韓國水資源學會論文集
第46卷 第4號·2013年 4月
pp. 373~387

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 46, No. 4:373-387, April 2013
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.4.373
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

수자원시스템의 효율적 운영을 위한 시뮬레이션과 최적화 기법의 원론적 비교 연구

A Study on the Fundamental Comparison of Simulation and Optimization Approaches for Water Resources Systems Planning and Management

공 정 택* / 김 재 희** / 김 승 권***
Kong, Jeong-Taek / Kim, Jaehee / Kim, Sheung-Kown

Abstract

For the efficient operation and management of the water resources system, coordinated operation of weirs and reservoirs is required. A simulation based, and an optimization based approaches are available to deal with the operation and management problems. The simulation based approach does not guarantee an optimal solution, and the optimization based approach is not so flexible to consider, complex, nonlinear problems we will face when trying to allocate water to different uses, various demand sectors in a basin. Hence, it is important to develop a model that would compensate for the weak points in both models. We will compare and contrast intrinsic and extrinsic properties of two modeling approaches, addressing issues related to setting system operation and control rules that would lead us to more efficient use of water in the basin. As a result, we propose to use CoWMOM (Coordinated weirs and multi-reservoir operating model), a "simulation based" optimization model for a simple simulation of the past periods, and for the real-time simulation process considering uncertain inflow.

Keywords : efficient operation and management of the water resources system, simulation technique, optimization technique, fundamental comparison, simulation based optimization model

요 지

수자원시스템의 효율적인 운영 및 관리를 위해서는 하천 시설물들을 효율적으로 연계운영 할 필요가 있다. 그러나 이를 위한 시뮬레이션 모형은 최선의 대안을 보장하지 못하고, 최적화 모형은 복잡한 수계 현황을 유연하게 고려하는데 어려움이 있다. 따라서 시뮬레이션과 최적화 기법의 한계점을 서로 보완해서 활용하는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 시뮬레이션과 최적화 기법의 원론적 비교를 통해 각 기법의 장·단점을 분석하고, 두 방법의 한계점을 극복할 수 있는 시뮬레이션 기반의 최적화 모형, CoWMOM의 활용을 제안한다. 아울러 댐-보 연계운영 모형의 활용방안으로 i) 과거의 특정 기간에 대한 분석 도구로써의 활용법과, ii) 미래 수문 정보가 불확실한 상황에서 댐-보 연계운영을 하는 현실에 적합한 모형 활용 절차를 제시한다.

핵심용어 : 수자원시스템의 효율적 운영 및 관리, 시뮬레이션 기법, 최적화 기법, 원론적 비교 시뮬레이션 기반의 최적화 모형

* 고려대학교 정보경영공학전문대학원 석사과정 (e-mail: rhdwjdxor@korea.ac.kr)
Graduate Student, Graduate School of Information Management and Security, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
** 전북대학교 경영학부 부교수 (e-mail: jheekim@jbnu.ac.kr)
Associate professor, Division of Business Administration, Chonbuk National Univ., Jeonju 561-705, Korea
*** 교신저자, 고려대학교 산업경영공학부 교수 (e-mail: kimsk@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3385)
Corresponding Author, Professor, School of Industrial Management Engineering, Korea Univ,. Seoul 136-713, Korea

1. 서 론

한정된 수자원을 효율적으로 관리하는 것은 심화하고 있는 기후변화에 선제적으로 대응하고 잠재적인 물 위기에 대비하기 위한 선결과제다. 우리나라는 지난 40여 년 동안 저수지와 댐 등의 구조물을 꾸준히 늘려온 덕으로 아직까지는 물 부족을 심각하게 느끼지 못했다. 그러나 작은 국토면적 대비 물 수요를 주도하는 총인구가 상대적으로 많은 편으로, 물 부족으로부터 자유롭다고 할 수 없다. 실제 우리 한반도의 1인당 가용 수자원은 1,453 m^3로, UN산하 국제인구행동연구소(Population Action International)가 정한 물 부족 국가의 기준, 1,700 m^3을 밑돌아 물 부족 국가로 분류되고 있다. 또한, 경제협력개발기구(OECD) 환경전망 2050 보고서에 따르면 가용수자원 대비 취수율이 40%를 넘어 경제협력개발기구 국가 중 유일하게 심각한 '물 스트레스 국가'에 포함된 상태다. 즉 취수율이 높아 상대적으로 가용수자원의 비율이 낮고, 그로 인해 극한 가뭄과 같은 이상기후 발생 시 물 수요에 즉각적인 대응을 하기 어려운 형편이다. 이는 수자원의 효율적 사용을 위해 수요와 공급 간의 균형을 고려한 집중적 관리가 필요함을 의미한다. 따라서 댐에 저수된 물을 운영 및 건설목적에 따라 시·공간별로 적절하게 할당시키는 연계운영을 통해 수자원시스템을 효율적으로 운영할 필요가 있다(Kim and Park, 1998).

1950년대 말 Harvard Water Program 연구를 기초로 한 Mass et al. (1962)의 연구 이후 댐 군 연계운영을 위한 확정론적(deterministic), 또는 추계학적(stochastic) 접근방법을 근간으로 하는 많은 연구가 수행되었다. Mejia et al. (1974)는 저수지 운영 시 연계운영의 효과가 크다는 것을 밝혔고 Hirsch et al. (1977)은 시뮬레이션 기법을 활용하여 병렬관계에 있는 가상 댐의 연계운영을 통한 상승효과를 보여주었으며, 이후 1970년대와 1980년대 초를 거쳐 선형계획법(Linear Programming), 동적계획법(Dynamic Programming) 등의 최적화 기법 그리고 시뮬레이션 기법을 활용하여 댐 군의 연계운영을 위한 괄목할 만한 연구들이 수행되었다(Yeh, 1985; Wurbs and Tibbets, 1985; Labadie, 2004).

한편 댐의 실제 운영상황은 용수공급, 수력발전 그리고 환경용수 등 운영목적 간의 상충관계를 고려하여 연계된 댐 간의 방류량을 결정해야 하지만 문제의 복잡성과 실제 적용과정의 어려움으로 아직도 최선의 방안을 제시하기 쉽지 않다(Kim, 1988; ReVelle, 2000). 이를 위한 시뮬레이션과 최적화 기법은 실제 저수지 운영을 위한 목적으로 연구됐지만, 시뮬레이션 모형은 최선의 대안을 보장하지 못하고, 최적화 모형은 복잡한 수계현황을 유연하게 반영하기 어렵다. 그뿐만 아니라 최근 심화되는 기후변화의 영향으로 유량변동성을 예측하기 어렵고, 4대강살리기 사업의 다기능보 건설로 인한 수문환경의 변화는 문제를 더욱 어렵게 하고 있다. 따라서 새로운 환경을 고려하여 수자원시스템을 보다 효율적으로 운영할 수 있는 운영관리 기술의 확보가 더욱 중요하게 되었다.

이에 본 연구에서는 시뮬레이션과 최적화 기법의 원론적 비교를 통해 각 방법의 특성과 한계점을 분석하고, 결론으로 각 기법의 단점을 보완할 수 있는 시뮬레이션 기반의 최적화 모형을 활용하는 것이 최선이라는 점을 밝히고자 한다. 이를 입증하기 위해 다기능보가 신설되어 이전 수문환경과 뚜렷한 차이를 보이는 한강수계를 대상으로 하여, Kim and Park(1998)이 처음 제시하고 지속적으로 발전시킨 시뮬레이션 기반의 최적화모형 CoWMOM (Coordinated Weir and Multi-reservoir Operating Model)을 적용하고, 그 결과를 대표적인 시뮬레이션 모형인 HEC-ResSim의 적용 결과와 비교 검증하였다. 아울러 수자원 시스템의 효율적 운영 및 관리를 위하여 모형의 두 가지 활용방안을 제시한다.

2. 수자원시스템 운영을 위한 시뮬레이션과 최적화 기법의 원론적 비교

2.1 시뮬레이션과 최적화 기법의 특징 및 한계점

수자원시스템 운영을 위한 방법은 크게 시뮬레이션과 최적화 기법으로 분류할 수 있다. 시뮬레이션 기법은 수리적 구조의 단순함과 적용의 융통성(Versatility)으로 인하여 저수지운영 및 대안평가에서 가장 보편적으로 사용되는 방법이다. 비록 최적 운영정책을 제시하지는 않지만 고려할 수 있는 다양한 운영환경에 대하여 의사결정자가 요구하는 질문에 관한 결과를 보여준다. 또한 시뮬레이션은 최적화 모형과는 달리 모형 구성을 위한 이상적 또는 규범적인 가정이 없으므로 현실상황을 유연하게 반영할 수 있다. Yi and Song (2002)에 의하면 시뮬레이션 기법은 시스템의 상태 및 운영과정을 비교적 상세히 표현할 수 있기 때문에, 미리 설정된 운영규칙에 대하여 장기간의 분석을 통한 신뢰성 해석 또는 위험도 해석과 같은 연구에 적당하다. 하지만 시뮬레이션 기법은 시행착오법을 통해 효율적 대안을 산정하므로 대안을 선정함에 많은 시간이 소요된다. 그리고 다양한 운영 목표를 함께 설정하기 어려워서 선정된 대안의 파레토 최적(Pareto Optimum)을 보

장할 수 없다는 단점도 있다.

반면, 최적화 기법은 목적 지향적이고 다양한 목적을 동시에 고려할 수도 있으므로 선택 가능한 모든 대안 중 최선의 대안을 얻을 수 있는 토대를 제공한다. 하지만 이렇게 선정된 대안은 수학적 모형에 필요한 가정을 전제로 하고 있기 때문에 현실상황을 유연하게 반영하기 어렵다. 즉 최적화 기법을 통해 선정된 대안은 수학적 모형의 목적식과 제약식을 만족하는 최적해(Optimal Solution)임이 분명하지만, 실제 수자원시스템 계획 및 운영을 담당하는 의사결정자에게는 최선의 대안이 아닐 수도 있다. 이처럼 시뮬레이션과 최적화 기법은 수자원시스템을 평가함에 한계점을 가지고 있으며 각 기법의 단점은 상대 기법의 장점을 극대화해 극복할 수 있으며, 상세내용은 Table 1에 정리하였다.

2.2 수자원시스템 운영 및 관리를 위한 기존 모형들의 고찰

수자원시스템의 효율적 운영 및 관리를 위해서는 운영목적 및 제약사항 등 현실을 반영한 효과적인 연계운영이 요구된다. 하지만 2.1절에서 언급한 각 기법의 특성과 한계점 때문에 시뮬레이션과 최적화 기법이 원천적으로 분리시켜 독립된 형태로는 현실의 복잡한 물리적·운영적 제약을 유연하게 반영하기 어렵다. Loucks et al. (2005)에 의하면, 최적화모형 구축 시 알고리즘의 선정과 아울러 효율적 수학적 구조의 구성은 모형의 성패를 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 그러므로 최적화 기법들의 특성을 활용하면서 현실적 운영제약들을 효율적으로 반영할 수 있는 모형의 구조에 관한 연구가 중요하다.

먼저, 네트워크 모형은 그 모형의 구조가 단순하여 수문요소 간의 수자원 이동행태(hydrologic behavioral process)를 표현하기가 쉽다. 그리고 일반적인 선형계획법 모형보다 빠른 시간 내에 해를 구할 수 있다는 장점 때문에 수자원 분야에서 다양하게 적용되었다(Martin, 1981; Kuczera, 1989; Niedda and Sechi, 1996; Khaliquzzaman and Chander, 1997). Lee et al. (1999)은 유역 단위의 수자원 운영계획을 수립하거나 연계운영 시 네트워크 모형을 이용하는 것이 효율적 이라는 것을 밝혔으나, 다중목적을 고려한 연계운영과 비선형 프로세스의 모형화에 제약이 따른다. 예를 들어 수력발전은 수위-유량으로 표현되는 발전량 함수는 비선형이고 발전 대신 수자원 보존과 용수공급을 위한 저수결정과 경제적 이득을 위한 발전방류 의사결정이 상충되므로 순수한 네트워크 모형만으로는 수

Table 1. Comparison of Modelling Approaches for Water Resources Systems Operation

	Simulation Model	Optimization Model
Model Components	· **Design Variables:** Storage capacities of reservoirs, Power generating capacity of hydropower plants, Targets for water supply allocations, etc · **Operating Variables:** Release from reservoirs or allocation of water to various users over space and time in terms of parameters & variables, governing equations or imbedded operating rules	· **Design Variables:** The same components as simulation model · **Operating Variables:** Release from reservoirs or allocation of water to various users over space and time in terms of objective functions and functional constraints
Solution Methodology	Select via trial and error process	Select the best that satisfies a particular objective or a set of objectives
Type	'What if' questions	'What should be' questions
Advantages	Simulation models are not limited by many of the assumptions incorporated into optimization model	The optimization models will help identify the decision-variable values that will produce the best plan directly
Disadvantages	The trial and error process of selecting alternative plans can be time consuming	The optimization models are based on intrinsic and extrinsic assumptions incorporated into the model
Remedy for Disadvantages	Screen out alternatives using the optimization : An important role of optimization methods is to reduce the number of alternatives for simulation analyses	Using the simulation methods : improve the values of the decision-variables and provide more realistic estimates of the impacts associated with those decision-variable values

력발전의 운영양태, 여수로 방류 상황 등 실제 댐 운영 상황을 유연하게 표현하는 데 어려움이 있다(Kim and Park, 1998). 한편 동적계획법(Dynamic Programming)을 활용하여 모형을 구축하면 실제 비선형의 특성을 표현하기에 용이하다. 하지만 분석대상의 댐의 수가 통상 4개 이상되면 상태변수가 기하급수적으로 늘게 되는 "Curse of Dimensionality" 문제로 계산상의 어려움이 있다. 따라서 Kim et al. (2000)는 비선형 문제를 구간 선형화시키거나, 선형계획법과 같은 효율적 알고리즘을 반복적으로 활용하여 다중목적법을 활용하는 개선된 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model) 모형을 제안한 바 있다(Lee et al., 2003; Kim et al., 2004).

현재 전 세계적으로 통용되는 저수지 시뮬레이션 모형에는 HEC-ResSim, CALSIM, ReiverWare, WEAP (Water Evaluation and Planning System), WRAP (Water Rights Analysis Package), MODSIM (Modified SIMYLD) 등이 있다. 그러나 이들은 순수한 시뮬레이션 모형이 아니다. 방류량 또는 발전량 등 결정변수를 정할 때 최적화 기법을 근간으로 하여 정해진 운영규칙에 따라 모의운영 하는 방식을 취하는 최적화 기반의 시뮬레이션 모형이라 할 수 있다. 예를 들어 HEC-ResSim은 Rule Curve 방식의 운영규칙을 기본으로 운영되며, CALSIM에서는 WRESL (Water Resources Engineering Simulation Language)을 사용하여 특정 목표, 운영규칙, 제약조건 및 관련 우선순위 등을 정의한다. RiverWare의 경우는 좀 더 진보된 시뮬레이션 모형으로서 프로그램에서 제공하는 Policy Editor 또는 Rule Editor를 이용해서 다목적 운영목표와 우선순위들을 정할 수 있으며, 이러한 운영은 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming), 목표계획법(Goal Programming), 선형계획법(Linear Programming) 등 최적화 기법을 적극 활용하여 모의운영 한다. 이러한 시뮬레이션 모형들은 미리 운영 규칙을 설정해야 하는 단점이 있으며, 위의 모형들처럼 내부적으로 최적화 기법을 활용한다 하더라도 정해진 운영규칙에 국한된다는 시뮬레이션 모형의 단점을 완전히 극복하지는 못한다.

하지만 좀 더 나은 다른 방식도 있다. Loucks et al. (2005)은 시뮬레이션 기반의 최적화 모형을 수자원 시스템의 여러 운영목적을 고려하여 효율적인 운영결과를 산출할 수 있는 가장 좋은 방법이라 하였다. 국내에선 Kim and Park (1998)이 국내 유역의 수문학적 특성과 시스템적 기법들의 특성을 고려하여 시뮬레이션 기반의 최적화모형, CoMOM (Coordinated Multi-reservoir Operating Model)을 개발하였다. 이는 각 댐 운영규칙과 시스템 운영규칙을 미리 설정해 놓는 시뮬레이션과는 달리, 이득 최대화 목적 대신 댐 또는 보로 형성된 저수지 운영성과를 최대화한다. 또한 현실적으로 규정된 물리적 운영범위 내에서 댐 군 연계운영의 여러가지 목적과 현실적인 운영목표를 최대한 함께 충족시키기 위해서, 매 분석시점의 저수상황과 예측된 유입량 상황에 적합한 가상의 최적규칙을 스스로 적용해 댐 군 연계운영이 모사되도록 구축되었다. 여기서 연계 운영의 목표는 시-공간 적으로 변하는 물 수요와 공급 간의 균형을 찾는 것이므로, 단일 댐 운영시 적용되는 supply-deficit 방식을 유역 내 댐군으로 구성된 가상의 물공급 통합시스템에 적용하는 것과 본질적으로 다르지 않다. 이 모형은 21C프론티어 연구사업(2001~2011)의 일환으로 모형의 수정·검증을 통해 완성되었고, 현재는 다기능보의 운영목적을 고려하여 댐과 보를 연계하여 운영할 수 있는 CoWMOM (Coordinated Weir and Multi-reservoir Operating Model)으로 발전되었다.

CoWMOM은 최소비용 네트워크모형(Minimum Cost Network Flow Model)을 기반으로 하고 있으나, 비선형적 요소의 선형화를 통해 댐 저수 특성을 반영하고 수계 내 수문 및 일별 운영 환경과 운영제약을 반영할 수 있도록 혼합정수계획모형(MIP, Mixed Integer Programming)으로 확장되어 수립되어 있다. 또한 저수량과 발전량 사이의 상충관계(Trade-Off)를 고려한 다중목적계획법, 기말 목표저수위 달성 및 운영 제약 준수 등을 목표계획법(Goal Programming)으로 구현하여 다양한 현실적·물리적 운영제약을 유연하게 반영할 수 있다.

3. 수자원시스템에서의 활용성 검증을 위한 댐-보 연계운영

2장에서 제안한 시뮬레이션 기반의 최적화 모형인 CoWMOM의 차별화된 특성과 적용성을 검증하기 위해 실무에서 대표적으로 활용되는 시뮬레이션 모형 HEC-ResSim과 연계운영 효과를 비교 분석하였다. 연계운영 효과는 실제 댐 운영 시 중요한 평가기준인 분석기간 동안 공급 가능한 최대용수량, 발전량 그리고 여수로 방류량을 기준으로 하였다.

3.1 입력자료 구축 및 전제 조건

연계운영 분석 대상수계는 한강수계를 선정하였다. 수계 내 위치한 다목적댐(소양강댐, 충주댐, 횡성댐), 수력발전댐(화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 괴산댐), 다기능보(강천보, 여주보, 이포보)를 고려하여 모형을 구축하였으

며, 댐과 다기능보의 물리적 제원 및 운영기준은 댐 운영 실무편람(Korea Water Resources Corporation, 2011)의 자료를 활용하였다. 분석대상 기간은 1967~2006년의 40년을 대상으로 하였으며 유입량은 수자원장기종합계획('06~'20)(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2006)자료를 활용하였다. 산정과정은 Tank 강우-유출모형에 의한 자연유량, 용수수요전망에 의한 '16년 용수량 및 용수회귀율(생공 65%, 농업 35%)을 반영한 물수지분석모형(K-WEAP)을 활용종하여 산정된 반순단위 유량으로, 실제 모형적용 시 일 자료로 변환하여 사용하였다.

또한 다기능보의 신설로 변화된 수문현황과 다기능보의 용수 활용 목적을 고려하여 댐-보 연계운영 분석을 수행하였다. 이때 운영수위 상한은 관리수위를 적용하고, 운영수위 하한은 안정적인 하천취수를 위해 하천갈수위를 적용하였다. 아울러 다기능보의 시설물별 방류 우선순위는 각 시설물의 특성을 고려하여 어도>소수력>가동보 순으로 설정하였다.

댐-보 연계운영에서의 용수공급량은 기본적으로 하천유지용수를 포함해서 수계 내에서 공급 가능한 수량으로 계산하였다. 초기수위로 댐은 상시만수위, 다기능보는 관리수위를 적용하였으며, 팔당댐을 기준으로 하류로 공급해야 할 유지용수(124 m^3/s)를 포함한 총 방류량 중, 통제불가능한 방류를 의미하는 여수로 방류량을 제외한 값을 용수공급량으로 산정하였다. 그리고 전체 분석 기간에 물부족이 발생하지 않는 연도 수(충족연수)의 비율, 즉 연간단위 신뢰도를 기준으로, 총 40개년의 분석기간에 대하여 물 부족이 1개년 발생하는 이수안전도 97.5%를 만족시키는 공급량을 산출하였다. 산출된 용수량을 기준으로 발전량과 댐별 여수로 방류량을 산출하여 연계운영 효과를 분석하였다.

3.2 용수공급량 산정을 위한 기본 절차

연계운영 분석 시 용수공급량은 최소 공급량을 상시적으로 공급한다는 전제하에 기본 수요량을 조정하면서 댐-보 연계운영을 수행하고, 이수안전도를 만족하는 범위에서의 최대 공급량을 찾는 개념을 활용하였다. 이때 용수공급량의 허용오차는 최대 10백만 m^3/년으로 설정했다. 이 양은 소양강댐, 충주댐, 횡성댐의 용수공급량, 약 4,700백만 m^3/년 대비 약 0.2% 수준에 해당한다.

Fig. 1은 연계운영 분석절차를 도시한 것으로, 먼저 유입량 및 기본 수요량 자료를 구축한다. 그리고 댐-보의 최대 용수공급량이 유입량을 초과할 수 없으므로 총 유입량을 용수공급량의 최대치로 설정한다. 다음은 댐-보 연계운영을 위한 규칙을 입력하고 이 규칙을 적용해서 HEC-ResSim 또는 CoWMOM 모형을 수행한다. 이때 모형 결과의 이수안전도와 허용오차 범위를 확인하여 수요량 D_i를 결정한다. 예를 들어 모형의 i회차 결과가 이수안전도 97.5%를 보장하지만 $i-1$회차의 용수공급량과의 차이가 허용오차보다 크다고 가정하자. 그러면 수요량 D_i를 $\left(\frac{UB-D_i}{2}\right)$ 만큼 늘려, $i+1$회차의 수요량 D_i는 $\left(\frac{D_i+UB}{2}\right)$이 된다. 반면 이수안전도를 충족하지 못하고 $i-1$과 i회차의 용수공급량의 차이가 허용오차보다 큰 경우라면, 수요량 D_i

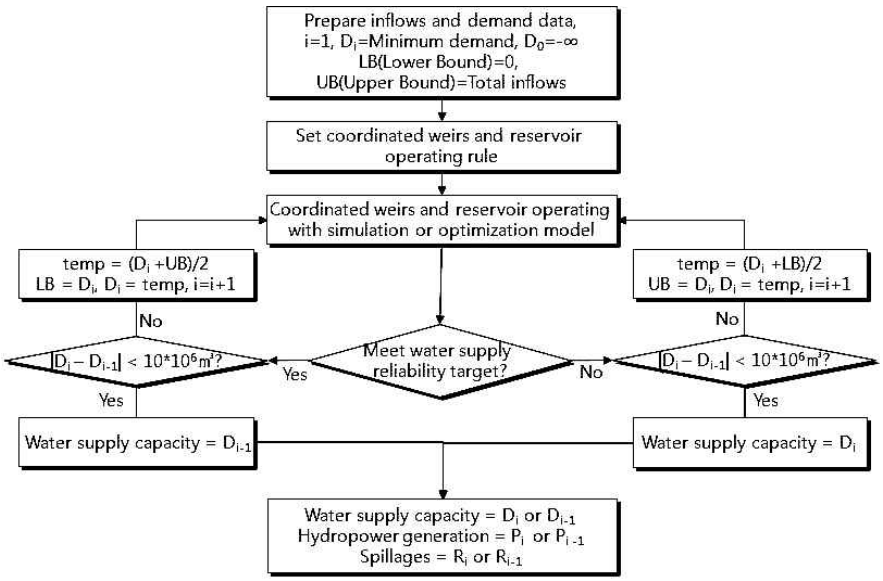


Fig. 1. Process for Evaluation of Water Supply Capacity

를 $\left(\frac{D_i - LB}{2}\right)$만큼 줄여 $i+1$의 수요량 D_i는 $\left(\frac{D_i + LB}{2}\right)$이 된다. 이 같은 이분법적 탐색은 이수안전도를 충족하면서 용수공급량의 증가폭이 허용오차 보다 작아질 때 까지 반복한다. 그리고 그 때의 용수공급량, 발전량 그리고 여수로 방류량 자료를 토대로 수자원시스템의 운영성과를 산정한다.

3.3 연계운영을 위한 모형 설계

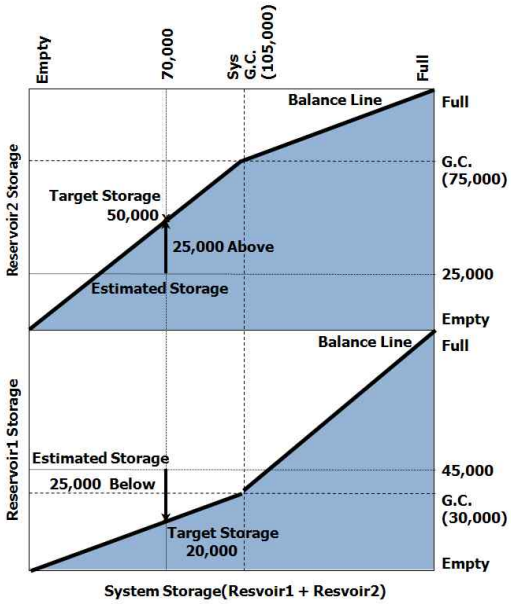
3.3.1 HEC-ResSim

HEC-ResSim에서는 수계 내 직렬 또는 병렬로 연계된 시스템에서 방류량과 방류 우선순위의 결정은 연계된 댐 간의 일정한 유효저수율을 유지하도록 하는 Storage Balance Method를 사용한다. 이 방법은 연계된 댐의 유효저수량을 동일하게 맞춰 운영하는 방식으로 시스템 기반의 Implicit Method와 사용자 정의 기반의 Explicit Method가 있다.

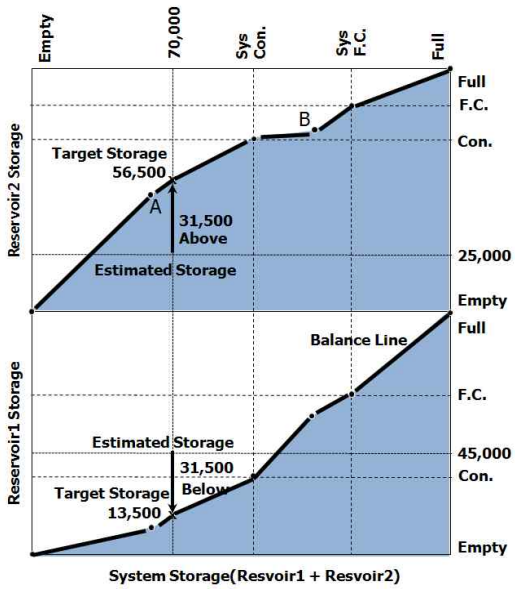
Fig. 2는 Storage Balance Method에 대한 그래프로 두 저수지를 연계운영 한다고 가정할 때, 세로축은 연계된 저수지 각각의 저수량을 나타내고 가로축은 두 저수지의 저수량 합을 나타낸다. Fig. 2(a)의 Implicit System Storage Balance Method는 하나의 지침수위 저수량 즉 상시만수위 저수량을 고려하는 방법으로, 세로축 G.C. (Guide Curve)는 각 저수지 상시만수위 저수량을 나타내고 가로축 Sys. G.C. (System Guide Cuves)는 저수지 1과 2의 상시만수위 저수량의 합을 나타낸다. 시스템은 G.C.와 Sys. G.C.의 교점을 통해 두 저수지의 유효저수율을 동일하게 유지하는 지침선을 생성한다. 본 연구에서는 이 지침선을 목표저수량선(Balance Line) 이라고 칭하였다. 생성된 목표저수량선은 연계된 각 저수지의 방류 여부와 방류량을 결정할 수 있다.

예를 들어, Fig. 2(a)에서 저수지 1의 G.C.는 30,000 m^3이고 저수지 2의 G.C.는 75,000 m^3이면 두 저수지의 Sys. G.C.는 105,000 m^3이다. 각 저수지의 G.C.와 두 저수지를 통합한 Sys. G.C.의 교점을 기준으로 목표저수량선을 생성한다. 만약 t+1 시점의 예측되는 저수지 1의 저수량이 45,000 m^3, 2의 저수량이 25,000 m^3으로 통합저수량이 70,000 m^3으로 가정하자. 이때 예측된 통합저수량 70,000 m^3을 만족하게 하는 저수지 1의 목표저수량 20,000 m^3이고 2의 목표저수량 50,000 m^3이다. 두 저수지가 목표저수량에 도달하기 위해서는 저수지 1은 방류를, 2의 경우 저수를 해야 한다. 이렇게 함으로써 이때 목표저수량의 값은 각 저수지의 G.C.에 대하여 저수지 1은 20,000 m^3/30,000 m^3, 저수지 2는 50,000 m^3/75,000 m^3으로 동일한 저수율 66.7%를 갖게 된다. Fig. 2(b)의 Explicit Method는 연계된 댐 간 최적 운영패턴을 알고 있거나 혹은 이미 결정된 댐 간 운영패턴의 결과를 확인할 때 적합한 방법이지만, 본 연구에서는 연구의 목적상 Implicit Method를 사용하였다.

또한 HEC-ResSim을 활용하여 효율적인 댐-보 연계운영을 위해서는 시스템의 특성뿐 아니라 방류 운영규칙의



(a) Implicit System Storage Balance



(b) Explicit System Storage Balance

Fig. 2. Operating Rule of HEC-ResSim (Klipsch and Hurs, 2007)

특성도 중요하다. 연계운영 시 대표적으로 사용되는 운영규칙은 RFR(Release Function Rule), DCFR(Downstream Control Function Rule), TOR(Tandem Operation Rule)이 있다. RFR은 자체 댐 기준 방류규칙으로써 댐 간 연결형태와 관계없이 각 댐에서 하류로 방류 가능량을 설정할 수 있다. DCFR은 하류의 제어지점(Control Point) 기준 방류규칙으로, 병렬관계에 있는 댐과 하류의 제어지점을 연계운영 하거나 단일 댐과 하류의 제어지점을 연계운영할 때 사용되는 규칙이다. 마지막으로 TOR은 하류댐 기준 방류규칙으로, 직렬로 연계된 댐 중에 가장 하류에 있는 댐을 기준으로 연계된 댐들 간 동일한 저수율을 유지하면서 하류댐의 방류량을 만족하게 하는 규칙이다. 아울러 이러한 규칙을 설정할 때 각 규칙에 대한 우선순위를 정할 수 있다. 댐에 아무런 규칙을 설정하지 않았을 때는 댐의 상시만수위를 Guide Curve로 준수하는 것을 우선으로 하고 여러 개의 규칙이 설정되어 있을 때는 먼저 설정된 규칙 우선으로 운영하는 것을 원칙으로 한다.

Fig. 3은 한강수계의 네트워크 구조와 HEC-ResSim의 시스템적 특성을 고려하여 설정한 운영규칙의 설정도이다. 먼저 네트워크 구조를 살펴보면 의암댐을 기준으로 소양강댐과 춘천댐은 병렬 관계에 있고 청평댐, 횡성댐, 충주댐 그리고 괴산댐은 팔당댐을 기준으로 병렬구조를 이루고 있다. 그리고 각 댐은 하류의 댐들과 직렬 구조를 이루고 있다. 앞에서 설명하기를 직렬관계에 있는 댐 간에는 TOR을 설정하고 공통된 제어지점에 대하여 병렬관계에 있는 댐이나 단일 댐과 제어지점 간에는 DCFR을 설정하였다. 수계의 네트워크 구조가 간단하면 운영규칙에 대한 설정이 어렵지 않지만, 한강수계와 같이 직렬과 병렬이 혼합된 복잡한 네트워크는 운영규칙의 조합에 따라 하류로 공급할 수 있는 양이 크게 달라지기 때문에 적절한 운영규칙 설정에 다음과 같은 어려움이 있다. 첫째, 기준 댐에 대하여 직렬과 병렬관계를 모두 맺고 있는 댐에 어떻게 규칙을 설정할 것인가에 대한 문제가 있다. 둘째, 댐과 제어지점에 대하여 설정할 수 있는 DCFR을 병렬관계에 있는 댐 간에 어떻게 적용할 것인가를 고려해야 한다. 마지막으로 평가기준 지점의 위치와 평가방식을 고려하여 댐간 운영규칙을 설정해야 한다.

이처럼 HEC-ResSim을 활용하여 연계운영 평가 시, 시스템 및 운영규칙의 특성뿐 아니라 수계 네트워크의 구조, 댐의 특성 그리고 평가 방식(운영목적)을 고려해야하기 때문에 운영규칙 설정의 어려움이 있다. 이 같은 어려움은 CoWMOM에서는 자동적으로 해결된다. 운영규칙을 미리 정해놓지 않고 수문상황에 따라 수요와 공급의 균형을 맞추어 가기 때문이다.

3.3.2 CoWMOM

CoWMOM에서는 시뮬레이션 모형과 달리 운영규칙을 미리 설정해야하는 어려움은 없다. 다만 댐-보 연계운영

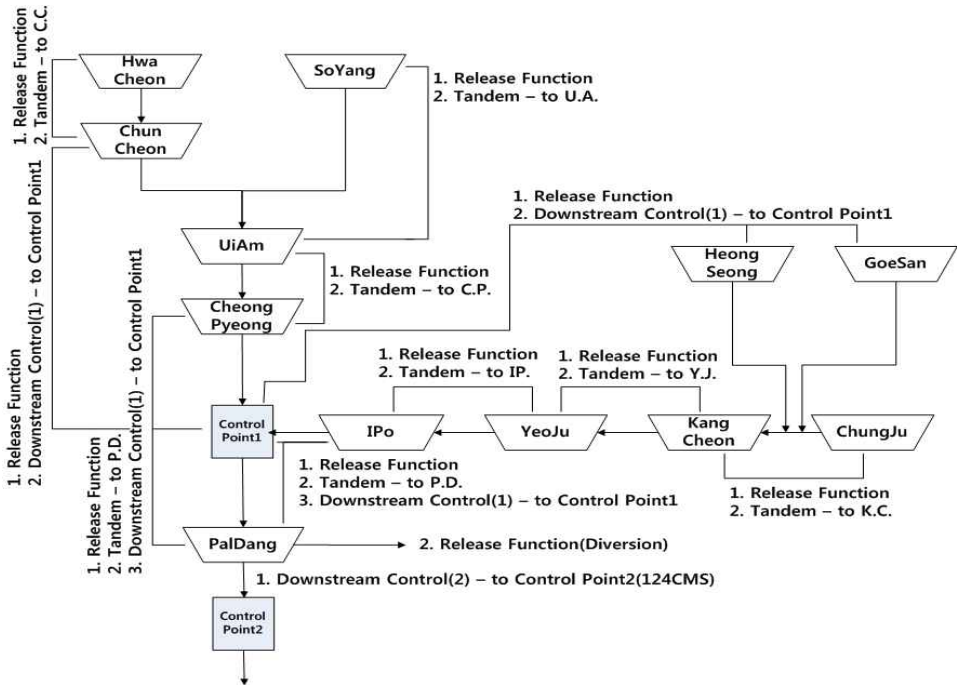


Fig. 3. Operating Rule of HEC-ResSim Model for Han-River Basin

의 효율성을 보장하게 해주는 목적함수를 설정해야 한다. 이를 위해서 댐-보 연계운영 시 운영목적과 수문 지형적 제약을 고려한 가중치 조정을 통해 목적함수의 우선순위를 설정하였다(Kim et al., 2011). 원래 CoWMOM은 댐과 보의 운영과 관련한 매우 다양한 운영 조건과 목적을 고려하고 있어 그 형태가 더 복잡하지만, 이 연구에서는 연구의 주제와 직접적으로 관련 있는 부분을 중심으로 그 특성을 설명하고자 한다. Eq. (1)은 CoWMOM의 목적함수의 일부로, 각 항목별 의미는 다음과 같다.

▣ 목적함수

$$\begin{aligned} Min \quad & M_1\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in RES\cup WEIR} BSR_i^t + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in RES\cup WEIR} OVL_i^t\right) \\ & + M_2\sum_{t=1}^{T}\sum_{p\in CPS} TGC_p^{t-} + M_3\sum_{t=1}^{T}\sum_{j\in DMS} DSH_j^t + \\ & M_4 pspl_i\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in RES} SPL - pstr_i\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in RES\cup WEIR} STR_i^t \\ & - pepr_i\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in RES\cup WEIR}^{i} EPR_i^t \ldots \\ & (M_1 \gg M_2 \gg M_3 \gg M_4 \gg pstr_i \gg pepr_i) \end{aligned} \tag{1}$$

목적함수는 상위 4개의 목적에 대한 선취적 우선순위를 반영한 후, 차순위로 저수량과 발전 등을 고려하는 형태로 구성된다. 이때 상위 4개 목적에 부여된 가중치 M은 big-M을 의미하며, 나머지 저수와 발전에 대한 가중치보다 훨씬 큰 상수를 뜻한다. 목적함수의 첫 번째 항은 t시점 i댐(보)의 운영수위 하한 부족저수량(BSR_i^t)과 운영수위 상한 초과저수량(OVL_i^t)에 벌점(penalty) M_1을 곱한 것이고, 두 번째 항은 t시점 p조절점의 유지유량 부족량(TGC_p^{t-})에 벌점 M_2를 곱한 것이다. 그리고 세 번째 항은 t시점 j수요지의 용수공급 부족량(DSH_j^t)에 벌점 M_3를, 네 번째 항은 t시점 i댐의 여수로 방류량(SPL_i^t)에 대한 벌점 $M_4 pspl_i$를 곱한 것이다. 다섯 번째 항은 t시점 i댐(보)의 저수량(STR_i^t)에 저수량 최대화 목적에 대한 가중치 $pstr_i$를 곱한 것이며, 마지막항은 t시점 i댐(보)의 발전방류량(EPR_i^t)에 가중치 $pepr_i$를 곱한 것이다. 여기서 적용된 목점함수의 우선수위 관계는 $M_1 \gg M_2 \gg M_3 \gg M_4 \gg pstr_i \gg pepr_i$를 따르는데, 이렇게 함으로써 i) 댐과 보의 운영수위 상한과 하한을 유지하고, ii) 조절점의 유지유량을 최대한 준수하고, iii) 각 수요지의 수요량을 최대한 만족하면서, iv) 장래의 갈수기를 대비하여 무효방류를 최소화한 후, v) 가급적 많은 물을 저수하고, vi) 수력발전량을 고려하여 운영을 하는 것이다.

아울러 댐이나 보 간의 저수량 배분을 위하여 댐 여수로 방류, 댐(보)의 저수, 댐(보)의 발전에 대하여 가중치를 부여하였다. 즉, 여수로 방류의 경우 최하위 댐의 방류에 더 큰 벌점을 부여함으로써 수계에서 완전히 유출되는 물을 최소화할 수 있도록 하였다. 그리고 저수의 경우 직렬로 연결된 댐의 경우는 댐 하류 총수요가 많은 상류 댐일수록 가급적 많은 저수를 하도록 하였으며, 병렬로 연결된 댐들의 경우는 댐의 저수 용량에 비하여 평균 유입량이 적고 댐 하류의 수요가 많은 댐에 보다 많은 물을 담아두는 수정된 Space Rule (Lee et al., 2006)을 토대로 각 댐별 저수에 대한 상대적 가중치를 설정하였다. 또한 다기능보의 경우 저수에 대한 역할이 댐에 비해 미미하여 댐의 저수에 비해 작은 가중치를 부여하였으며, 만약을 대비하여 하류보에 비하여 상류보에 상대적으로 큰 가중치를 부여하였다. 아울러, 고정보 월류의 경우는 평상시 고정보 월류가 가능하도록 운영해야 하므로, 댐의 여수로 방류와 달리 따로 벌점을 부여하지 않았다.

▣ 저수 상/하한 제약

$$\text{댐: } LWLQ_i \le STR_i^t \le NHWQ_i \quad \text{for } i\in RES: \text{댐들의 집합}, t\in TPS: \text{기간 } t\text{의 집합} \tag{2}$$

$$\text{보: } WLWLQ_i \le WSTR_i^t \le WNHWQ_i \quad \text{for } i\in WEIR: \text{보들의 집합}, t\in TPS \tag{3}$$

▣ 용수공급량 제약:

$$DSH_j^t + \sum_{i\in HDN_j} WSP_{ij}^t = DMD_j^t \quad \text{for } j\in DMS: \text{수요지들의 집합}, t\in TPS \tag{4}$$

▣ 조절점 흐름량 제약:

$$CIN_p^t + TGC_p^{t-} \ge LMLC_p \quad \text{for } p\in CPS: \text{조절점들의 집합}, t\in TPS \tag{5}$$

▣ 댐 여수로 방류 조건 제약

댐 여수로 방류 여부:

$$BV_SPL_i^t \le STR_i^t / SPLQ_i \quad \text{for } i\in RES, t\in TPS \tag{6}$$

댐 여수로 방류량 제약:

$$SPL_i^t \le SPL_i^{\max} BV_SPL_i^t \quad \text{for } i\in RES, t\in TPS \tag{7}$$

▣ 다기능보 월류 조건 제약

고정보 월류 발생 여부:

$$BV_SPW_i^t \le STR_i^t / NWLQ_i \quad \text{for } i\in WEIR, t\in TPS \tag{8}$$

고정보 월류량 제약:

$$SPW_i^t \le SPW_i^{\max} BV_SPW_i^t \quad \text{for } i \in WEIR,\ t \in TPS \tag{9}$$

또한 댐-보의 물리적 특성 및 운영상의 제약을 고려하여 제약식이 구성되었다. Eqs. (2) and (3)는 댐과 보의 물리적 특성 및 운영목표를 고려한 저수 상/하한 제약식이다. t시점 i댐(보)의 저수량(STR_i^t)은 운영수위 상한저수량($NHWQ_i$, $WNHWQ_i$)과 하한저수량($LWLQ_i$, $WLWLQ_i$) 사이에서 운영되어야 한다. Eq. (4)는 용수공급량에 대한 제약으로, t시점 j수요지의 수요량(DMD_j^t)은 용수공급 부족량(DSH_j^t)에 용수공급량(WSP_j^t)을 더한 값과 같아야 한다. 즉 용수공급량은 수요량에 부합되도록 운영된다. Eq. (5)는 하천 유지유량 준수를 위한 제약으로, t시점 p 조절점에 유입되는 흐름량(CIN_p^t)과 유지유량 부족량(TGC_p^{t-})의 합은 조절점 p의 하천 유지유량($LMLC_p$) 이상이어야 한다. Eqs. (6)~(9)는 정수계획법(Integer Programming)을 활용한 댐의 여수로 방류와 보의 월류 조건을 표현한 조건제약식으로, 여기서 $BV_SPL_i^t$과 $BV_SPW_i^t$은 댐과 보가 각각 월류부표고와 관리수위를 초과한 경우에만 1의 값을 갖는 이진 정수변수이다. Eqs. (6) and(8)은 댐(보) 여수로(월류)방류 여부를 나타내는 조건제약이고, Eqs. (7) and (9)는 댐 여수로 방류량과 상한($SPL_i^{\max}$)과 고정보 월류량 상한($SPW_i^{\max}$) 제약을 나타낸다.

4. 결과분석 및 활용방안

본 연구에서 제안한 시뮬레이션 기반의 최적화모형, CoWMOM과 대표적인 시뮬레이션 모형인 HEC-ResSim을 이용하여 한강수계의 댐-보 연계운영을 각각 수행하고 그 효과를 비교 분석하였다. Table 2는 그 결과를 정리한 것으로 용수공급량, 발전량, 여수로 방류량 측면에서 결과를 보여준다. CoWMOM의 용수공급량은 6,402백만 m^3/년으로 HEC-ResSim의 용수공급량 5,890백만m^3/년보다 511백만m^3/년이 더 많았다. 발전량도 HEC-ResSim 대비 추가로 473 GWh를 생산할 수 있었으며 여수로 방류량은 HEC-ResSim의 10%수준으로 나타났다.

앞의 2장에서 시뮬레이션과 최적화 기법의 한계점과 기존 시뮬레이션 모형들의 고찰을 통해 시뮬레이션 기반의 최적화 모형을 활용할 것을 제안했다. 결과를 통해 알 수 있듯이 각 기법의 원리와 모형의 시스템적 특성은 연계운영 결과에 많은 영향을 준다. 따라서 CoWMOM이 HEC-ResSim 대비 더 많은 용수공급량, 발전량 그리고 무효방류량(spillage)을 줄일 수 있었던 이유를 연계운영의 원리와 각 모형의 시스템적 특성을 통해 확인해 보았다.

4.1 HEC-ResSim 대비 CoWMOM의 시스템적 특성

4.1.1 수요와 공급 간의 균형을 찾는 전체 유역적 접근

효율적인 연계운영을 위해서는 수요와 공급 간의 균형을 고려하여 수계 내 댐-보를 하나의 시스템처럼 운영해야 한다. 하류 댐에서 수요량에 대한 물 부족이 발생할 때 상류 댐에서는 가용한 물량, 즉 유효저수량 한도 내에서 부족량을 공급해 줄 수 있어야 한다. 여기서 가장 중요한 원리는 수요와 공급 간의 균형이다. 수요에 맞는 공급량은 목적 없이 낭비되는 물을 저장함으로써 유효저수량을 증가시키고 용수공급량 증대에 기여할 수 있다. Table 3은 두 모형이 월 평균 수요량과 공급량 간의 균형을 어떻게 유지하고 있는지를 보여준다. 여기서 주목할 점은 CoWMOM의 수요와 공급량의 차이가 HEC-ResSim보다 적다는 것이다. 즉 40년의 분석기간 내내 CoWMOM이 HEC-ResSim 에 비해 수요와 공급의 균형을 더 잘 맞추어 운영한 것을 알 수 있다.

이러한 운영은 결과적으로 CoWMOM 모형이 수계 내 댐-보를 하나의 시스템으로 간주하고 효율적으로 연계운

Table 2. Detailed Results of the Weirs and Multi-Reservoir Operation

		HEC-ResSim (A)	CoWMOM (B)	B-A
Water demand ($10^6 m^3/year$)		5,890.9	6,402.0	+511.1
Water supply	m^3/sec	186.8	203.0	+16.2
	$10^6 m^3/year$	5,890.9	6,402.0	+511.1
Year water shortage occurred		1988	1988	-
Water shortages ($10^6 m^3$)		18.9	140	+121.1
Hydropower generation (GWh)		1,658	2,131	+473
Spillages ($10^6 m^3/year$)		8,562	1,054	-7,508

영 했다는 근거가 된다. 이를 확인하기 위해 댐-보 연계운영에 따른 유효저수량의 변화를 분석해 보았다. 유효저수량은 가용한 물량을 나타내는 척도로 운영패턴과 연계운영 효과를 파악하기에 유용하다. Fig. 4는 한강수계의 9댐과 3개의 다기능 보의 유효저수량 총합 변화추이를 나타낸 그래프로, 두 가지 사실을 통해 CoWMOM이 HEC-ResSim보다 효율적인 연계운영을 하고 있음을 확인할 수 있다. 첫째, 두 모형의 운영패턴은 흡사하나 CoWMOM의 유효저수량이 HEC-ResSim보다 낮게 운영되고 있다. 즉, CoWMOM은 유효저수량을 충분히 활용하여 동일한 이수안전도 97.5%를 만족시키면서 Table 2의 결과와 같이 HEC-ResSim 대비 511백만m^3/년의 용수를 추가로 공급할 수 있었다. 둘째, 두 모형의 물 부족 발생 원인이 명확히 다르다. 물 부족이 발생하는 1988년 7월 시점 HEC-ResSim의 유효저수량 총합은 133백만m^3이다. 이는 HEC-ResSim의 일별 용수공급량 16.1백만m^3 (186.8m^3/s)임을 고려해 볼 때 약 8일을 추가로 공급할 수 있는 양이다. 반면, CoWMOM의 유효저수량 총합은 2백만m^3으로, 공급 가능한 일별 용수공급량이 17.5백만m^3 (203.0m^3/s)인 것을 고려하면, 가용한 유효저수량을 거의 전부 활용한 것을 알 수 있다. 즉 CoWMOM은 가용한 유효저수량이 부족하여 어쩔 수 없이 물 부족이 발생하였지만, HEC-ResSim은 충분한 저수량이 있었음에도 불구하고 물 부족이 발생하였다. 또한, 용수공급부족 총량은 이러한 사실을 뒷받침함으로써 CoWMOM이 HEC-ResSim보다 유효저수량을 더 효율적으로 활용하고 있음을 알 수 있다.

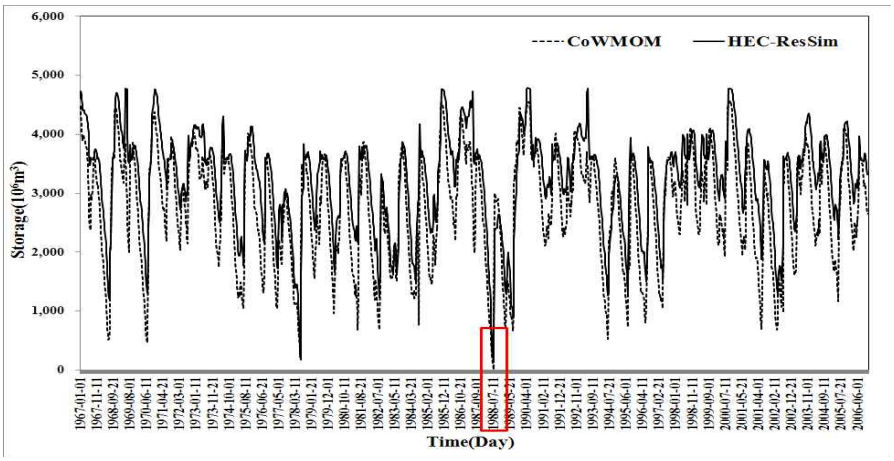
Table 3과 Fig. 4를 통해 CoWMOM이 하나의 시스템 관점에서 수요와 공급의 균형을 찾는 운영방식을 통해

Table 3. Comparison of the Demand and Supply between HEC-ResSim and CoWMOM

Unit: 10^6m^3, month

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HEC-ResSim	A*	500	452	500	484	500	484	500	500	484	500	484	500
	B*	505	473	527	582	650	1,222	2,558	2,662	1,851	636	511	508
	B-A	5	21	27	98	149	738	2,057	2,162	1,367	136	27	8
CoWMOM	A	544	491	544	526	544	526	544	544	526	544	526	544
	B	544	492	550	583	649	1,260	2,642	2,565	1,471	607	537	544
	B-A	0	1	6	57	106	734	2,098	2,022	945	63	10	0

*A: Water Demand, B: Water Supply Capacity



	HEC-ResSim(A)	CoWMOM(B)	A-B
Year when water shortage occurred	1988. 07	1988. 07	-
Active storage when water shortage occurred (10^6m^3)	133	2	+131

Fig. 4. Variation of Total Active Storages of Han-River Basin

HEC-ResSim 보다 더 많은 용수를 효과적으로 공급할 수 있음을 확인하였다. 이러한 운영결과의 차이는 두 모형의 운영 원리적 특성에 기인한다. 앞서 2장에서 설명했듯이, HEC-ResSim은 최적화 기반의 시뮬레이션 모형이지만, 미리 설정한 운영규칙을 기준으로 수요와 공급의 균형을 맞추어 운영한다. 반면 CoWMOM은 시뮬레이션 기반의 최적화 모형으로, 3.3.2절에서 언급한 평가지침의 운영성과 최대화를 목적으로 수문상황 변화에 따라 유연하게 수요와 공급의 균형을 맞추도록 운영하였기 때문에 이런 차이가 나타난 것이다.

4.1.2 수자원 보존적 운영

1장에서 언급 했듯이 우리나라는 가용 수자원 대비 취수율이 40%를 넘어 강수량 등 기후 여건으로 인한 물 사용 제한을 받는다. 뿐만 아니라 홍수기인 6~9월에 연 강수량의 2/3가 집중되고 여름 강수량이 차지하는 비율이 높아지는 강수의 계절적 변화는 수자원 관리에 어려움을 가중시킨다. 이러한 이유로 국내의 수문 특성을 적합하게 반영하고 수자원 보존에 유리한 개념을 적용한 효율적 연계운영이 필요하다. 각 댐별 정확한 유입량 예측이 어려운 실제 댐 운영 상황에서, 현실상황을 반영한 합리적인 운영을 위해서는 i) 수요와 공급 간의 균형을 찾고, ii) 무효방류(spillages)를 최소화하며, iii) 홍수기말에 가능한 많은 물을 확보하고, iv) 가급적 상류댐에 많은 물을 저수하는, 수자원 보존적 운영정책이 필요하다.

Table 4는 무효방류량을 기준으로 두 모형을 비교한 것으로 다기능보를 제외한 수계 내 9개댐의 무효방류량을 산정한 결과다. 다기능보는 가용한 저수량과 발전량이 적을 뿐 아니라 보의 시설물 운영 특성상 평상시 고정보 월류가 가능하도록 운영해야하므로, 무효방류를 나누는 기준이 모호하여 무효방류량 산정 대상에서 제외하였다. Table 4에서 각 댐의 연평균 무효방류량을 살펴보면 CoWMOM의 무효방류량은 HEC-ResSim의 12.3% 수준이다. HEC-ResSim은 발전방류와 수문방류의 우선순위는 고려할 수 있으나, 용수공급이라는 단일목적에 대하여 미리 정해진 운영규칙에 맞춰 댐-보의 유효저수량을 기준으로 운영하기 때문에 무효방류량을 조절하기 어렵다. 반면, CoWMOM은 용수공급을 만족시키면서 발전방류량 최대화와 무효방류량 최소화를 차선의 목적으로 연계운영 할 수 있는 적용의 융통성(Versatility)을 갖고 있어 HEC-ResSim 대비 우수한 결과를 도출하였다.

무효방류를 최소화 운영은 효율적인 연계운영을 위해서 대단히 중요하다. 특히 우리나라처럼 강수가 특정시기에 집중되는 경우에는 그 효과가 더 크게 나타난다. 이는 유효저수량을 증가시킴으로써 홍수기에 강수가 집중되는 국내 강수 특성에 효과적으로 대비할 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 5의 월별 평균 유효저수량 변화추이를 통해 확인할 수 있다. 무효방류를 최소화함으로써 유효저수량을 증가시키고, 결국 홍수기 말에 더 많은 물을 확보한 것이다.

한편, 수자원 보존적 운영은 가급적 상류댐에 많은 물을 저수하는 결과를 낳는다. Figs. 6 and 7은 각각 한강수계 전체와 소양강댐과 충주댐의 누적 유효저수량을 보여준다. 먼저, Fig. 6을 보면 CoWMOM을 적용한 경우의 총 유효저수량이 HEC-ResSim을 적용한 경우에 비해 적고, 시간이 지날수록 두 모형 간의 누적 유효저수량 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 CoWMOM이 유효저수량을 효율적으로 활용해 511백만m^3/년의 용수를 추가로 공급할 수 있었던 것을 고려할 때 당연한 결과이다. 하지만 Figs. 7(a) and 7(b)을 통해 알 수 있는 사실은 북한강 상류에 있는 소양강댐의 분석기간 말 누적 유효저수량의 경우 두 모형 간 차이가 거의 없지만, 충주댐의 경우는 분석기간

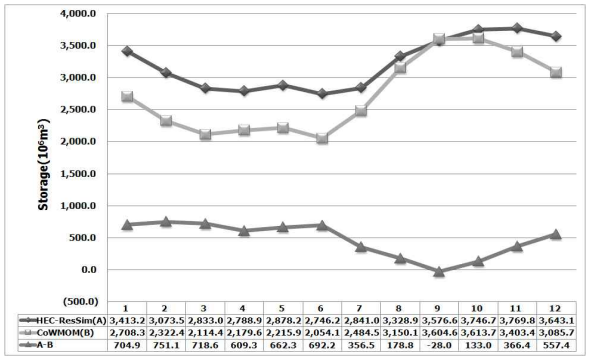


Fig. 5. Variation of Monthly Active Storages of Basin

Table 4. Spillages of Each Dam

Unit: 10^6m^3/year, %

	So Yang	Chung Ju	Heong Seong	Hwa Cheon	Chun Cheon	Ui Am	Cheong Pyeong	Goe San	Pal Dang	Total
HEC-ResSim(A)	505	770	101	200	327	1,001	1,719	106	3,833	8,562
CoWMOM(B)	43	123	14	18	24	80	173	18	561	1,054
(B/A)×100	8.5	16.0	13.9	9.0	7.3	8.0	10.1	17.0	14.6	12.3

말 누적 유효저수량이 HEC-ResSim을 적용한 경우에 비해 적다는 것이다. 이러한 결과는 CoWMOM이 i) 511백만m^3/년의 용수를 추가로 공급했고, ii) 소양강댐에서 이미 높은 유효저수량을 유지하고 있기 때문에 당연한 결과이다. 여기서 중요한 사실은 충주댐이 아닌 소양강댐의 유효저수량이 높게 유지한 이유이다. 효율적인 연계운영을 위해서는 동일한 운영조건이면 가급적 유입량이 적은 댐에서 저수를 하고 유입량이 많은 댐에서 방류를 하는 것이 장래 물부족에 효과적으로 대응할 수 있다.

CoWMOM이 HEC-ResSim 보다 효율적인 연계운영을 할 수 있었던 이유는 수자원 보존적 운영정책의 결과라 할 수 있다. 즉, CoWMOM은 유입량이 적은 비홍수기에 하류에서 요구하는 수요량만큼 일정하게 보내주고, 유입량이 많아지는 홍수기에는 하류수요량은 일정하게 공급하되 저수 상한인 상시만수위(홍수기 제한수위)를 넘는 수량에 대하여만 추가방류를 시행하여 불필요한 무효방류(spillages)를 최대한 줄이고, 남은 물은 가급적 상류댐에 저수함으로써 연계운영 효과를 극대화할 수 있었다.

앞서 2장에서 시뮬레이션과 최적화 기법의 원론적 비교와 기존 모형의 고찰을 통해서 설명했듯이, 두 모형의 결과에 결정적인 영향을 준 요소는 모형의 운영 원리적 특성이다. 현실에서 발생하는 물리적·운영적 제약 그리고 효율적인 운영정책을 유연하게 반영할 수 있는 CoWMOM이 더 나은 결과를 도출한 것이다.

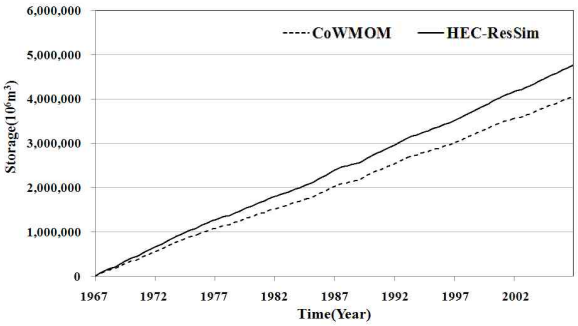


Fig. 6 Accumulation of the Yearly Active Storages of Han-River Basin

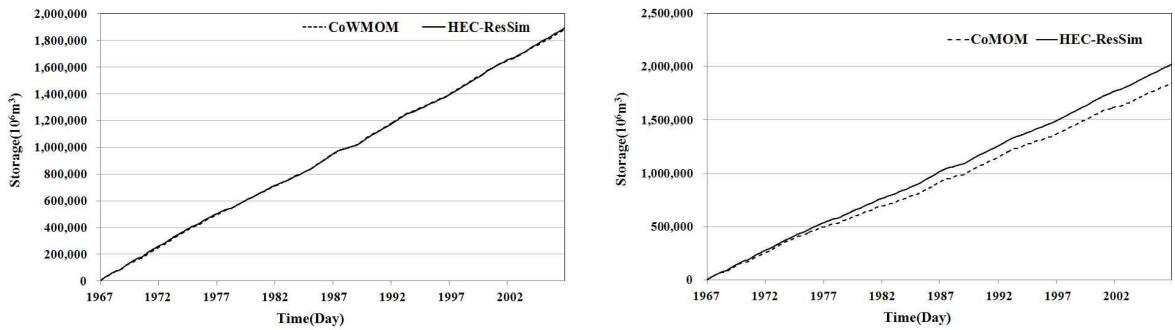
4.2 모형의 활용 방안

수자원시스템의 효율적 운영 및 관리를 위해서는 효과적인 연계운영과 더불어, 모형의 시스템적 특성을 파악하고 목적에 맞게 활용해야한다. 이에 본 연구에서는 CoWMOM 모형의 두 가지 활용방안을 제시한다. 첫째, 과거의 특정 기간에 대한 분석 도구로써의 활용방법을 제시한다. 둘째, 미래의 불확실한 상황에 대한, CoWMOM 기반의 물 관리 운영계획 수립 및 운영을 위한 시스템 활용 절차를 제시한다.

4.2.1 과거의 특정 기간에 대한 분석 도구로써의 활용

수자원 시스템의 용수공급능력평가, 새로운 시설물 건설에 따른 효과 분석, 운영기준 및 정책변화에 따른 시뮬레이션 분석 등은 과거 특정기간에 대한 실제 유입량을 활용하거나 확률·통계적 기법을 활용하여 특정 시나리오에 의해 산출한 유입량을 활용한다. 이러한 분석 시 최우선으로 고려할 사항은 특정한 제약조건을 만족하면서 목적에 가장 적합한 결과를 산출하는 것이다. 4.1절에서 제시한 바와 같이 CoWMOM은 여러 운영목적을 고려하여 가장 효율적이 결과를 산출하지만 분석기간이 길어지면 해 도출에 많은 시간이 소요된다. 반면 HEC-ResSim과 같은 시뮬레이션 모형들은 분석기간의 크기에 상관없이 짧은 시간에 운영결과는 도출할 수 있지만 적절한 운영규칙을 도출하기 위하여 많은 시행착오를 고려해야 하고, 도출된 운영규칙의 파레토 최적(Pareto Optimum)을 보장하지 못한다.

그러나 이러한 단점들은 두 모형의 특성을 적절하게 활



(a) So-Yang Dam (b) Choong-Ju Dam

Fig. 7. Accumulation of the Yearly Active Storages of Two Major Dams

용함으로써 개선될 수 있을 것이다. 즉 과거특정 기간에 대하여 수자원 시스템의 분석 도구로 활용할 때, CoWMOM에서 산출된 운영결과를 시뮬레이션 모형의 입력 자료로 활용하거나, 목적에 맞게 CoWMOM을 수정함으로써 모형의 수행시간, 시행착오를 통한 운영규칙 도출의 시간을 줄이고 선택된 대안의 파레토 최적을 보장받을 수 있다. 또한 Chae et al. (2012)은 용수공급능력 평가 시 시행착오법을 통한 번거로움을 고려하여, 물 부족이 발생하지 않은 최대 용수공급능력을 쉽게 찾을 수 있도록 CoWMOM기반의 2단계 목표계획 기반 최적화 모형을 제시하였는데, 이것도 CoWMOM 활용의 좋은 예가 될 수 있다.

4.2.2 유입량의 불확실성을 반영한 물 관리 운영계획 수립에 활용

현실적으로 미래 수문환경에 대한 정확한 정보를 사전에 얻는 것은 불가능하다. 이러한 현실에서 실제 물이용 효율을 높이기 위해서는 수자원 시설물간의 연계운영을 통해 물 관리 운영계획을 수립할 필요가 있다. 물 관리 운영계획의 수립은 i) 소유역별 유량예측을 통해, ii) 댐-보 연계 방류량 결정을 하고, iii) 이를 통한 수계 물수지 분석과, iv) 수질모의를 통한 방류계획의 확정 및 하천유량의 예측을 통해 이루어진다. 이러한 4단계 절차 중 댐-보의 방류량 결정은 물 관리 운영계획 수립을 위한 가장 중요한 요소이며, 따라서 CoWMOM과 같이 다중목적을 고려하며 현실상황을 모의할 수 있는 유연하면서도 정교한 모형이 필요하다. 이에 본 연구에서는 Korea Water Resources Corporation (2012)에서 제시한 내용을 토대로, CoWMOM을 활용한 미래 물 관리 운영계획의 수립방법을 제시한다.

Kim et al. (2011)에 의하면 월간 운영계획 수립은 확률적 모형(Stochastic Model)을 일간 운영계획은 확정적 모형(Deterministic Model)을 활용하는 것이 효율적이다. 본 연구는 이러한 개념을 활용하여 2단계 물 관리 운영계획 수립절차를 Fig. 8과 같이 제시하였다. 먼저, 1단계에서는 SSARR (The Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 또는 RRFS (The Rainfall Runoff Forecasting System) 등의 예측 유입량을 활용하여 댐-보 연계운영을 수행하고 이 결과를 토대로 월간 운영계획을 수립한다. 여기서 수립된 월간 운영계획은 유입량 예측의 불확실성으로 한 달 단위의 유입량 오차를 가지고 있다. 이러한 점을 감안하여 2단계에서는 실제 수문상황을 반영한 실시간 시뮬레이션을 활용하여 일간 운영계획을 수립한다. 상세절차는 다음과 같다. 우선, 유출 모형을 통해 예측 유입량을 적용한 CoWMOM을 활용하여 분석기간 t~T에 대한 일별 최적 방류량을 구한다. 이 결정에 가장 큰 영향을 주는 요소는 시설물로의 유입량과 그 시점의 댐(보) 저수위이며, 이를 토대로 최적의 방류량을 결정한다. 그러나 이 방류량은 예측 유입량을 토대로 한 것으로, 경우에 따라서는 실현 불가능할 수도 있다. 따라서 당일의 실제 유입량을 토대로 실현 가능한 방류량을 계산하고 그대로 실행한다. 그런 연후에는 t+1 시점의 초기 저수위를 토대로 다시 CoWMOM을 재수행해야 한다. 그런데, 이때 과거 기간을 대상으로 한 모형 검증이 목적이라면 해당 기간의 실제 유입량을 통해서 다음 기간의 초기 저수량을 '계산'해야겠지만, 미래의 운영계획 수립을 목적으로 한 경우라면 댐(보)의 실제 관측저수위를 초기저수위로 설정해서 t+1~T의 분석기간에 대해 CoWMOM을 수행해야 할 것

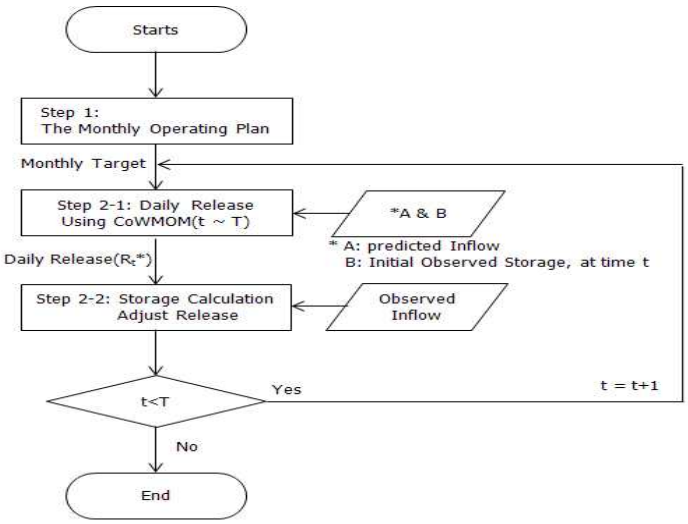


Fig. 8. The Process of Two-Stage Weirs & Multi-Reservoir Operation

이다. 즉 앞서 구한 기간 t의 최적 방류량 R_t^*, 당일(t)의 실제 관측유입량 I_t와 저수량 S_t를 반영해 실현 가능한 방류량(R_{t+1})을 도출한 후, 댐(보)의 실제 관측저수위를 초기값으로 사용하여, t+1~T의 분석기간에 대해 CoWMOM을 반복적으로 수행하는 것으로 요약할 수 있다. 이 과정에서 1단계에서 발생한 1달간의 유입량의 누적오차를 감소시킴으로써 실제 수문 상황을 반영한 현실적인 운영계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션과 최적화 기법의 원론적 비교를 통해 각 기법의 특성 및 한계점을 분석하고 이를 보완한 시뮬레이션 기반의 최적화 모형, CoWMOM의 활용방법을 제안하였다. 아울러 CoWMOM의 차별화된 특성과 적용성을 검토하기 위해 HEC-ResSim과 연계운영 효과를 비교 분석하였다. 평가기준은 용수공급량, 발전량, 여수로 방류량을 기준으로 하였으며 CoWMOM은 HEC-ResSim 대비 연간 511백만m^3의 용수공급량과 473 GWh의 발전량을 추가로 확보할 수 있었고 여수로 방류량은 HEC-ResSim 결과의 12.3%수준으로, 매우 효율적인 연계운영을 하였음을 확인하였다. 이러한 결과는 현실에서 발생하는 물리적·운영적 제약 그리고 효율적인 운영정책을 유연하게 반영할 수 있는 CoWMOM의 운영 원리적 특성에 기인한 것으로 판단된다.

더불어 수자원 시스템의 효율적 운영 및 관리를 위한 CoWMOM의 두 가지 활용방안을 제시하였다. 첫째, 과거의 특정 기간에 대한 분석의 도구로써의 활용방법으로, CoWMOM에서 산출된 운영결과를 시뮬레이션 모형의 입력 자료로 활용함으로써 모형의 수행시간, 시행착오를 통한 운영규칙 도출의 시간을 줄이고, 선택된 대안의 파레토 최적을 보장 받을 수 있다. 둘째, 미래의 수문 정보를 정확히 예측하는 것이 불가능한 현실에서 댐-보 연계 운영을 통한 성과를 얻기 위해 CoWMOM 기반의 수량 중심의 물 관리 운영계획 수립 절차를 제시하였다. 이 방법을 통해 확정적 최적화 모형을 취약점을 극복하고 댐-보 연계운영의 실질적인 성과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 4대강살리기사업 이후에 새롭게 설정될 새로운 하천관리 방향에 부응하기 위해서는, 보의 유지 및 운영관리에 주목할 필요가 있다. 특히 수질 사고 관리와 건기에 녹조 관리가 중요하게 될 것이므로 실시간 하천 수질관리가 중요한 이슈로 대두될 것이다(Kim, 2012). 따라서 CoWMOM을 수량 중심의 유역관리에서 수량과 수질 중심의 연계운영으로 발전시켜서 수질과 수량을 한꺼번에 관리하여 녹조 현상에 선제적으로 대비할 수 있는 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문의 제 2 저자는 2012년도 전북대학교 연구기반 조성비 지원을 받아 연구하였음.

REFERENCES

Chae, S.I., Kim, J.H., and Kim, S.K. (2012). “A study on evaluation of water supply capacity with coordinated weirs and multi-reservoir operating model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 8, pp. 839-851.

Hirsch, R.M., Cohon, J.L., and ReVelle, C.S. (1977). “Gains from joint operation of multiple reservoir systems.” *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 239-245.

Khaliquzzaman and Chander, S. (1997). “Network flow programming model for multireservoir sizing.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 1, pp. 15-22.

Kim, S.K. (1988). “Generalization of operational methodologies with review of literatures on reservoir operation.” *Journal of Korean Society of Water Resources*, Vol. 21, No. 1, pp. 16-25.

Kim, S.K. (2012). “Coordinated operation of weirs and reservoirs of nakdong river basin after the four river restoration project.” *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 6, pp. 11-17.

Kim, S.K., and Park, Y.J. (1998). “A mathematical model for coordinated multiple reservoir operation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 6, pp. 779-793.

Kim, S.K., Kim, J.H., and Choi, J.Y. (2011). “Real-time reservoir operation for the han river basin in Korea.” *proceedings AWRA 2011 SUMMER SPECIALTY CONFERENCE,* Utah, USA.

Kim, S.K., Kim, J.H., and Ko, I.H. (2004) “Interactive multi objective decision making for operation of a

multi-reservoir system." *IWA 6th International Conference on Hydroinformatics, World Scientific Publishing Company*, pp. 961-968.

Kim, S.K., Park, Y.J., and Kim, J.H. (2000). "Water supply simulation by a mixed integer network flow imbedded linear programming model." *Proceedings of Informs-Korms Seoul-2000 Conference*, pp. 1-13.

Klipsch, J.D., and Hurst, M.B. (2007). *HEC-ResSim reservoir system simulation user's manual*, Computer Program Documentation, CPD-82, US Army Corps of Engineers, California.

Korea Water Resources Corporation (2011), Dam Operation and Maintenance Manual.

Korea Water Resources Corporation (2012), Report on the Development of the Model for Coordinated Operation of Water Supply System in River Flow Management System.

Kuczera, G. (1989). "Fast multireservoir multiperiod linear programming models." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 169-176.

Labadie, J.W. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems : state-of-art review." *a Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.

Lee, G.M., Yi, J.E., Shim, S.J., and Ko, S.K. (1999). "Water Resources Evaluation using a Network Optimization Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 32, No. 2, pp. 143-152.

Lee, Y.D., Jeon, S.M., Kim, S.K., and Ko, I.H. (2006). "Operating rules for allocating storage among reservoirs in parallel for coordinated operation." *Proceedings of the 2006 Annual Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 343-348.

Lee, Y.D., Kim, S.K., Kim, J.H., and Ko, I.H. (2003). "A mathematical model for daily coordinated multi reservoir operation." *Proceedings of ASCE World Water and Environmental Resources Congress.*

Loucks, D.P., Beek, E.V., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P.M., and Villars, M.T. (2005). *Water resources systems planning and management.* UNESCO and W|L Delft Hydraulics.

Martin, Q.W. (1981). *Surface water resources allocation model Al-V program documentation and user's manual.* UM-35, Texas Department of Water Resources, pp. 1-47.

Mass, A., Hufschmidt, M.M., Dorfman, R., Thomas, H.A., Marglin, S.A., and Fair, G.M. (1962). *Design of water resources systems*, Harvard University Press, Cambridge, USA

Mejia, J.M., Egli, P., and LeClerc, A. (1974). "Evaluting multireservoir operating rules." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 6, pp. 1090-1098.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2006). Long-Term Master Planning for National Water Resources (2006~2010).

Niedda, M., and Sechi, G.M. (1996). "Mixed optimization technique for large-scale water resources system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 6, pp. 387-393.

ReVelle, C. (2000). "Research challenges in environmental management." *European Journal of Operational Research*, Vol. 121, No. 2, pp. 218-231.

Wurbs, R.A., and Tibbets, M.M. (1985). *State-of-the art review and annotated bibliography of systems analysis techniques applied to reservoir operations.* Texas Water Resources Institute, Texas

Yeh, W.W.-G. (1985). "Reservoir management and operation models : a state-of-the-art review." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.

Yi, J.E., and Song, J.W. (2002). "Evaluation of water supply capacity for multi-purpose dam using optimization and simulation techniques." *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 811-818.

논문번호: 12-117	접수: 2012.11.01
수정일자: 2012.12.05/12.13	심사완료: 2012.12.13