

## 금강유역의 유역통합수자원관리를 위한 저수지 운영룰 개발 및 적용성 검토

### Development and Validation of Reservoir Operation Rules for Integrated Water Resources Management in the Geum River Basin

정태성\* / 강신욱\*\* / 황만하\*\*\* / 고익환\*\*\*\*

Cheong, Tae Sung / Kang, Sinuk / Hwang, Manha / Ko Ickhwan

#### Abstract

In recent, the integrated water resources management should consider not only existing management objects such as water supply, power generation, and instream flows but also new management objects such as water quantity, water quality, and water habitats which management system is large and complex. Moreover, integrated basin plan or operation are needed for solving conflicts problems between basins and between water usages and to maximize water resources usages. To increase use of optimization method for actual operation and apply various objects, a reservoir operation rule was developed and the KModSim's hydrologic states for integrated water resources management were tested in this study. The simulation results show that the developed operation rules applied in hydrologic states good represent the actual storages of both the Yongdam and the Daecheong Reservoirs so, it is possible to improve the water allocation method usually used in the basin management and manage the integrated basin water resources if new operating rules are applied in optimized programming.

**keywords** : integrated water resources management, goal programming, robust minimum covariance determinant method, KModSim, water supply, Geum River basin

#### 요 지

최근의 유역통합관리는 용수공급, 수력발전, 그리고 유지용수 등과 같은 기존의 운영방안과 더불어 수량, 수질, 생태계 보호를 함께 고려해야만 하는 등 운영목적이 복잡해지고 시스템 또한 대규모화 되고 있다. 더불어 용수이용 혹은 유역간 서로 상충되는 이해관계가 발생함에 따라 물이용의 효율성을 극대화할 수 있는 범 유역 단위의 수자원 계획 및 운영이 필요하게 되었다. 최적화 모형의 현실 활용 기회를 높이고, 수자원관리의 다양한 운영목적을 수자원 운

\* 소방방재청 방재연구소, 연구관

Senior Researcher, National Institute for Disaster Prevention, Seoul 121-719, Korea  
(e-mail: tscheong@gmail.com)

\*\* 한국수자원공사 수자원연구원, 연구원

Researcher, Korea Institute for Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Dewjeon 305-730, Korea  
(e-mail: sukang@kwater.or.kr)

\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원, 수석연구원

Head Researcher, Korea Institute for Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Dewjeon 305-730, Korea  
(e-mail: hwangmh@kwater.or.kr)

\*\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원, 통합물관리연구단장

Director, Korea Institute for Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Dewjeon 305-730, Korea  
(e-mail: ihko@kwater.or.kr)

영에 반영하기 위하여 본 연구에서는 저수지 운영률을 개발하고 이를 적용하기 위한 KModSim의 수문학적상태방식에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 개발된 운영률은 전체적으로 용담댐과 대청댐의 실적저류량을 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 이를 최적화 모형에 활용한다면 관행적으로 적용해온 물수지 분석 방법을 개선할 뿐만 아니라 유역통합수자원관리가 가능할 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 유역통합수자원관리, 목표계획모형, robust 최소공분산결정방법, KModSim, 용수공급, 금강유역

## 1. 서 론

최근의 유역관리 특히 하천관리는 기존의 인간중심 혹은 하나의 기관에 의해 일방적으로 이루어지던 독점관리가 아닌 인간의 요구(NEEDS)와 환경보호(CONCERN)를 함께 고려하기 위한 다기관 전문가가 함께 협력하는 방향으로 유역관리가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 최근 들어 우리나라에서도 지속가능한 유역통합관리를 수행하기 위한 최적저수지 운영 그리고 하천유지 유량결정 등 하천환경과 관련된 저수지 운영이 요구되고 있다. 지속가능한 하천관리를 위해서는 하천생태계조사 저수지 방류량에 따른 하천생태계 반응 등과 같은 다양한 분석이 중요하며, 이해관계가 상충되는 이해당사자들 간의 협의가 매우 중요하다. 따라서 이해당사자간 다양한 목적과 이해를 반영하고 다양한 방류조건에 따른 하천생태계 변화를 모의할 수 있는 의사결정지원시스템의 역할이 매우 중요하다. 목표계획프로그래밍(Goal Programming Model; Can and Houck, 1983)은 다중목적 최적화 기법으로서 목적함수 및 제약조건의 유연한 설정이 가능하며, 기존의 최적화 프로그래밍(선형, 비선형계획 프로그래밍, 그리고 동적 계획프로그래밍)과 다르게 가중치 혹은 우선순위의 설정과 관련된 문제를 쉽게 해결할 수 있도록 프로그램화 되어있다(Schultz, 1989). 기존의 다중목적 최적화 방법은 하나의 목적을 최적화하기 위하여 다른 목적의 희생을 감수해야 하는 문제(파레토 최적)가 있으나 목표계획모형은 최적화이론을 이용하여 산정된 수학적인 파레토최적해가 아니어도 현실을 반영하여 다른 해를 사용함으로써 목적들 간의 적절한 균형을 유지할 수 있다. 목표계획모형 중 우선순위목표모형(Preemptive Goal Programming)은 미리 설정된 우선순위에 따라 순차적 최적화를 수행함에 따라 사용용수의 회귀 및 지체 등을 고려해야만 하는 유역통합수자원운영 최적화에는 적합하지 않다. 예로서, 유역의 최상류에 위치한 저수지가 최하류에 위치한 우선순위가 높은 수요와 상대적으로 상류에 위치한 우선순위가 낮은 수요를 만족하기 위해 용수를 공급한다고 할 때 우선순위가 높은 하

류수요를 만족하도록 저수지 공급량을 결정하기 위해서는 상류수요의 회귀수가 먼저 결정되어야만 하는데, 우선순위에 따라 순차적으로 최적화를 수행하는 우선순위 목표모형은 우선순위가 상류로부터 하류로 순차적으로 설정되지 않을 경우 사용용수의 회귀와 관련된 최적화 문제 해석에 어려움이 있다. 가중합계모형(Nonpreemptive Goal Programming)은 각 목적함수들과 관련된 목표미달치의 가중합계를 최소화하는 방법으로서 우선순위목표모형이 갖는 단점은 없으나 가중치를 잘 설정해 주어야 하므로 반복 작업을 통해 적절한 가중치를 설정해주는 것이 중요하다. KModSim은 가중합계모형과 유사한 형태의 목표계획프로그래밍으로서 금강유역의 유역통합시스템(Integrate Water Resources Management)을 위한 운영모형으로 개발되었다. KModSim은 통합물관리시스템으로서 우리나라에서 관행적으로 적용해온 물수지 분석방법을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 효율적으로 디자인된 사용자 편의환경을 통해서 물리적 혹은 운영측면의 특성을 반영하는 것이 용이하므로 일, 순, 반순, 그리고 월 단위 모형으로서의 적용성이 크다고 할 수 있다.

우리나라의 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 그리고 영산강) 유역은 저수지를 포함하는 등 유역규모가 크고 유역간 물배분, 저수지와 지표수 연계운영, 그리고 하천환경 및 생태계를 고려하여야 하므로 시스템이 복잡한 형태를 띠고 있다. 특히, 우리나라의 경우 유역통합운영에 있어서 저수지 운영은 필수적인 항목 중 하나이다. 반면, 적절한 저수지 운영률이 확립되어 있지 않아 유역통합시스템에 적용하는데 어려움이 있으며, 적용방법 또한 확립되어 있지 않은 형편이므로 이에 대한 방안이 필요하다. RiverWare는 프로그램에서 제공하는 Policy Editor 혹은 Rule Editor를 이용하여 사용자가 프로그램 변경 없이 임의의 운영률을 적용할 수 있다. WEAP, WaterWare, 그리고 WRAP은 미리 프로그램화된 다양한 조건을 이용하여 사용자가 임의의 운영률을 적용할 수 있다. 이들 방법은 미리 정해진 적용방법을 숙지하여 정해진 방법에 맞도록 운영률을 적용해야하므로 매뉴얼을 숙지해야하는 어려움이 있다. CALSIM은 Water

Resources Engineering Simulation Language (WRESL)를, RAISON은 RAISON Programming Language(RPL)를 이용하여 사용자가 프로그램 변경 없이 임의의 운영률을 적용할 수 있다. KModSim은 Fortran, C++, 그리고 C# 등 다양한 언어를 이용하여 사용자가 프로그램의 변경 없이 원하는 형태로 운영률을 적용하거나 프로그램을 제어할 수 있으므로 유연성이 향상된 방법이라고 할 수 있다. KModSim은 명시적인(explicit) 방법과 암시적인(implicit) 방법 두개의 운영방법으로 저수지 운영을 최적화할 수 있다. 명시적인 방법은 최적화 기법을 통해서 구해진 목표값(저수지 저류량 혹은 방류량)을 직접모형에 적용하는 방법이고 암시적인 방법은 운영률을 적용해서 모형 내에서 최적의 목표값을 구하고 최적운영을 수행하는 방법이다. 운영률을 적용하기 위해서는 운영률을 .NET기반 언어로 직접 프로그램화하는 방법과 프로그램화된 KModSim모형의 수문학적상태(system states)를 이용하는 방법 두 가지가 있다. KModSim모형에서는 수문학적상태를 사용하여 선형화된 일, 순, 반순, 월단위 운영률을 모의할 수 있는데, 이때, 운영률은 현재운영되고 있는 실적운영결과 혹은 최적화 모의운영결과 등으로부터 구해질 수 있다.

본 연구에서는 연구자와 실무자간의 인식차이(Yeh and Becker, 1982; Wurbs and Walls, 1989; Labadie, 1995)를 좁히고 최적화 모형의 현실 활용 기회를 높이기 위한 방안으로 실적자료를 이용하여 금강유역의 용담댐과 대청댐 운영률을 구하고 수문학적상태를 이용하여 운영률을 적용하는 방법을 제안하고자 한다. 운영률을 구하기 위하여 금강유역에서 25년(1981-2006) 일단위 유량자료와 저수지 운영자료를 수집하였으며, 수집된 자료를 토대로 실제 운영에 기반한 운영률을 개발하였다. 개발된 운영율의 적용성이 검증된다면 향후 KModSim을 이용하여 유역통합수자원관리를 수행할 경우 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 운영율의 적용성을 검토하기 위하여 기존에 개발 검증된 금강유역의 네트워크시스템(Network System; 정태성 등, 2007; 정태성, 2007)에 개발된 운영률을 KModSim에 수문학적상태를 사용하여 적용하고 그 결과를 조절점(control points)의 실측유량 및 실적저수위, SSDP(Sampling Stochastic Dynamic Programming) 저수위, SSDP-CoMOM (Coordinated Multireservoir Operating Model) 저수위를 사용한 명시적인 저수지 운영결과와 비교하고자 한다.

## 2. KModSim 목표계획모형

KModSim은 계산시간( $t = 1, 2, \dots, T$ ) 동안 다음 식

과 같이 비용을 최소화하는 선형방정식을 풀게 된다.

$$\min \sum_{\iota \in A} c_{\iota} q_{\iota} \quad (1)$$

여기서  $c_{\iota}$ 은 링크  $\iota$ 에서 부여된 비용, 가중치 혹은 단위 유량 당 우선순위,  $q_{\iota}$ 은 링크  $\iota$ 에 흐르는 유량,  $A$ 는 네트워크의 모든 링크 수이며 이때 제약조건은 다음 식과 같다.

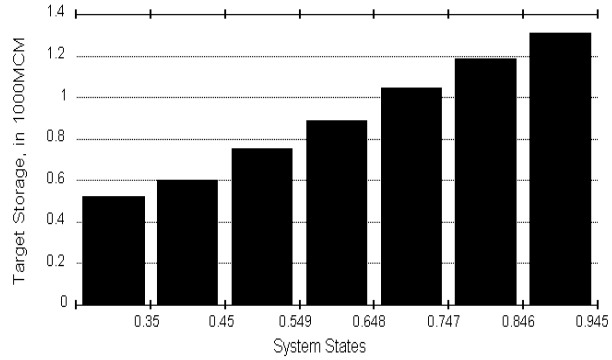
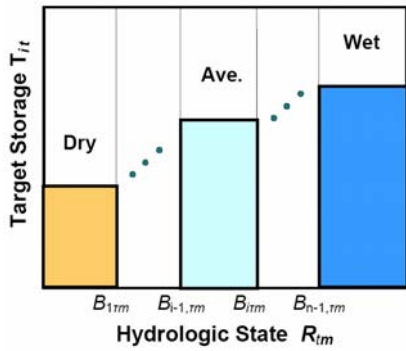
$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{\iota \in I_i} q_{\iota} = b_{it}(\mathbf{q}) \quad \text{for all nodes } i \in N \quad (2)$$

$$l_{it}(\mathbf{q}) \leq q_{\iota} \leq u_{it}(\mathbf{q}) \quad \text{for all nodes } \iota \in A \quad (3)$$

여기서  $O_i$ 는 노드  $i$ 의 모든 유출링크,  $I_i$ 는 노드  $i$ 의 모든 유입링크,  $b_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때 노드  $i$ 의 유입 혹은 유출,  $N$ 은 네트워크상의 모든 노드 수,  $l_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $\iota$ 에서 유량의 하한치, 그리고  $u_{it}$ 는 상한치이다. 다중목적 최적화는 물리적인  $O_i$ ,  $I_i$ ,  $N$ , 그리고  $A$ 의 조건하에서 가정된 초기유입량  $\mathbf{q}$ 에 대한 물리적 제약조건들 ( $l_{it}$ ,  $u_{it}$ , 그리고  $b_{it}$ )을 만족하는 범위 내에서  $\mathbf{cq}$ 를 최소화하는  $\hat{\mathbf{q}}$ 를 구하는 것이다. 최적화 모의 시 완전순환네트워크를 구하기 위해서는 모든 노드가 유입과 유출링크를 동시에 갖도록 내부시스템이 구성되어야 하는데, KModSim에서도 이와 같이 계산에 필요한 노드와 링크가 모형 내에서 자동적으로 생성되고 계산된다. KModSim은 Lagrangian Relaxation에 기초한 효율적인 Dual 네트워크 최적알고리즘 해석기법을 사용한다(Bertsekas and Tseng, 1994). Lagrangian Relaxation 알고리즘 해석기법은 기존의 out-of-kilter 알고리즘보다 훨씬 우세할 뿐만 아니라, Primal에 기초한 네트워크 알고리즘보다도 계산 수행 속도 면에서 매우 우수한 것으로 나타났다(Bertsekas and Tseng, 1994).

### 2.1 수문학적 상태

모의를 위하여 비정상 수문학적 유입량  $b_{it}$ 는 과거 유입량, 예측유입량, 혹은 모의유량이 사용될 수 있으며, 이때 노드의 유량은 저류노드와 비저류노드에서 각각  $S_{(i-1)t} + I_{it}$  그리고  $I_{it}$ 로 계산된다. 여기서  $I_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때 유입량 그리고  $S_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때의 저류량이다. 저수지노드의 경우에는 명시적으로 목표저류량(target storage)을 설정할 수 있는데, 이 경우 최적저류량 그리고 실적저류량 등을 사용할 수 있다. 더불어 기 설정된



(a) Hydrologic State Conceptual Figure (b) Hydrologic State Determined in the Daecheong Reservoir

Fig. 1. Hydrologic States of KModSim Decision Support System Applied in Geum River Basin

수문학적상태 테이블을 이용하여 모형 내에서 암시적으로 목표저류량을 계산할 수도 있다. 사용자는 유역내 수리학적, 수문학적, 환경학적, 그리고 다양한 운영조건 등을 토대로 수문학적상태 테이블을 설정할 수 있으며, 필요하다면 하나의 저수지에 여러 개의 수문학적상태 테이블들을 설정할 수 있고 각각의 수문학적상태(예: 건기, 평상시, 그리고 홍수기 등)에 우선순위를 다르게 부여하여 다양한 시스템모의를 수행할 수도 있다.

Fig. 1(a)와 같이 각각의 수문학적상태 내에서 목표저류량이 상수라고 가정하면, 목표저류량은 다음과 같이 구해진다.

$$R_{tm} = \sum_{i \in H_m} [S_{it} + F_{it}] \quad (4)$$

여기서,  $H$ 는 모의시간단계,  $m$ (월단위 모의시년. 일단위 모의시 주 혹은 순)에 따른 저수지노드의 집합,  $F_{it}$ 는 저수지 유입량, 그리고  $t$ 는 모의시간이다. 목표저류량을 계산하기 위해서는 각 수문학적상태의 경계치,  $B_m = \beta_m W_m$ 를 설정해야만 한다. 여기서  $W_m$ 은 각 저수지의 최대저류용량,  $S_{i_{max}}$ 의 합이며,  $n$ 은 수문학적상태의 개수로서 KModSim에서는 최대 7개의 상태를 설정할 수 있으며,  $n$ 번째 수문학적상태의 경계치,  $B_{ntm}$ 은  $W_m$ 이다. 본 연구에서는 저수지 운영률을 적용하기 위하여 Fig. 1(b)와 같은 수문학적상태를 도출하였다. Fig. 1(b)는 홍수기인 8월 대청댐 유입량에 따른 실적 저류량을 기반으로 구한 수문학적상태 예로서 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 저수지 저류량을 7개의 수문학적 상태로 구분하였다. 수문학적상태를 이용하면 저수지의 최적운영목표저류량 이외에 저수지 최적유입량을 예측할 수도 있는데, 싱크노드만을 갖는 용량이 0인 저수지를 시스템에 구성하는 방법으로 수문학적상태 테

이블을 활용하여 저수지의 필요 유입량을 예측할 수도 있다.

### 3. 금강유역 유역통합운영시스템(IRWMS) 개발

#### 3.1 금강유역의 KModSim Network 구성

본 연구에서는 금강유역을 Fig. 2에 도시한 것과 같이 전체유역을 14개 소유역으로 구분하고 일 단위 및 월 단위 네트워크를 구성하였다. 금강유역에서 저류용량 1,000만 $m^3$ 이상인 댐은 총 6개로서 다목적댐 2개소, 농업용수전용댐은 3개소로 백곡지, 미호지, 탑정지, 그리고 금강하구둑 1개소가 있다. 대청다목적댐의 유역면적은 금강유역의 총 32.3 %인 3,204  $km^2$ , 발전시설용량은 90 MW, 총 저수용량은  $1,490 \times 10^6 m^3$ 이고 댐마루 표고는 EL.83.0 m이다. 용담다목적댐은 전주권 및 서해안 개발사업지역에 1일  $1.35 \times 10^6 m^3$ 의 용수와 금강본류로 1일  $432 \times 10^3 m^3$ 의 하천유지용수를 공급하며, 연간 198.5 GWh의 수력발전을 하고 있다. 본 연구에서는 대상 유역인 금강 수계의 대청댐과 용담댐 두 개의 다목적댐운영만을 고려하였다. KModSim의 물리적 검증 및 운영모의를 위하여 RRFMS모형을 이용하여 구한 1983년 1월-2006년 6월 기간의 각 소유역별 유입량자료 중 2002, 10월-2007, 7월 수문자료를 이용하였다. 용담댐의 준공 및 운영이 2000년 이후이며 실제 용담댐 관련하여서는 2002년 여름이 되어서 저수량이 댐 운영에 적합할 정도가 되었으므로 그 이전에는 제대로 된 운영 사례가 없어 검정과 운영모의를 위하여 2002년 10월-2007년 7월 자료를 이용하였다. 수요량은 광역상수도, 생활, 공업, 농업, 하천유지용수 등 5개 용수로 구분하고 모니터링과 각 댐 관리연보를 토대로 전주권 용수 공급을 포함한 5개의 광역 상수도 공급량, 생활 및 공업용수 수요량 및 농업용수 이용량자료를 산정하였다.

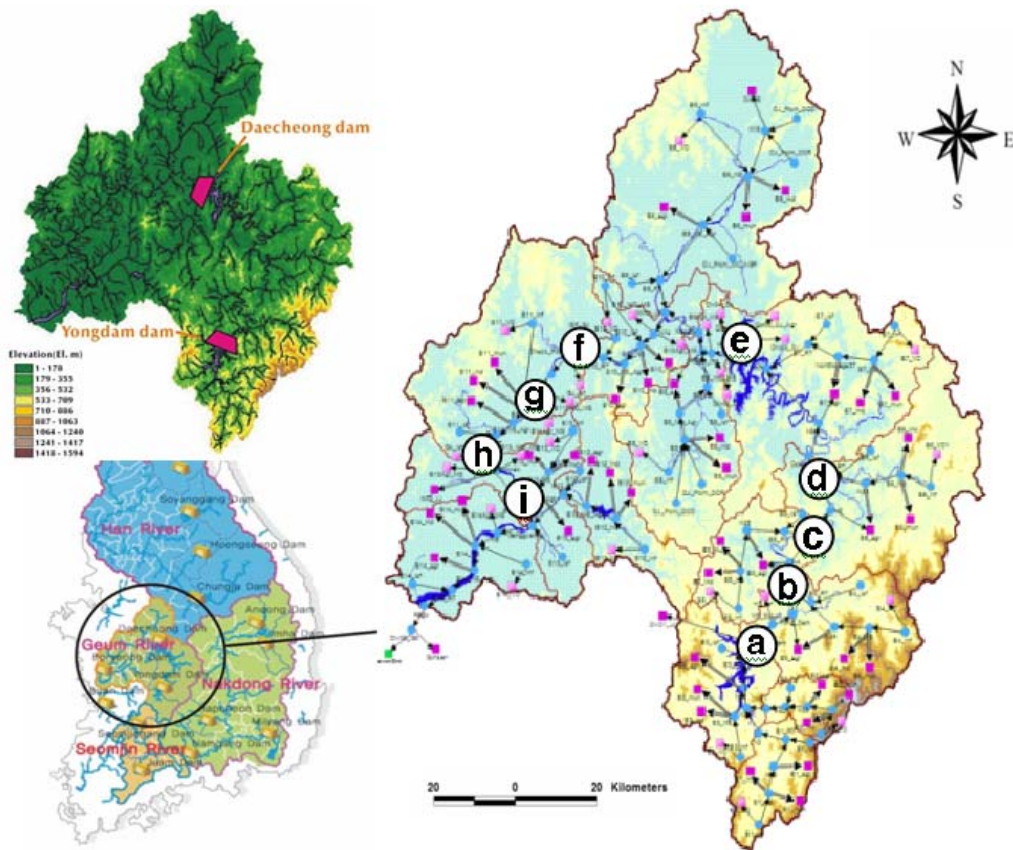


Fig. 2. Both Monthly and Daily Networks were Developed for the Geum River Basin. There are 14 gauging points including two reservoirs and some demand or diversion locations for the 14 subbasins in the Geum River basin. Nine channel sections such as ㉑: Yongdam Reservoir ㉒: Sutong; ㉓: Hotan; ㉔: Okcheon; ㉕: Daecheong Reservoir ㉖: Gongju; ㉗: Seokhwa; ㉘: Gyuam; and ㉙: Ganggyeong are divided to simulated channel routing.

소유역별 자연유량 정보는 각 다목적댐 관리연보 및 RRFs(Rainfall Runoff Forecasting System)모형 연구에서 구해진 성과를 적용하였으며, 하천에서의 손실은 자연유량값에 기 반영된 것으로 가정하였다. 전체수요량 중 생활용수는 29%, 공업용수는 11%, 농업용수는 60%이며, 전체 수요량 중 4-9월의 농업용수가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 전체유입량 중 15%는 지천의 하천유지유량으로 가정하고 85%만이 각 소유역에서 소비되도록 모의를 수행하였다. 본류의 하천유지유량은 용담-대청 구간에 5 m<sup>3</sup>/s 그리고 규암지점의 30 m<sup>3</sup>/s를 고려하여 모의를 수행하였다. 전체 41개 수요량 노드 중에서 현재 운영하지 않는 청주 II와 유역외부로 공급되는 전주권 및 부여권 공급량 등 세 곳을 제외한 38 지점의 수요 노드에는 회귀율 및 회귀지점이 설정되었다. 최적 월 단위 목표저류량은 SSDP 결과와 운영률을 이용하였으며, 일 단위 목표저류량은 SSDP-CoMOM 결과와 운영률을 적용하였다. 모의에 사용된

우선순위를 높은 것부터 낮은 순으로 나열하면 전주권 광역상수도, 하천 유지용수 (본류 용담댐 하류, 규암), 저수지 목표저류량, 하천 유지용수 (지류 각 유역의 보장수량 전체유입량의 15%), 생활용수, 공업용수, 농업용수, 그리고 하구언 싱크 순이다.

### 3.1 용담댐과 대청댐 실적운영률

기존 저수지 운영을 분석하기 위하여 금강유역에서 수집된 용담댐의 6개년 월별 저류량자료를 상하 저류경계조건과 함께 Fig. 3에, 대청댐의 25개년 월별 저류량자료를 상하 저류경계조건과 함께 Fig. 4에 도시하여 실적저수지 운영을 비교 검토하였다. 검토 결과 Figs. 3 and 4에서 알 수 있듯이 용담댐과 대청댐 모두 상하 저류경계 내에서 적절히 운영되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 실적유입량 자료와 실제 저수지 운영결과를 기반으로 운영률을 개발하였다. 운영률을 구하기 위하여 본 연구에서는 금강유역에



Fig. 3. General Operation Guidelines for Both Yongdam Reservoir Superimposed on Actual Reservoir Storage Levels; —: General Guidelines for Yongdam Reservoir.

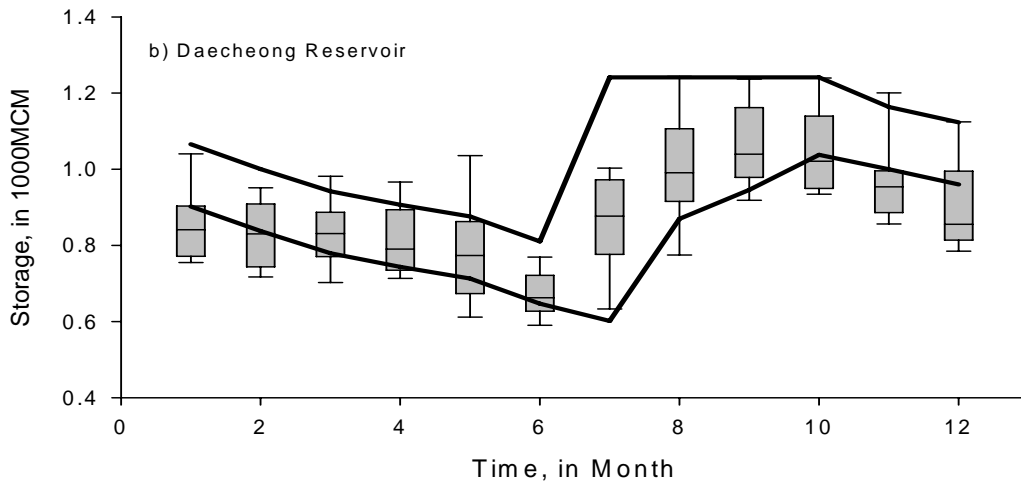


Fig. 4. General Operation Guidelines for Both Daecheong Reservoir Superimposed on Actual Reservoir Storage Levels; —: General Guidelines for Daecheong Reservoir.

서 수집된 각 댐의 25개년 유입량자료와 저류량자료를 이용하여 다음과 같은 선형 및 비선형 운영률을 개발하였는데, 방정식의 형태는 각각  $S_t = \alpha + \beta I_t + \gamma S_{t-1}$ 와  $S_t = \alpha I_t^\beta + S_{t-1}^\gamma$  같다. 여기서  $I_t$ 는 시간  $t$ 일 때 유입량,  $S_t$ 는 시간  $t$ 일 때의 저류량, 그리고  $S_{t-1}$ 는 시간  $t-1$ 일 때의 저류량이다.

### 3.2 Robust 최소공분산결정방법 (minimum covariance determinant method)

본 연구에서는 정규성의 가정에 둔감하고 최소자승법을 사용했을 때 발생할 수 있는 이상치의 영향을 최소화하는 robust방법 중 공분산을 최소화하는 robust 최소공분산결정 방법을 사용하였다. 종속변수  $Y$ 에 대해서 독립변수  $X$ 가  $p$ 개인 비선형 다중회귀모형은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = \sum_{n=1}^p \beta_0 X_i^{\beta_i} \epsilon \quad (5)$$

여기서  $\beta_0(n \times q)$ 는 중간 계산항,  $i$ 는  $1, 2, \dots, p$ ,  $\epsilon(n \times q)$ 는 잔차항, 그리고  $n$ 은 실측치 개수이며 볼드체는 행렬을 표현한다. 종속변수와 독립변수를 모두 대수변환하여 선형다중회귀모형 형태로 변환하면 다음과 같게 된다.

$$\ln Y = \ln \beta_0 + \sum_{n=1}^p \beta_i \ln X_i + \ln \epsilon = \ln \beta_0 + B' X + \ln \epsilon \quad (6)$$

여기서  $B$ 는 중간계산항  $\beta_0(n \times q)$ 의 기울기이며 잔차항  $\epsilon(n \times q)$ 의 평균과 공분산은 각각  $E(\epsilon_i) = 0$ ,  $Cov(\epsilon_i) = \sum \epsilon_i$ 이 된다. Eq. (6)의 회귀계수를 결정하기 위하여 먼저 독립변수  $x$ 와 종속변수  $y$ 의 추정평균치,

$\hat{\mu}_x$ 와  $\hat{\mu}_y$ 를 구하고 잔차의 공분산을 최소화하는 회귀계수  $\chi_{n,p}$ 를 계산한다. 이때 각각의 자료에 대한  $k$ 차원 스코어는  $S_i = L'_{k,p}(x_i - \hat{\mu}_x)$ 가 되며, 종속변수  $y_i$ 의 추정치는 다음과 같은 선형회귀모형으로부터 구해진다.

$$y_i = \alpha_0 + A' S_i + \epsilon_i \quad (7)$$

여기서  $\alpha_0$ 는  $q$ 차원의 계산 항이며,  $A'_{k,q}$ 는 회귀 매트릭스, 그리고  $\epsilon$ 은 공분산  $Cov(\epsilon_i) = \sum \epsilon$ 을 갖는 잔차이다.  $k$ 차원 스코어  $S$ 는 중간값  $\hat{\mu}_k$ 와  $(S, y)$ 의 분산 매트릭스  $\sum k$ 에 의해 추정된 추정치로서 이들은 행과 열의 조합으로 구해진다. Robust 최소공분산 결정방법은  $(S, y)$ 의 분산 매트릭스  $\sum k$ 의 최소공분산 추정치를 구하는 것으로서 Eq. (7)의 각 추정치들  $\hat{A}_k = \sum s^{-1} \sum s y$ ,  $\hat{\alpha}_0 = \hat{\mu}_y - \hat{A}' \hat{\mu}_s$ , 그리고  $\sum \epsilon = \sum y - \hat{A}' \sum s \hat{A}$ 을 계산하는 방법이다

Robust 최소공분산결정방법에서 이상치를 고려한 추정치를 구하기 위하여 robust 거리,  $RD_{\hat{\mu}_k, \sum k}(\epsilon_i)$ 가  $\sqrt{\chi^{2_{1,0.975}}}$ 보다 큰 범위의 이상치에 대해서는 가중치  $w_i$ 를 0으로 부여한다. 이때 잔차는  $y_i - \hat{\alpha}_0 - \hat{A}' S_i$ 로 구해지며  $RD_{\hat{\mu}_k, \sum k}(\epsilon_i)$ 는  $\sqrt{\epsilon'_i \sum f^{-1} \epsilon_i}$ 로서 구해진다. Eq. (7)에 가중치를 고려하여 정리하면  $y_i = \hat{\alpha} + \hat{A}'_{q,k} S_i$ 가 된다. 즉 Eq. (7)로부터  $\hat{\alpha}$ 와  $\hat{A}'_{q,k}$ 를 구하고 이들을 이용하여  $\hat{B}_{p,q} = \hat{L}_{p,k} \hat{A}'_{k,q}$ 와  $\hat{\beta}_0 = \hat{\alpha}_0 - \hat{\beta}_{p,q} \hat{\mu}_x$ 를 계산한 후 이들을 Eq. (6)에 대입하여 회귀식을 구한다. 이때 잔차의 공분산은 다음 식으로 구해진다.

$$\begin{aligned} \sum \epsilon &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)(y_i - \hat{y}_i)' \\ &= \sum y - \hat{A}' \sum s \hat{A} \end{aligned} \quad (8)$$

본 연구에서는 회귀식 유도 및 회귀식의 검증을 위하여 용담댐과 대청댐의 25개년 일단위 유입량자료와 저류량자료를 사용하였다. 본 연구에서는 Eq. (6)의 함수관계를 풀기 위하여 현단계 저류량을 종속변수로 하고 독립변수로서 전단계 저류량과 현단계 유입량을 선정하여 회귀식을 유도하였다. Robust 최소공분산결정방법을 적용하여 구한 회귀식과 계수들을 정리하여 Table 1에 수록하였다. 이때 본 추정식의 상관계수는 모두 0.95이상의 값을 갖는 것으로 나타났다. 계산결과에의 검증을 위하여 용담댐의 실측치와 추정치를 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 본 연구에서 개발된 용담댐 운영률을 이용하여 구한 저류량은 Fig. 5에서도 알 수 있듯이 실측저류량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 계산결과에의 검증을 위하여 대청댐의 실측치와 추정치를 비교하여 Fig. 6에 도시하였다. 본 연구에서 개발된 대청댐 운영률을 이용하여 구한 저류량은 Fig. 6에서도 알 수 있듯이 실측저류량을 잘 재현하는 것으로 나타났다.

#### 4. 운영률의 적용성 검토

본 연구에서 개발된 저수지운영률을 적용하기 위하여 KModSim의 수문학적상태 방법을 사용하였다. 운영률의 적용을 위하여 본 연구에서는 7개의 수문학적상태로 설정된 각각의 상태에 따른 매월의 경계치를 설정하였는데, 용담댐과 대청댐 저수지 결과를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 각 상태에 따른 경계치의 기술품과 범위는 월별로 매우 다양한 분포를 갖는

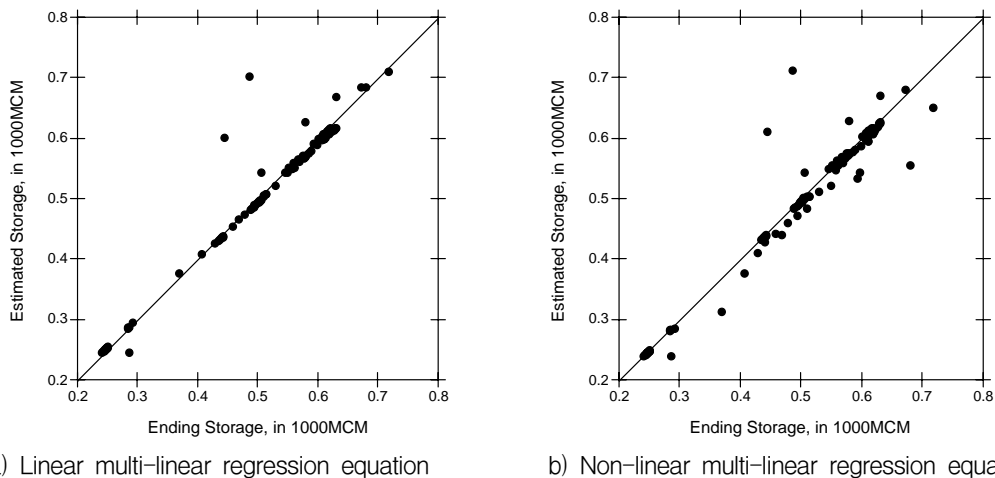


Fig. 5. Historical Operation Rules for Yongdam Reservoir

Table 1. The Regression Results for the Yongdam and Daecheong Reservoir Operating Guide Rules

Coef.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Sep	Agu	Oct	Nov	Dec
<b>Daecheong Reservoir Target Storage, <math>T = \alpha I^\beta S^\gamma</math></b>												
$\alpha$	0.260	0.248	0.272	0.347	0.387	0.900	0.799	0.553	0.897	0.425	0.348	0.435
$\beta$	0.009	0.005	0.007	0.010	0.010	0.015	0.031	0.019	0.028	0.017	0.008	0.017
$\gamma$	0.961	0.962	0.958	0.946	0.940	0.859	0.870	0.914	0.863	0.936	0.948	0.934
$R^2$	0.987	0.986	0.983	0.982	0.980	0.974	0.953	0.976	0.953	0.974	0.971	0.974
<b>Daecheong Reservoir Target Storage, <math>T = \alpha + \beta I + \gamma S</math></b>												
$\alpha$	24.14	26.19	24.56	31.77	31.39	69.49	48.43	59.22	69.09	38.97	34.82	35.07
$\beta$	2.222	1.019	0.840	0.949	1.289	0.834	0.840	0.687	1.024	1.777	2.101	7.622
$\gamma$	0.961	0.962	0.958	0.946	0.940	0.859	0.870	0.914	0.863	0.936	0.948	0.934
$R^2$	0.987	0.986	0.983	0.983	0.982	0.975	0.955	0.986	0.973	0.974	0.972	0.974
<b>Yongdam Reservoir Target Storage, <math>T = \alpha I^\beta S^\gamma</math></b>												
$\alpha$	0.142	0.144	0.134	0.134	0.258	0.267	0.567	0.307	0.511	0.213	0.240	0.223
$\beta$	0.007	0.004	0.004	0.017	0.026	0.026	0.022	0.024	0.036	0.002	-0.001	-0.002
$\gamma$	0.961	0.962	0.958	0.946	0.940	0.859	0.870	0.914	0.863	0.936	0.948	0.934
$R^2$	0.969	0.969	0.967	0.964	0.968	0.922	0.940	0.957	0.950	0.968	0.967	0.965
<b>Yongdam Reservoir Target Storage, <math>T = \alpha + \beta I + \gamma S</math></b>												
$\alpha$	8.320	8.885	4.484	7.566	7.030	7.224	26.47	14.86	31.72	19.59	35.08	24.21
$\beta$	-0.03	-0.23	1.703	1.134	2.860	1.155	0.722	1.068	3.871	-0.451	-12.52	-6.851
$\gamma$	0.961	0.962	0.958	0.946	0.940	0.859	0.870	0.914	0.863	0.936	0.948	0.934
$R^2$	0.969	0.970	0.967	0.966	0.971	0.938	0.954	0.965	0.964	0.972	0.968	0.968

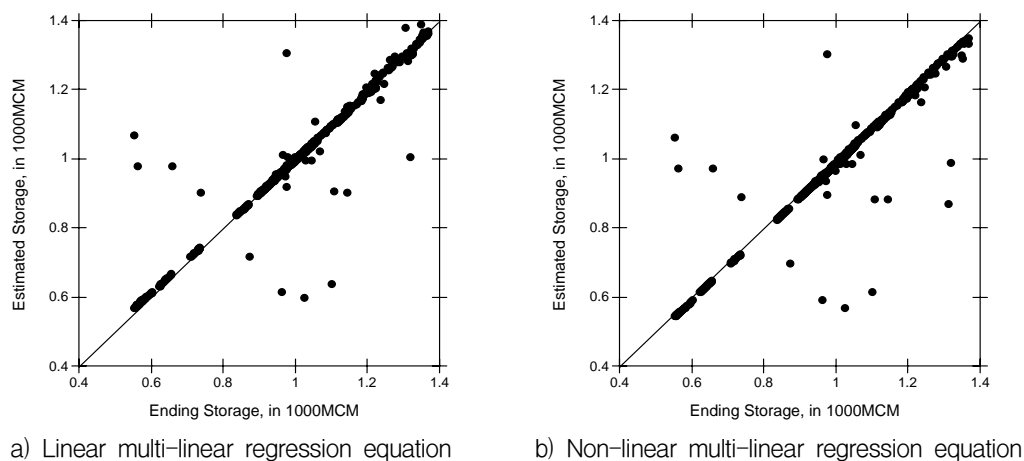
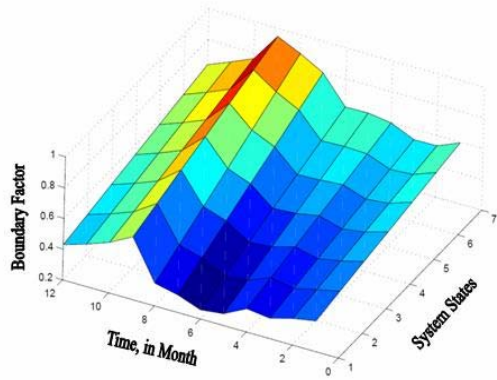


Fig. 6. Historical Operation Rules for Daechung Reservoir

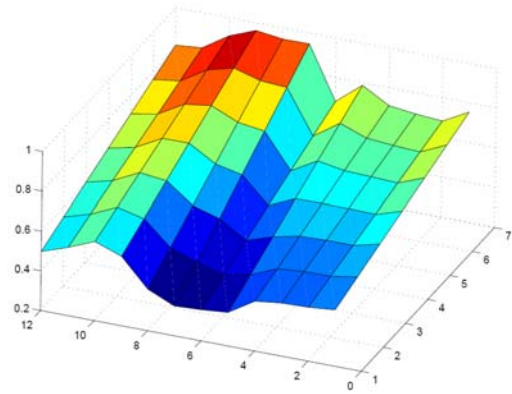
다. 각각의 경계치는 저수지의 저류량상태를 의미하는 것으로서 만약 경계치가 1이면 저수지는 최대 저류용량(상시만수위를 유지)을 저류하고 있다는 것을 의미하며 경계치가 0이면 저수지는 최소 저류용량(사수위를 유지)을 저류하고 있다는 것을 의미한다. 수문학적상태방법을 이용하여 저수지의 목표저류량을 구하는 방법은

먼저 전단계저수지 저류량과 현단계 유입량의 합을 이용하여 수문학적상태의 해당 경계범위를 구하고 Fig. 8에 제시된 것과 같은 각각의 경계에 대응하는 목표저류량을 계산하는 것이다. Fig. 8은 용담댐 및 대청댐의 월별 수문학적상태에 따른 목표저류량을 도시한 것으로서 각각의 선들은 수문학적상태의 경계를 의미한다. 전반



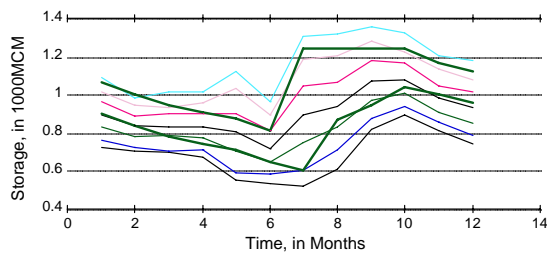


(a) Yongdam Reservoir

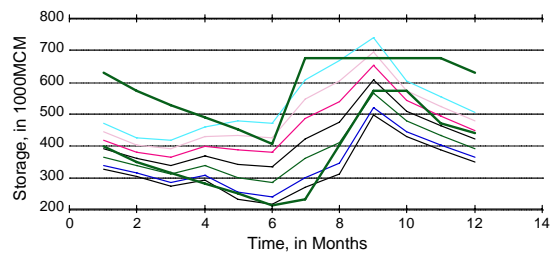


(b) Daecheong Reservoir

Fig. 7 The Seven Different Hydrologic States Values of Each Month Designed for the Yongdam Reservoir



(a) Yongdam Reservoir



(b) Daecheong Reservoir

Fig. 8 The Hydrologic States for Storage Level Forecast for Each Month in Daecheong Reservoir

적으로 대청댐운영은 상, 하한 경계내에서 이루어지고 있으나 특정 유입량 조건에서 상하한 경계범위 밖에서 운영되는 경우가 존재하는 경우가 있는 것으로 나타났다. 이러한 경우는 2002년과 같이 극한 가뭄이 발생했다거나 1999년과 같이 대홍수가 발생한 경우에 해당하는 것으로서 본 연구에서는 실제 운영조건을 그대로 반영하기 위하여 이러한 자료를 제외하지 않고 모두 사용하여 운영률을 개발하였다.

#### 4.1 적용결과 비교

본 연구에서는 개발된 운영률의 적정성을 검토하기 위하여 상, 하한 저류경계와 더불어 실적저류량 그리고 최적모의 저류량 결과를 함께 비교하였다. 본 연구에서는 월단위 최적모형으로서 SSDP모형과 월단위 운영률을 이용하여 월말 최적목표저류량을 산정하였다. 산정된 월말 SSDP 최적목표저류량을 CoMOM 일단위 목표저류량 산정을 위한 입력 값으로 사용하여 일별 최적목표저류량을 산정하였다. 일단위 모의를 위하여 KModsim에서는 일단위 운영률을 이용하였으며, 보다 정확한 운영모의를 위하여 하도추적과 Backrouting방법(정태성, 2007)을 적용하였다. 운영률의 적정성을 검

토하기 위하여 본 연구에서는 용담댐 저류량, 대청댐저류량, 그리고 공주지점의 유량에 대해서 모의결과와 실적결과를 비교하였다. Figs. 9 and 10은 각각 월단위 및 일단위 모의결과를 도시한 것으로 대청댐과 용담댐의 운영률은 상, 하한 저류 경계 내에서 적절한 운영을 하고 있음을 알 수 있다.

운영모의 결과 SSDP 목표저류량을 사용하는 경우와 운영률을 이용하는 경우 모두 용담댐과 대청댐에서 구한 실적저류량에 비해 큰 저류양상을 보이는 것으로 나타났다. 모의기간동안 SSDP 목표저류량을 사용하는 경우 평균저류량은 15.2 %상승 그리고 발전량은 24.6 % 증가하는 것으로 나타났으며, 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 평균저류량은 52 % 증가 그리고 발전량은 10.1 % 증가하는 것으로 나타났다. 용담댐의 경우 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우에 가장 큰 저류량을 보이며, 대청댐의 경우는 SSDP 목표저류량을 사용하는 경우에 가장 큰 저류량을 보이는 것으로 나타났다. SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우와 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 모두 용담댐에서 구한 실적저류량에 비해 작은 저류량 구간이 존재하는 반면, 운영률을 목표

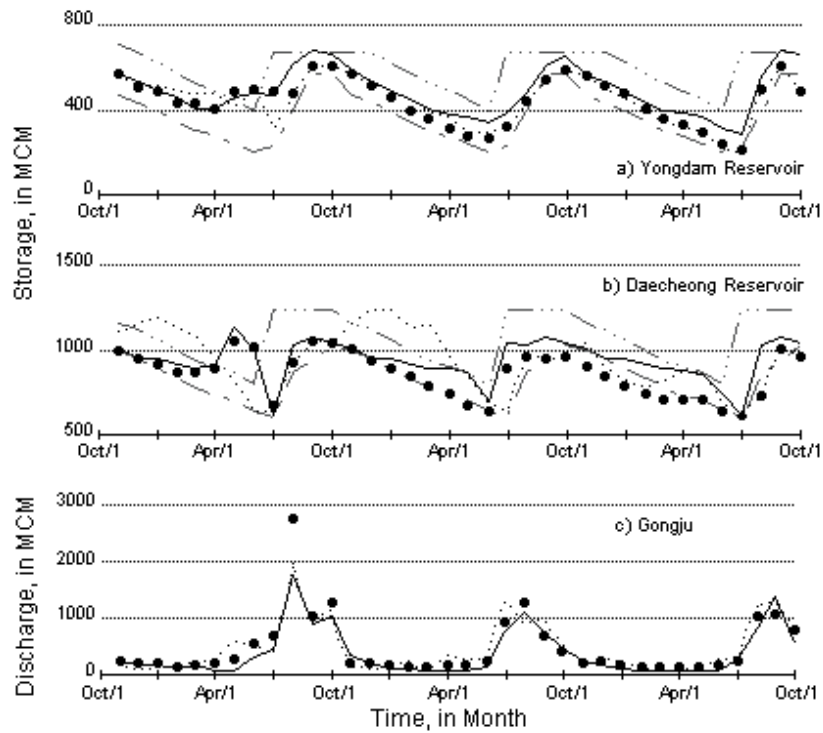


Fig. 9. Comparison of KModSim Simulation Results with Measured Data for Three Years (2002,10 - 2005, 9); ●: Actual Storage Target and Measured Flow at Gongju Station ———: Developed Operation Rules; - - - - -: SSDP Storage Target; — - - - : Lower Reference Storage; — - - - -: Upper Reference Storage

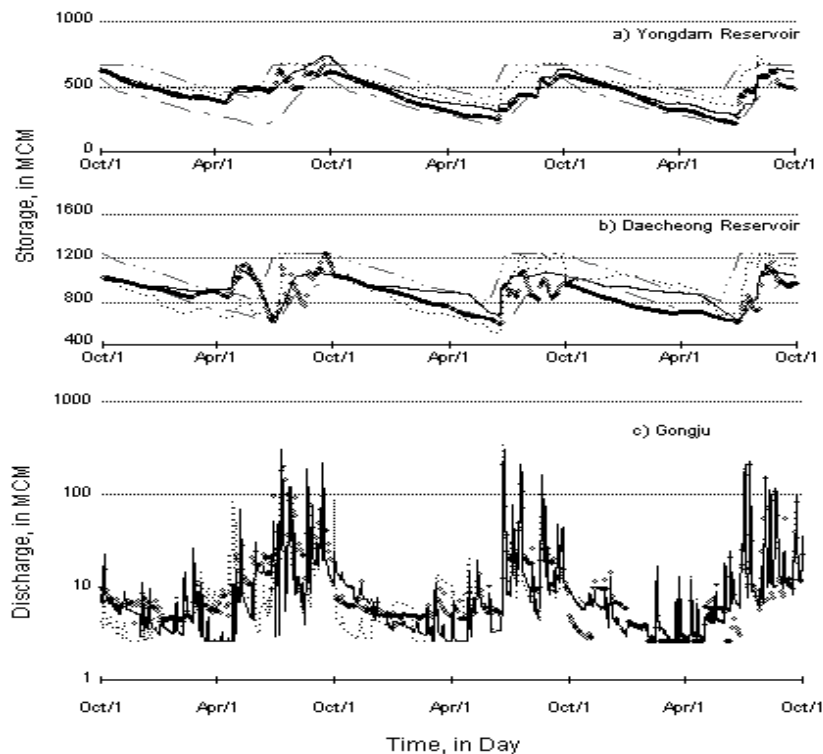


Fig. 10. Comparison of KModSim Simulation Results with Measured Data for Three Years (2002, 10 - 2005, 9); ○: Actual Storage Target and Measured Flow at Gongju Station ———: Developed Operation Rules; - - - - -: SSDP-CoMOM Storage Target; — - - - : Lower Reference Storage; — - - - -: Upper Reference Storage

저류량으로 설정하고 모의를 수행한 경우 대부분 실적저류량에 비해 큰 저류양상을 보이는 것으로 나타났다. SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우와 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 모두 대청댐에서 구한 실적저류량에 비해 큰 저류양상을 보이는 것으로 나타났다. SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우의 모의 저류량은 상한기준선을 초과하는 큰 저류량 구간이 나타나는 반면 실적목표저류량과 운영률을 이용하여 모의를 수행한 모의저류량은 대부분 대청댐 저류량 상하한 기준선 내에서 운영이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 모의기간동안 SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우 평균저류량은 9.4%증가, 여수로방류량은 8.8%감소, 발전방류량은 12.3%감소, 그리고 발전량은 6.7% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 평균저류량은 13.1%증가, 여수로방류량은 23.3%감소, 발전방류량은 10.8%감소, 그리고 발전량은 3.0% 정도 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 11). 일단위 모의 결과를 실적치와 비교한 결과 전체적으로 SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우에 비해 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우가 보다 효율적인 운영이 이루어지고 있음을 보여준다. 본 연구결과 실무자가 저수지운영 혹은 유역단위 통합운영을 위하여 최적화 모형을 현실에서 활용하고자 한다면, 실적자료를 이용한 저수지 운영률과 수문학적상태방법을 활용하여 최적 모의운영을 수행할 수 있다. 더불어 유역간 분쟁 혹은 이해당사자간의 분쟁 해결 그리고 의사결정이 요구되는 다양한 시나리오 개발에 본 연구방법이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

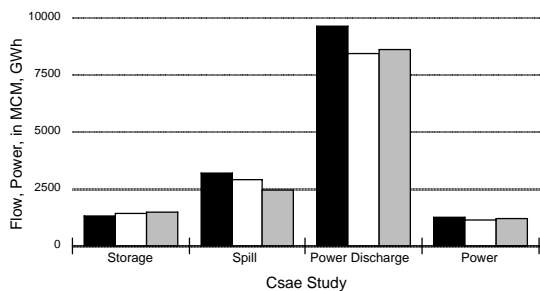


Fig. 11. Comparisons of Simulated Results with Measured Data in Which ■: Actual Storage Target; □: SSDP-CoMOM Storage Target; ■: Operation Rule

## 5. 결론

유역통합관리는 유역 전체 혹은 유역간 가용 수자원을 최대한 이용하기 위해 유역 간 수자원을 정확히 조

사 및 평가하고 수요처 및 경관, 생태, 수질보호를 위해 하천유역에 합리적으로 배분하는 문제에 직면하게 된다. 특히, 최근 유역관리는 유역관리시스템이 매우 복잡할 뿐만 아니라 광대한 관계로 수자원 이용의 합리화 혹은 최적화가 쉽지 않은 실정이다. 또한 행정적, 법적 제약조건이나 수리권 혹은 이해당사자가 분쟁 등을 합리적으로 고려해야 하며, 지표수-지하수 및 수량-수질 연계, 하천 경관 및 생태계보호를 위한 환경유량 등 물의 종합적 관리 및 운영 방안이 필요하다. 복잡해지는 유역의 상황을 고려하여 적용의 편리성을 증진하고, 수자원계획의 다양한 조건을 반영해야한다는 점을 고려한다면 네트워크 최적화 모형을 이용하는 것이 바람직하다. 그러나 연구자와 실무자간의 인식차이로 인해 최적화 모형의 현실 활용이 어려워 본 연구에서는 최적화 모형의 현실 활용 기회를 높이기 위한 방안으로 실적자료를 이용하여 금강유역의 용담댐과 대청댐 운영률을 구하고 수문학적상태를 이용하여 운영률을 적용하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 실적 운영률과 저류량 자료를 토대로 robust 최소공분산결정방법을 사용하여 선형 비선형 운영률을 산정하였으며 이들 운영률을 적용하기 위하여 KModSim모형의 수문학적상태방법을 이용하여 모의를 수행하였다. 일단위 및 월단위 모의 결과를 실적치와 비교한 결과 전체적으로 SSDP와 SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우에 비해 운영률을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 보다 효율적인 운영이 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 우수성이 입증된 운영율을 유역통합수자원관리에 필요한 다양한 최적화 기능을 가지고 있는 KModSim의 수문학적 단계방법에 적용한다면, 우리나라에서 관행적으로 적용해온 물수지 분석 방법을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 최적 통합수자원운영모의에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 정태성, 강신욱, 고익환, 황만하 (2007). “금강유역에서의 KModSim을 이용한 의사결정지원시스템 개발 및 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3B호, pp. 319-329.
- 정태성 (2007). “Backrouting 방법의 개발 및 적용성

- 검토.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제4B호, pp. 423-430.
- Bertsekas, D.P. and Tseng, P. (1994). *RELAX-IV: A Faster Version of the RELAX Code for Solving Minimum Cost Flow Problems*. Completion Report under NSF Grant CCR-9103804, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, M.I.T., Cambridge, Mass.
- Can, E. and Houck, M. (1983). “Real-Time Reservoir Operations by Goal Programming.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 110, pp. 297-309.
- Labadie, J. (1995). *River Basin Model for Water Rights Planning, MODSIM: Technical Manual*. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, CO.
- Schultz, G.A. (1989). Ivory Tower Versus Ghosts? or The Interdependency between Systems Analysts and Realworld Decision Makers in Water Management. Systems Analysis for Water Resources Management: Closing the Gap between Theory and Practice. *Proc., Third Scientific Assembly of the IAHS*, Baltimore, Wallingford, U.K. pp. 23-32.
- Wurbs, R.A. and Walls, W.B. (1989). “Water Rights Modeling and Analysis.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, pp. 416-430.
- Yeh W.W.G, Becker L. (1982). “Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations.” *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 1326 - 1336.

(논문번호:07-121/접수:2007.10.30/심사완료:2007.03.07)