관리 도구가 필요하며, 세계적으로 여러 가지 모형이 개발·사용되어져 왔다. 컴퓨터 모의모형에 의한 하천유역 단위의 댐저수지군 모의운영모형의 대표적인 예로는 미공병단이 개발하여 실제 물관리에 사용중인 HEC-5를 들 수 있다. HEC-5는 이후 Windows 기반의 GUI를 갖춘 HEC-RESSIM으로 개선되어 사용되고 있다. High Performance Systems사에서 개발된 STELLA와 같은 일반적인 스프레드시트 동적모형들도 이 분야에 활발히 사

용되고 있다. 이와 유사한 동적 시스템 모의모형들은 POWERSIM, VENSIM 등이 있으며, 각각 실제 유역 시스템에서의 댐군 연계운영에 적용된 사례들이 있다. 이러한 모의모형들은 제안된 저수지 운영률의 장기적인 신뢰성을 검증하거나 여러 운영전략들의 효과를 평가하는데 사용할 수 있으나, 목적과 제약조건들에 따른 최적해들을 미리 도출해내지 못하는 단점이 있다. 따라서 댐군 연계운영의 최적화를 위한 모형들이 지난 몇 십년 동안 함께 개발되어 왔다. 본고에서는 범용 수자원 모의모형 중 하나인 CALSIM 모형을 소개하고자 한다.

캘리포니아 수자원국은 사용자가 빠르게 수자원시스템을 표현할 수 있고, 수자원 운영 기준을 제시할 수 있도록 범용 수자원 모의모형인 CALSIM을 개발하였다. CALSIM은 캘리포니아주 수자원시스템의 운영, 연방 CVP(Central Valley Project)와 캘리포니아주 SWP(State Water Project)의 연계운영상의 중요한 변화를 모의운영 차원에서 표현할 수 있다. CALSIM 사용자는 전형적인 모형의 입력자료로 시스템의 목적과 논리를 수천 줄의 절차 코드로 명시하는 것 대신에 시스템의 목적함수와 제약조건을 명시한다. CALSIM은 관계적인 최적화 모형이 아니며, 사용자가 정하는 우선순위를 갖는 네트워크를 통해 효율적으로 물을 배분하기 위해 최적화 기법을 사용한다. 내장된 선형/혼합정수계획법(LP/MILP; Linear Programming/Mixed Integer Linear Programming)은 각 시간단계의

가중값과 시스템 제약조건에 맞는 최적해를 결정한다.

2. CALSIM 모형 구성

CALSIM 모형은 물 배분량을 결정하기 위한 실제 과정에서 물리적인 기준과 운영적 기준을 분리하였다. “수자원배분에 관련된 문제를 어떻게 풀 것인가?”에서 “문제의 목적이 무엇인가?”를 분리하는 것은 전통적 시스템 모의에서의 근본적 변화를 의미한다. 전통적 수자원 시스템 모의에서 “무엇인가?”와 “어떻게?”라는 것들은 수자원문제를 정형화하는 단계(formalized procedures)에서 섞여져 있고 종종 아주 복잡한 코드로 결과를 나타낸다. 진보된 컴퓨터 과학 툴과 요소기반(component-based) 구조를 통하여 CALSIM은 사용자가 절차들을 명시하는 것을 피하고 시스템의 운영과 제약식들을 쉽게 표시할 수 있도록 하였다.

가. 사용자 편이환경

도표식 사용자 편이환경(graphic user interface)은 시스템 구성과 기본적 제약식들을 정의하고 모의 결과를 볼 수 있게 하기위해 개발되어 왔다. 모형 사용자는 물리적 시스템(저수지, 하도, 취수장, 등), 운영규칙(홍수조절운영률, 최소유량, 등), 물배분 우선 순위를 사용자 편이환경을 통하여 입력한다. 특별한 운영 기준을 입력하도록 하는 가장 중요한 방법은 WRESL 언어이다. 모형 사용자는 특별한 운영 기준(delivery cutbacks, salinity-flow requirements, 등)들은 모두 WRESL 문장으로 입력한다. WRESL 문장은 관련 제약식들의 유기적 체계에 의해 WRESL 파일로 저장된다. 그리고 프로그램 수행시 파서 번역기(parser-interpreter)를 통해 포트란 90 코드로 번역된다. 파서번역기는 JavaCC 파서 생성기(parser generator)를 사용하여 만들어졌고 모든 WRESL 문법이 내장되어져 있다. Java 언어를 기반으로 하고 있는 JavaCC는 언어 문법을 가능하게 할 수 있고 기능적으로 쉽게 추가 혹은 수정할 수 있다.

나. WRESL 언어

일단 WRESL 문장이 포트란 90 코드로 변환되면 관계형, 시계열 자료가 각 데이터베이스로부터 읽혀진다. CALSIM은 미육군 공병단에 의해 개발된 HEC-DSS 시계열 저장 시스템을 사용한다. 관계형 자료(index-de-

pendent flow)는 간단히 문자열과 관계형 표 형태로 저장된다. SQL형 문법을 사용하는 WRESL 문장으로 시계열 자료와 관계형 자료를 제어할 수 있다. 시계열 자료와 관계형 자료가 데이터베이스로부터 읽혀지고 나면, 모든 문제에 관련된 것들이 모여지고 XA(LP solver)로 보내진다. MILP solver는 해를 구하고 의사결정변수를 시계열 데이터베이스로 반환한다. solver로부터 생성된 진단 메시지는 정보는 사용자 편이환경과 결과파일로 전달된다. 코드 생성, 자료 처리, 최적해 생성 등의 일련의 과정은 모의가 끝날 때까지 반복된다. 위와 같은 일련의 자료 흐름도는 그림 1과 같다.

다. 결과의 표현

모의 수행 결과들은 CALSIM 사용자 편이 환경을 통해 볼 수 있다. 사용자 편이환경은 사용자가 파일과 모의 조건을 명시하도록 하고 시계열 모의 결과와 입력 자료를 제공하도록 하는 자바 기반의 응용프로그램이다. CALSIM Study 탭은 시스템을 정의하고 모의를 조정하는 데 사용

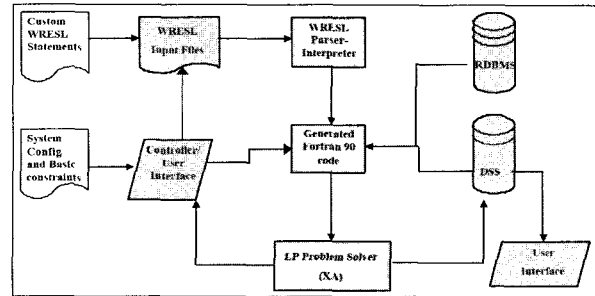


그림 1 CALSIM 모형 구조와 자료 흐름

Link	Area IN	Area OUT	Storage	Description
1	H	C1	S1	Shasta Reservoir
2	C1	C2		Red Bluff
3	C2	C3		Colusa
4	C3	D3		Verona
5	C7	C4		
6	S	C5	SS	Oroville Reservoir
7	C5	C6		Yuba City
8	C6	D6		Nicolaus
9	C7	C7		

그림 2 CALSIM의 사용자 편이환경

된다. CALSIM Output 탭은 그림, 표, 리포트를 생성한다. 수학적 연산들은 자료들을 통해 수행되고 다음 연구를 위해 저장된다. 물 분배량, 하구유출량과 같이 일반적으로 사용하는 연산 등 몇 가지 사용자 정의 함수로 제공되어진다. 더불어 CALSIM 사용자 편이환경과 계산된 통계량으로 대안 연구와 직접 비교할 수 있다.

3. CALSIM 모형의 수학적 표현

가. 모형 네트워크

CALSIM 모형은 저수지와 하도(자연적이거나 인위적인)를 노드(node)와 아크(arc)로 표현하는 것들로 수자원 시스템을 묘사한다. 네트워크상의 노드는 저수지, 지하수 유역, 두개 혹은 그 이상의 수로가 만나는 접합점, 혹은 단순히 하도상의 특정 지점을 나타낸다. 아크는 노드 사이의 흐름, 혹은 시스템의 출구, 입력부, 하도, 회귀수, 도수를 나타낸다. 네트워크의 예제는 그림 3과 같다.

나. 수식 구성

CALSIM 모형에 사용된 수학적 표현은 선형 목적함수와 선형 제약식들의 집합으로 구성된다. 목적함수는 네트워크를 통한 물 배분의 우선 순위를 표현하고 제약식들의 집합은 목적을 달성하기 위한 물리적인 기준과 운영측면의 기준을 표현한다. CALSIM은 각 시간 단계마다 모든 제약식들을 만족하는 최적해를 얻기 위해 목적함수를 최대화한다. 목적함수에서 변수(흐름 혹은 저류량)로 할당되는

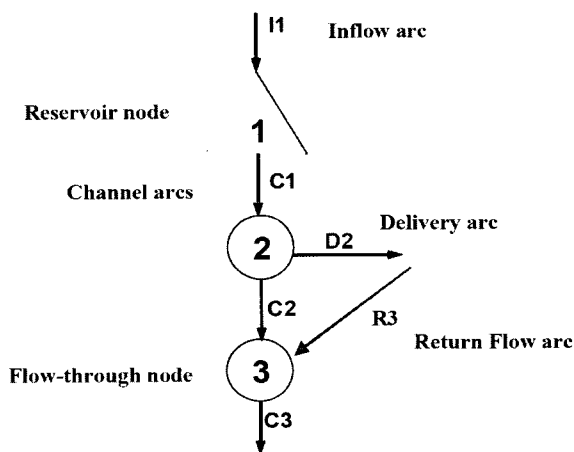


그림 3 CALSIM network의 예

우선 순위 가중계수는 시스템 운영에서 특정 변수의 상대적인 중요성을 표현한다.

1) 의사결정변수

의사결정변수(decision variable)는 노드(저수지)에 저장된 물 혹은 아크를 통한 물 흐름량을 나타낸다. 의사결정변수에 부여된 가중계수는 특정변수에 물을 더 많이 혹은 더 적게 분배한다. CALSIM 선형계획 모형에서 사용되는 의사결정변수는 아래 표 1과 같다.

변수 S_i , R_i , E_i , A_i 는 의사결정변수에 독립적이지 않으며, 다른 의사결정변수들의 함수이다. S_i 는 모든 저수영역내 저장량의 합이고, R_i 는 송수비율(fraction of delivery), E_i 와 A_i 는 궁극적으로 S_i 의 함수이다.

2) 상태변수

CALSIM에서 상태변수(state variable)는 어떤 시간의 시작상황에서의 시스템 상태를 나타낸다. "상태"라는 용어는 본 문서에서는 다소 완화된 의미로 시스템의 상태뿐만 아니라 자료도 나타낸다. 상태변수들은 다음 단계의 시

표 1 CALSIM 선형계획 모형에 사용되는 의사결정변수

Decision Variable	Description	Example
S_i	end of period storage in node i	S1
S_{ij}	end of period storage in node i, Zone j	S1_2
C_i	period average flow in channel are i	C1
C_{ij}	period average flow in channel are i, Zone j	C1_MIF, C1_EXC
D_i	period average flow in delivery are i	D6
D_{ij}	period average flow in delivery are I, Zone j	D6_MI, D6_AG
R_i	period average flow in return flow are i	R7
R_{ij}	period average flow in return flow are I, Zone j	R7_MI, R7_AG
E_i	period average flow in evaporation are i	E1
F_i	period average flow in non-recoverable spill are i	F1
A_i	end of period reservoir surface water area in node i	A1

표 2 수자원 계획과 모의에 필수적인 상태변수

State Variable	Description	Example
I_i	period average unregulated flow in inflow are i	I1
$S_{i,level_j}$	storage in node I at level j	S1level4
$relcap_i$	maximum release of reservoir I, applied at channel are i	relcapC1
$C_{i,min}$	absolute minimum flow in channel are i	C5min
$C_{i,max}$	maximum flow in channel are i	C5max
$minflow_i$	minimun instream flow requirement for channel are i	minflow_C4
$demand_{ij}$	demand for delivery are I of type j	demand_D2_ag
$rfactor_i$	return flow fraction for return flow are I resulting from a specified delivery are	rfactor_R3
ev_i	period cummulative unit evaporation for node i	evap_S1
eff_i	recharge efficiency for a ground water node I resulting from a specified delivery are	eff_D3
x^{t-1}	value of any decision variable X at any time prior to the current time period t	S1(-1), C5(prevOct)

간 전까지는 상수이고 어떤 시스템의 계획자/운영자에게는 가용한 정보라고 생각되어질 수 있다. 비조절 유입수는 현재 시간에 이는 값으로 가정되므로 상태변수로 표현된다. 수자원 계획과 모의에 필수적인 몇 가지 상태변수들은 아래 표 2와 같다.

3) 제약식 및 목적함수

우선순위를 갖는 네트워크를 통해 효율적으로 물을 배분하기 위해 최적화 기법을 사용한다. 이를 위해서는 여러 가지 상황들을 반영하는 제약조건들이 필요하다. 각 노드에서 mass balance를 유지하기 위해 연속방정식, 사용자가 명시한 우선 순위 가중계수에 따른 물분배 방식, 저수지 혹은 지하수 영역의 물리적인 수위나 운영측면 수위 사이의 체적을 나타내는 저수영역에 관한 제약식, 하도통수능에 관련한 제약식, 하천유지유량 설정을 위한 제약식, 회귀수에 관한 제약, 노드에서 수요처 혹은 다른 노드까지의 송수(delivery)에 관한 제약식 등으로 이루어진다.

CALSIM 모형에서 목적함수는 의사결정변수들과 우선 순위 가중계수들의 선형결합으로 되어 있다. 그리고 목적함수에 "약한" 제약식에 의해 부가된 여유, 잉여 변수들이 음수 패널티에 의해 곱해진다. 목적함수는 아래 식과 같다.

$$\max Z = \sum_{i=1}^m (w_i \cdot X_i) + \sum_{j=1}^n (-p_j \cdot x_j^+ | x_j^-) \tag{1}$$

여기서 X 는 의사결정변수, w 는 우선순위 가중계수, x^- 는 여유변수, x^+ 는 잉여변수, p 는 여유 혹은 잉여변수에 관련된 패널티 가중계수이다.

4. 맺음말

CALSIM은 의사결정지원 시스템 개념 도입과 컴퓨터의 발전으로 보다 정밀하게 영역의 물리적 특성을 묘사할 수 있으면서, 최적화 기법을 함께 사용하여 가용한 수자원을 보다 효율적으로 배분하기 위한 수자원시스템 모형이라고 할 수 있다. 다양한 영역의 상황을 통합적으로 고려한 수자원 계획과 관리의 중요성 또한 데이터베이스 및 여러 가지 관련 모형을 통합할 수 있는 IT 기법들의 발전으로 더욱 더 강조되고 있다. 또한 이러한 모형들의 사용을 통해 보다 진보된 수자원관리를 수행할 수 있다는 청사진을 보여주고 있기도 하다. 그러나 여기서 우리가 유의해야할 점은 컴퓨터 프로그램이나 모형이 그 자체로 모든 것들을 할 수 있는 것이 아니며 모형에 대한 과다한 의존은 또 다른 어려움을 야기할 수 있다는 점이다. 만일 이러한 모형을 사용할 때 우리나라 실정에서 정확히 이용할 수 있는 측면이 무엇이 있는지에 대한 조사가 반드시 필요하며, 이용하기 어렵거나 자료의 부족으로 이용할 수 없는 부분들이 있을 경우 이에 대한 선행연구와 자료축적을 위한 고민이 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2001). 수자원장기종합계획(Water Vision 2020) 보고서.
2. California Department of Water Resources (2000). CALSIM Water Resources Simulation Model Manual.