

댐-보 최적 연계운영을 통한 용수공급능력 평가에 관한 연구

A Study on Evaluation of Water Supply Capacity with Coordinated Weirs and Multi-reservoir Operating Model

채 선 일* / 김 재 희** / 김 승 권***

Chae, Sunil / Kim, Jaehee / Kim, Sheung-Kown

Abstract

When we evaluate the water supply capacity of a river basin, it is a common practice to gradually increase the water demand and check if the water demands are met. This practice is not only used in the simulation approach, but also in the optimization approach. However, this trial and error approach is a tedious task. Hence, we propose a two-phase method. In the first phase, by assuming that the decision maker has complete information on inflow data, we use a goal programming model that can generate the maximum water supply capacity at one time. In the second phase, we simulate the real-time operation for the critical period by utilizing the water supply capacity given by the goal programming model under the condition that there is no foresight of inflow. We applied the two-phase method to the Geum-River basin, where multi-purpose weirs were newly constructed. By comparing the results of the goal programming model with those of the real-time simulation model we could comprehend and estimate the effect of perfect inflow data on the water supply capacity.

Keywords : water supply capacity, goal programming, real-time simulation, weirs and multi-reservoir operation, inflow uncertainty

요 지

일반적으로 수계의 용수공급능력을 평가하기 위해서는 수요량을 단계적으로 증가시키며 용수부족 여부를 검토하고 그 결과에 따라 수요량을 조정하는 시행착오법을 사용한다. 이것은 시뮬레이션 모형 뿐 아니라 최적화 모형의 경우에서도 마찬가지이다. 그러나 이 같은 시행착오법은 수차례의 최적화를 반복하는 번거로움을 수반한다. 이에 본 연구에서는 물 부족이 발생하지 않은 최대 용수공급능력을 보다 쉽게 찾을 수 있도록 2단계의 목표계획기반 최적화 모형을 제시하였다. 즉, 제 1단계에서는 제시된 모형을 유입량 정보가 정확하다는 가정아래 최대 용수공급능력을 산정한다. 그리고 제 2단계에서는 실제 용수공급 상황에서는 미래 유입량에 대한 정보가 없는 점을 고려하여 최대 갈수기간에 한해 실시간 모의운영을 통하여 용수공급능력을 산정한다. 이 방법을 다기능 보가 신설되어 기존 수문환경과 차이점을 보이는 금강 수계에 적용하고, 완전한 정보가 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 결과를 비교함으로써 유입량 정보가 용수공급능력에 미치는 영향을 이해하고 평가할 수 있었다.

핵심용어 : 용수공급능력, 목표계획법, 실시간 모의운영, 댐-보 연계운영, 유입량 불확실성

* 고려대학교 정보경영공학전문대학원 석사과정 (e-mail: chaesunil@korea.ac.kr)

Graduate Student, Graduate School of Information Management and Security, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

** 전북대학교 경영학부 부교수 (e-mail: jheekim@jbn.ac.kr)

Associate professor, Division of Business Administration, Chonbuk National Univ., Jeonju 561-705, Korea

*** 교신저자, 고려대학교 기술경영전문대학원 교수, 산업경영공학부 겸임교수 (e-mail: kimsk@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Graduate School of Management of Technology, Adjunct Professor of School of Industrial Management Engineering, Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

1. 서 론

국내에서 발생하는 강우의 대부분은 여름철에 집중되고, 지역적 편중 현상이 심한 편이다. 따라서 충분한 양의 물을 댐에 저장한 후, 이를 시·공간적으로 적절히 배분하는 전략적 운영이 매우 중요하다. 특히, 사회경제 발전에 따른 수요 증가로 인해 기존 댐에 대한 효율적 운영, 특히 용수공급능력의 증대에 대한 필요성이 커지고 있다.

용수공급능력이란 저수지나 수계가 일정 기간 동안 공급할 수 있는 용수의 양으로, 이에 대한 평가는 신규 댐 건설 계획과 설계, 기존 댐의 효율적인 운영, 특히 수자원의 장기적인 공급 계획에 필수 불가결하다.

McMahon and Mein (1986)에 의하면 댐 건설 계획단계에서 용수공급을 위한 단일 댐 저수지 유효저수용량을 결정하기 위해 유입량을 분석한 최초의 시도는 Ripple (1883)의 누가곡선분석(Mass Curve Analysis)으로 알려져 있다. 누가곡선분석은 과거의 기록된 유입량을 토대로 댐 지점의 유입량 누가곡선과 일정 형태의 수요량 누가 직선의 최대 편차를 저수지 용량 또는 용수공급능력으로 산정하는 도해적 방법이다. 이후 Waitt (1945)는 기록된 유입량으로부터 지속 기간에 따른 최저 유입량을 추출하는 최저유출기법(Minimum Flow Approach)을 제안하고, 이 유입량을 대상으로 누가곡선분석을 실시하여 저수지의 용량을 결정하였다. Alexander (1962) and Gould (1964)는 기록된 유입량에 대해 각각 다른 확률분포를 가정하여 지속기간에 따른 빈도별 유입량의 누가곡선을 구성하고, 이 곡선에 대해 누가곡선분석을 실시하여 유효저수용량을 결정하는 방법을 제안하였다. 누가곡선분석에 의한 용수공급능력 평가 기법은 댐 건설 이전, 댐에 의해 형성되는 저수지의 유효저수용량을 정하기 위한 설계용 운영 분석이다. 이러한 누가곡선분석은 분석절차가 간단하고 도해적 기법을 통해 결과를 직관적으로 파악할 수 있으나, 수계내 다른 댐과의 연계가 불가능하고 댐 건설 이후 저수지 운영에 따른 평가가 불가능하다는 약점이 있다. 따라서 누가곡선분석과 같은 도해적 기법은 특정 유역에 대한 용수공급량의 대략적인 추정과 그에 따른 댐 용량 설계의 목적으로 활용하는 것이 바람직하다.

누가곡선분석과 같은 도해적 기법의 약점을 보완하기 위하여 저수지 운영 분석(Behavior Analysis)을 통한 용수공급능력 평가 기법이 제시되었다. 저수지 운영 분석을 통한 용수공급능력 평가는 저수지 혹은 저수지가 속한 수계를 하나의 시스템으로 보고 적절한 운영에 따른 최대 용수공급 가능량을 산정하는 방법이다. 이러한 저수지 운영

분석을 통한 용수공급능력 평가를 위해서는 다양한 형태의 시뮬레이션 모형이나 최적화 모형을 활용한다(Loucks et al., 1981; Yeh, 1985; Dandy et al., 1997; Labadie, 2004).

국내에서는 주로 누가곡선분석의 변형된 형태로 저수지의 유효저수용량과 최대 갈수기간 연 유입량의 합으로 용수공급능력을 평가하거나, 저수지 운영 분석을 통한 용수공급능력 평가 기법이 활용되었다. 특히 본 연구에서 다물급강 수계의 경우에도 다양한 기법이 적용되었다. 과거 산업기지개발공사(1981)는 최대 갈수기간에도 용수 공급이 가능한 보장공급량 기준으로 대청댐의 용수공급능력을 평가하였으며, 댐의 유효저수용량에 기록된 유입량 중 최대 갈수기간의 연 평균 유입량을 더하여 용수공급능력으로 간주하였다. 또한 한국수자원공사(1991)는 다목적댐 설계에 최적화 기법을 활용한 연구로서, 용담 다목적댐 타당성조사 과정에서 대청댐과의 연계 운영을 고려하여 댐 건설 비용과 용수공급 및 발전에 의한 편익의 차를 최대화하는 목적함수를 갖는 동적계획모형(Dynamic Programming)을 활용하여 저수지 규모를 평가하기도 하였다.

한편, 저수지 운영 분석을 통한 용수공급능력 평가를 위해서는 미리 정한 이수안전도를 만족하는 범위 내에서 대개는 수요량을 증가시키며 용수부족 여부를 검토하고, 그 결과에 따라 수요량을 조정하는 시행착오법을 사용한다. 이는 시뮬레이션 모형에 의한 분석뿐 아니라 최적화 모형의 경우에서도 마찬가지인데, 이와 같은 시행착오법은 최적화 분석을 반복적으로 수행해야하는 부담을 수반한다. 이에 본 연구에서는 반복적인 절차 대신, 한 번에 최대 용수공급량을 산정할 수 있는 목표계획 기반의 최적화 모형을 제안한다.

아울러, 대부분의 저수지 운영 분석을 통한 용수공급능력 평가 과정에서 과거의 유입량 기록이 미래에도 재현된다는 가정을 하고 있다. 하지만 이때 산정된 용수공급능력은 해당 유입량을 정확히 알고 있을 때나 실현 가능한 점에 주목할 필요가 있다. 따라서 현실적인 용수공급능력을 평가하기 위해서는 저수지 운영에 있어 장래 유입량 정보를 정확히 알 수 없다는 점을 감안해야 한다. 이에 본 연구에서는 정확한 유입량이 알려져 있다는 가정 하의 수계 최적 운영을 통한 용수공급능력 평가 방법과 더불어, 유입량 정보가 없는 상황에서의 산정방법을 추가로 고려하였다. 즉, 정확한 유입량 대신 과거 유입량을 빈도분석하여 중위, 하위 수준의 일 유입량을 예측 유입량으로 가정하여 일별 최적 방류량을 구한 후, 당일의 실제 유입량을 반영시켜 다음 날의 저수량을 구하는 과정을 매일 순차적으로 모의하는, 실시간 모의운영을 포함한 2단계로

구성된 용수공급능력 평가 방법을 제시한다. 이렇게 함으로써 정확한 유입량 정보의 유무가 용수공급능력에 어느 정도 영향을 미치는지 파악하고자 하였다. 이상에서 제시된 방법을 최근 4대강 사업으로 보가 신설되어 수문 환경이 달라진 금강 수계에 적용하여 댐과 보를 연계한 새로운 용수공급능력을 산정해 보았다.

이후의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2절에서는 저수지 운영 분석에 의한 용수공급능력 평가 기법에 대한 기본적인 이론을 요약하고, 3절에서는 본 연구에서 제안하는 용수공급능력 평가 방법에 대해 설명한다. 그리고 4절에서는 제안한 방법을 금강 수계에 적용한 결과를 분석하며, 5절에서는 결론과 추후 연구 과제를 제시한다.

2. 저수지 운영 분석에 의한 용수공급능력 평가 기법

댐의 용수공급능력은 유효저수용량에 최대 갈수기간 동안 유입되는 유입량의 합으로 간주하기도 한다. 하지만 홍수기를 제외한 대부분의 실제 댐 저수위는 상시만수위보다 낮게 운영되므로 실제 용수공급능력은 유효저수용량에 최대 갈수기간 동안의 유입량을 합한 것보다는 적게 된다. 따라서 실제 용수공급능력을 평가하기 위해서는 댐 운영 시점에서의 유효저수용량에서 시작하여 월별 저수지 유입량, 증발량, 강수량, 댐 하류 편익공제수량 및 목적별 계획 용수 수요량, 홍수 시 월류, 방류량 등을 고려하여 수요에 대한 부족량 공급(Deficit Supply)방식에 따른 저수지 운영 분석을 수행하는 것이 적절하다(한국수자원공사, 2009).

용수공급능력 평가를 위해서 다양한 형태의 시뮬레이션 모형과 최적화 모형이 저수지 운영 분석에 사용되어 왔다. 시뮬레이션 모형에 의한 방법은 미리 정해놓은 댐의 운영 규칙과 댐을 포함한 수계 내 다른 시설물들의 물리적 제약을 고려하여 댐의 상태 변화를 모의하는 방법이라고 할 수 있다. 대표적인 시뮬레이션 모형으로 HEC-5, HEC-ResSim, HYDROSIM, MIKEBASIN 등을 꼽을 수 있다(정태성 등, 2007). 이러한 시뮬레이션 모형은 용수공급능력을 평가함에 있어 댐을 포함한 수계 내 다른 시설물들의 상태를 비교적 상세히 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 시뮬레이션 모형은 댐 운영 의사결정자가 정해진 운영 규칙에 따라 기계적으로 저수지 운영을 하는 상황 모사에 지나지 않는다. 이 같은 방식은 댐 운영의 탄력성을 최대한 이용하지 못하므로 실제 용수공급 가능량을 과소평가하는 경향이 있다. 이에 비해 최적화 모형에 의한 방법은 저수지 운영 분석에 최적화 기법을 적용한 것으로 시스템

의 물리적 제약과 댐 운영의 특성이나 목적을 고려하고, 시·공간적으로 분산되어 있는 수요와 댐 운영을 통한 공급의 차이를 최소화하므로 수요에 대한 부족량 공급방식에 보다 충실한, 현실적인 용수공급능력을 평가할 수 있다. 아울러 단일 댐의 운영과 달리 댐 군의 연계운영이 수반되는 경우, 각 댐의 저수상황, 유입량 그리고 각기 다른 목적의 방류량을 고려하여 총 저수지의 저수상황을 기준으로 통합적인 저수지 운영이 필요하다. 이는 수계를 하나의 시스템으로 볼 때 시스템의 각기 다른 요소들을 단독으로 운영한다면 그 효율성이 떨어질뿐만 아니라, 수계 내 상류 댐에서의 방류량이 유역의 지류에서 유입되는 유입량에 더해 하류 댐의 유입량이 되는 상황에서 독립적인 운영이 어렵기 때문이다. 또한, 하류 댐에서의 실시간 저수상황(예를 들면 하류 댐이 저수하한에 이르는 상태)을 고려하여 상류 댐에서 방류량 결정이 되어야한다는 사실은 댐 군의 연계운영이 불가피함을 의미한다. 이러한 연계운영의 효과는 시뮬레이션 모형에 비해 유역 전체를 하나의 시스템으로 간주하여 운영하는 최적화 모형을 활용하는 것이 보다 유리하다. Yeh (1985) and Labadie (2004)에 의하면 저수지 운영 모형에 최적화 기법을 적용한 다양한 연구가 있었는데, 대표적인 최적화 기법으로 네트워크 흐름 최적화 모형, 선형계획 모형, 비선형계획 모형 등을 제시하고 있다.

한편, 일반적으로 저수지 운영 분석에 의한 용수공급능력을 평가하기 위해서는 먼저, 분석기간 중 물 부족이 단 한번도 발생하지 않는 신뢰도 100%의 최대 용수공급능력을 산정한 후, 이를 기준으로 신뢰도를 점차 낮춰가며 용수공급능력을 산정한다. 즉, 신뢰도 100%의 용수공급량을 산정하고 이를 기준으로 분석기간 중 일정 기간 동안 물 부족을 허용하는, 신뢰도의 완화를 통해 용수공급량을 재산정한다. 여기서 기준점이 되는 신뢰도 100%의 용수공급능력을 찾기 위해서는 기본 용수공급량에서 점차 그 양을 늘려가며 물부족을 확인하는 과정을 반복하게 된다. 이와 같은 시행착오법은 수차례의 최적화 분석을 반복하는 번거로움을 수반한다.

아울러, 저수지 운영 분석에 의한 용수공급능력은 댐의 초기 저수 상태와 밀접한 관계가 있다. 이후 댐의 상태는 일정 시점에서의 미래 유입량과 현재 저수량 그리고 운영 규칙을 고려한 방류량에 의해 결정된다. 따라서 용수공급을 위한 저수지 운영 분석은 미래 유입량과 수요량 등의 변화에 따라 현재의 저수위에서 용수수요 충족을 위한 방류를 통하여 차기 저수지 수위를 어떻게 유지하느냐를 결정하는 것이라 할 수 있다. 하지만 이러한 결정은 유입량에 의해 크게 좌우되며, 이 유입량을 미리 알 수 없

다는 사실은 저수지 운영 분석을 통한 용수공급능력 평가의 어려움을 가중시킨다. 저수지 운영 분석에 있어 유입량 정보의 불확실성을 해결하기 위한 수단으로 과거 강우량 자료와 현재 수계의 수문상황을 강우유출 모형에 적용하여 유입량을 추정하는 앙상블 유량 예측(ESP, Ensemble Streamflow Prediction), 그리고 과거 유입량의 확률 분포로부터 시·공간적 상관관계를 유지하는 시계열 자료를 발생시키는 수문자료 모의생성(Synthetic Streamflow Generation)기법 등이 있다(김민규 등, 2007). 저수지 운영 분석에 있어 이러한 앙상블 유입량 자료를 사용하는 것은 다양한 수문 상황을 고려하여 댐 운영 계획을 수립할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 다양한 유입량 자료를 모의 생성시켜 저수지 운영에 고려함으로써 각 유입량 시나리오별로 적합한 저수지 운영 방안을 찾을 수 있다. 그러나 모의 생성한 예측 유입량 자료는 완전한 것이라 할 수 없으며, 모의 유입량 자료가 실제 수문 상황의 모든 특성을 적절히 반영할 수는 없다. 이와 같은 이유로 예측 유입량 자료에 의한 용수공급능력 평가는 통계적 빈도는 감안할 수 있으나, 그 결과를 실제 실현 가능한 공급량으로 간주하는 데는 한계가 있다. 따라서 예측 유입량의 신뢰성을 고려하는 것과는 별개로 실제 저수지 운영 시점에서 예측 유입량과 실제 유입량과의 격차를 해소하여, 현실 수문 상황 변화에 따른 저수지 운영 효과와 댐 운영 계획의 실시간 검·보정을 반영한 실시간 모의 운영이 필요하다.

이에 본 연구에서는 물부족이 발생하지 않은 100% 신뢰도의 용수공급능력을 한 번에 산출할 수 있도록 목표계획 기반의 최적화 모형을 제시한다. 아울러, 실제 저수지 운영에서는 유입량 정보를 정확히 알 수 없다는 현실을 감안하여 실시간 운영 상황을 고려한 용수공급능력 평가 방법을 제안한다.

3. 용수공급능력 평가를 위한 2단계 방법

본 연구에서는 정확한 유입량 정보를 모르는 현실을 감안하여 용수공급능력을 평가할 수 있는 2단계 방법(Two-phase Method)을 제시한다. 이 방법은 유입량 정보가 정확하다는 가정아래 최대 용수공급능력을 도출할 수 있는 목표계획 형태의 모형을 활용하는 단계 1, 그리고 최대 갈수 기간을 대상으로 불확실한 유입량 정보를 가정한 댐-보 최적연계운영 모형(Coordinated Weirs and Multi-reservoir Operating Model, CoWMOM)의 최적 방류계획을 적용하여 실시간 모의운영(Real-time Operation)을 수행하는 단계 2로 구성된다. 다음은 이에 대한 자세한 기술이다.

3.1 단계 1-정확한 유입량 정보 하에서 CoWMOM 기반의 목표계획 모형

본 연구에서는 정확한 유입량 정보가 주어져 있다는 가정 하에서 수계 전체의 용수공급능력을 한 번에 도출할 수 있는 CoWMOM기반의 목표계획 최적화 모형을 수립하였다. 이 모형은 김승권과 박영준(1998)이 제시한 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model)을 기반으로 하여 보를 추가한 연계운영이 가능하도록 최근에 수정된 CoWMOM을 근간으로 하고 있다. CoWMOM을 활용하려면 댐 운영 의사결정자의 운영 목적과 현실적인 수문지형적 제약을 고려하여 가중치 조정을 통해 목적함수의 우선순위 설정을 해야한다(Kim et al., 2011). 본 모형은 CoWMOM에서와 같이 보의 운영을 고려할 수 있도록 댐과 보의 운영과 관련한 다양한 현실 제약을 고려하면서, 용수공급능력 평가의 목적에 부합되도록 목적함수 우선순위를 설정하였다. Table 1은 용수공급능력 평가를 위해 CoWMOM에 적용된 목적함수와 여기에 적용된 가중치를 정리한 것이다.

Table 1. Preemptive Priority Structure of CoWMOM for Evaluation of Water Supply Capacity

Priority No.	Description of Objectives	Penalty Weights
1	Keep the Water Level over the Minimum Storage Level of Reservoirs	10 ²⁰
	Keep the Water Level below the Maximum Normal Water Level and the Flood Control Level	
2	Minimize the Water Shortage	10 ¹⁸
3	Guarantee the Minimum Stream Flow Requirement	10 ¹⁶
4	Maximize the Total Water Supply	-10 ¹⁴
5	Minimize the Spillage from Individual Reservoir	10 ⁸
6	Maximize the Storage of Individual Reservoir	-10 ¹

다음은 본 연구에서 제안하는 CoWMOM기반의 용수 공급능력 평가를 위한 목표계획기반 최적화모형이다. 이 모형에 사용된 상수(Constants), 그리고 결정 변수(Decision Variables)에 대한 정의는 다음과 같다.

■ 상수 정의

- T : 총 계획기간의 수
- TPS : 기간 t 의 집합, $TPS \in \{1, 2, \dots, T\}$
- FLP : 홍수기에 해당하는 기간의 집합
- DRP : 이수기에 해당하는 기간의 집합
- RES : 댐들의 집합
- $WEIR$: 보들의 집합
- CPS : 조절점들의 집합
- DMS : 수요지들의 집합
- HDN_j : j 수요지에 용수공급이 가능한 상위 노드의 집합
- M_1 : 최저운영수위 부족 저수량, 기간별 저수상한수위 (상시만수위/제한수위) 초과 저수량에 대한 벌점
- M_2 : 용수공급 부족량에 대한 벌점
- M_3 : 조절점 유지유량 부족량에 대한 벌점
- M_4 : 용수공급증대를 위한 가중치
- M_5 : 여수로 방류량에 대한 벌점
- $pstr_i$: 저수량 최대화 목적에 대한 가중치로서, 댐 i 의 저수에 대한 상대적 중요도
- $LWLQ_i$: 댐 i 의 저수위 상당 저수량
- $NHWQ_i$: 댐 i 의 홍수위 상당 저수량
- $WLWLQ_i$: 보 i 의 저수위 상당 저수량
- $WNHWQ_i$: 보 i 의 홍수위 상당 저수량
- $RSTR_i$: 댐 i 의 최저운영수위 상당 저수량
- $MWLQ_i^t$: t 시점 댐 i 의 기간별 저수상한수량
- $LMLC_p$: 조절점 p 의 유지유량
- DMD_j^t : t 시점 수요지 j 의 수요량
- SPL_i^{\max} : 댐 i 의 여수로 최대 방류 가능량
- $SPLQ_i$: 댐 i 의 여수로 방류가능 수위 상당 저수량
- SPW_i^{\max} : 보 i 의 고정보 최대 월류 가능량
- $NWLQ_i$: 보 i 의 고정보 월류 가능수위 상당 저수량

■ 결정 변수 정의

- BSR_i^t : t 시점 댐 i 의 최저운영수위 미달 저수량
- OVL_i^t : t 시점 댐 i 의 기간별 저수상한수위 초과 저수량
- DSH_j^t : t 시점 수요지 j 의 용수공급 부족량
- TGC_p^{t-} : t 시점 조절점 p 의 유지유량 부족량
- mf : 수계의 총 수요량에 대한 증가배수
- STR_i^t : t 시점 댐 i 의 저수량

- $WSTR_i^t$: t 시점 보 i 의 저수량
- CIN_p^t : t 시점 조절점 p 에 유입되는 흐름량
- WSP_j^t : t 시점 수요지 j 로의 용수공급량
- $WSP_j^t = \sum_{i \in HDN_j} WSP_{ij}^t$
- SPW_i^t : t 시점 보 i 의 고정보 월류량
- $BV_SPW_i^t$: t 시점 보 i 의 고정보 월류가능 여부를 나타내는 이진정수(Binary) 변수
- SPL_i^t : t 시점 댐 i 의 여수로 방류량
- $BV_SPL_i^t$: t 시점 댐 i 의 여수로 방류가능 여부를 나타내는 이진정수(Binary) 변수

■ 용수공급능력 산정을 위한 목표계획 모형

$$\begin{aligned}
 \text{Min } M_1 & \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i \in RES} BSR_i^t + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in RES} OVL_i^t \right) \\
 & + M_2 \sum_{t=1}^T \sum_{j \in DMS} DSH_j^t + M_3 \sum_{t=1}^T \sum_{p \in CPS} TGC_p^{t-} \\
 & + M_4 mf + M_5 \sum_{t=1}^T \sum_{i \in RES} SPL_i^t \\
 & + pstr_i \sum_{t=1}^T \sum_{i \in RES} STR_i^t \\
 & (M_1 \gg M_2 \gg M_3 \gg M_4 \gg M_5)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Eq. (1)은 최적화 모형의 목적함수에 해당한다. Eq. (1)에서 첫 번째 항은 최저운영수위에 대한 저수 부족량과 제한수위를 초과하는 저수량에 벌점(Penalty)을 곱한 것이고, 두 번째 항은 용수공급 부족량에 벌점을 곱한 것이다. 그리고 세 번째 항은 조절점 유지유량 부족량에 벌점을 곱한 것이다. 여기서 네 번째 항이 중요한데, mf 를 최대화함으로써 Eq. (8)의 우변에 해당하는 총 수요량을 최대화하는 것이다. 여기서 적용된 목적함수의 우선순위 관계는 $M_1 \gg M_2 \gg M_3 \gg M_4 \gg M_5$ 를 따르며, 이러한 선취적 관계를 통해 용수공급 최대치를 한 번에 도출할 수 있다. 즉, M_1 을 가장 크게 부여함으로써 최우선적으로 최저운영수위와 저수상한(비홍수기에는 상시만수위, 홍수기에는 제한수위가 이에 해당)의 범위를 벗어나지 않도록 한다. 그리고 다음으로 큰 M_2 를 부여하여 용수부족 최소화를 추구하도록 한다. 그런 다음, 각 조절점의 유지유량을 준수하고 수요량의 증가배수, mf 를 최대화함으로써 용수공급량을 극대화할 수 있다. 또한 댐에서의 여수로 방류를 줄이기 위해 그 다음 크기의 M_5 을 부여하였다. 이상

의 목적이 만족된 이후에는 남은 물을 가급적 저수하도록 하기 위해 저수량 최대화의 의미를 갖는 마지막 항을 추가한 것이다. 이때 저수량을 확보하는 전략은 향후 저수 용량을 모두 채울 확률이 상대적으로 적을수록 보수적인 관점에서 가급적 많은 물을 저수하는 원칙을 따르도록 하였다. 즉, 직렬로 연결된 댐들의 경우는 댐 하류 총수요가 많은 상류 댐일수록 가급적 많은 저수를 하도록 하였으며, 병렬로 연결된 댐들의 경우는 다음 Eq. (2)의 계산 결과를 활용하였다. 즉, 댐의 저수 용량에 비하여 평균 유입량이 적고 댐 하류의 수요가 많은 댐에 보다 많은 물을 담아두는 수정된 Space Rule (이용대 등, 2006)을 토대로 각 댐별 저수에 대한 상대적 가중치를 설정하였다.

$$\text{저수가중치} \propto \frac{\text{댐의 저수용량}}{\text{평균유입량} - \text{댐하류총수요}} \times 10^1 \quad (2)$$

$$LWLQ_i \leq STR_i^t \leq NHWQ_i \quad (3)$$

for $i \in RES, t \in TPS$

$$WLWLQ_i \leq WSTR_i^t \leq WNHWQ_i \quad (4)$$

for $i \in WEIR, t \in TPS$

$$STR_i^t - RSTR_i + BSR_i^t \geq 0 \quad (5)$$

for $i \in RES, t \in TPS$

$$STR_i^t - MWLQ_i^t - OVL_i^t \leq 0 \quad (6)$$

for $i \in RES, t \in FLP, DRP$

$$CIN_p^t - LMLC_p + TGC_p^t \geq 0 \quad (7)$$

for $p \in CPS, t \in TPS$

$$DSH_j^t + \sum_{i \in HDN_j} WSP_{ij}^t = DMD_j^t mf \quad (8)$$

for $j \in DMS, t \in TPS$

$$SPL_i^t \leq SPL_i^{\max} BV_SPL_i^t \quad (9)$$

for $i \in RES, t \in TPS$

$$BV_SPL_i^t \leq STR_i^t / SPLQ_i \quad (10)$$

for $i \in RES, t \in TPS$

$$SPW_i^t \leq SPW_i^{\max} BV_SPW_i^t \quad (11)$$

for $i \in WEIR, t \in TPS$

$$BV_SPW_i^t \leq WSTR_i^t / NWLQ_i \quad (12)$$

for $i \in WEIR, t \in TPS$

본 모형의 제약조건들은 저수지의 물리적 또는 운영상의 제약을 고려하기 위한 시스템 제약(System Constraint),

그리고 운영의 특성이나 목표를 고려하기 위한 목표제약(Goal Constraint)으로 구분된다. Eq. (3)과 Eq. (4)는 댐과 보의 물리적 특성을 고려한 저수 상/하한 제약식(Physical Constraint)이다. Eq. (5)와 Eq. (6)은 댐의 저수위와 관련된 식으로, Eq. (5)는 가급적 댐의 저수위에 정한 최저운영수위에 미달하지 않도록 하고, Eq. (6)은 비홍수기에는 상시만수위, 홍수기에는 제한수위를 넘지 않도록 하는 목표 제약식이다. Eq. (7)은 주요 조절점으로의 유입량이 사전에 정한 유지유량보다 커야 함을 의미하는 목표제약식이다. Eq. (8)의 우측항은 기본 수요량에 mf 를 곱한 수요량을 의미한다. 그리고 이 식은 공급량을 극대화한 상태에서 공급량과 부족량을 계산하는 역할을 한다. Eq. (9)와 Eq. (10)은 댐의 수위가 여수로 방류가능 수위(Crest Elevation) 이상에서만 여수로 방류가 가능하도록 하는 조건 제약식이다. Eq. (11)과 Eq. (12)는 보의 관리수위 이상에서만 고정보 월류가 발생할 수 있음을 나타내는 조건 제약식이다. 한편, 앞서 언급한 보의 고정보 월류가능 수위 제약 외에 보 운영과 관련한 몇 가지 조건 제약, 즉 어도 방류가능 수위 및 발전 방류가능 수위를 고려한 조건제약식을 추가할 수도 있다. 그러나 용수공급능력 평가의 목적을 고려할 때 이러한 상황까지는 고려하지 않아도 된다. 이는 본 연구의 목적이 용수공급능력의 평가이고, 실제 극한 갈수 시에는 어도방류나 발전방류 조건에 제약받지 않고 가동보 운영을 통해서라도 용수공급을 해야 하고, 또 그것이 물리적으로 가능하기 때문이다.

3.2 단계 2-불확실한 유입량 정보 하에서 용수공급능력 평가를 위한 실시간 모의 운영

앞서 제시한 모형은 유입량 정보를 정확히 알고 있다는 가정 하에서 용수공급능력을 확인하는데 활용할 수 있다. 그러나 실제 상황에서는 유입량에 대한 정확한 정보 없이 저수지 운영을 하는 것이 불가피하다. 이에 본 절에서는 유입량 정보가 없는 현실 운영 상황을 고려한 용수공급능력 평가 방법을 제시한다. 참고로 앞서 3.1절에서 구한 용수공급능력은 지금 구하고자 하는, 유입량 정보를 모르는 상황을 고려한 용수공급능력의 최대치라고 볼 수 있다.

현실 운영 상황을 고려한 용수공급능력을 산정하는 과정은 Fig. 1의 실시간 모의운영을 따른다. 여기서 사용하는 실시간 모의운영은 일반적인 댐 운영 모의 방식과 그 개념이 다르다. 즉, 실시간 모의운영은 운영 계획 후에 해당 기간의 실제 수문상황을 반영하여 다음 기간의 계획을 실시간 검·보정하는 과정을 순차적으로 수행하는 것을 의

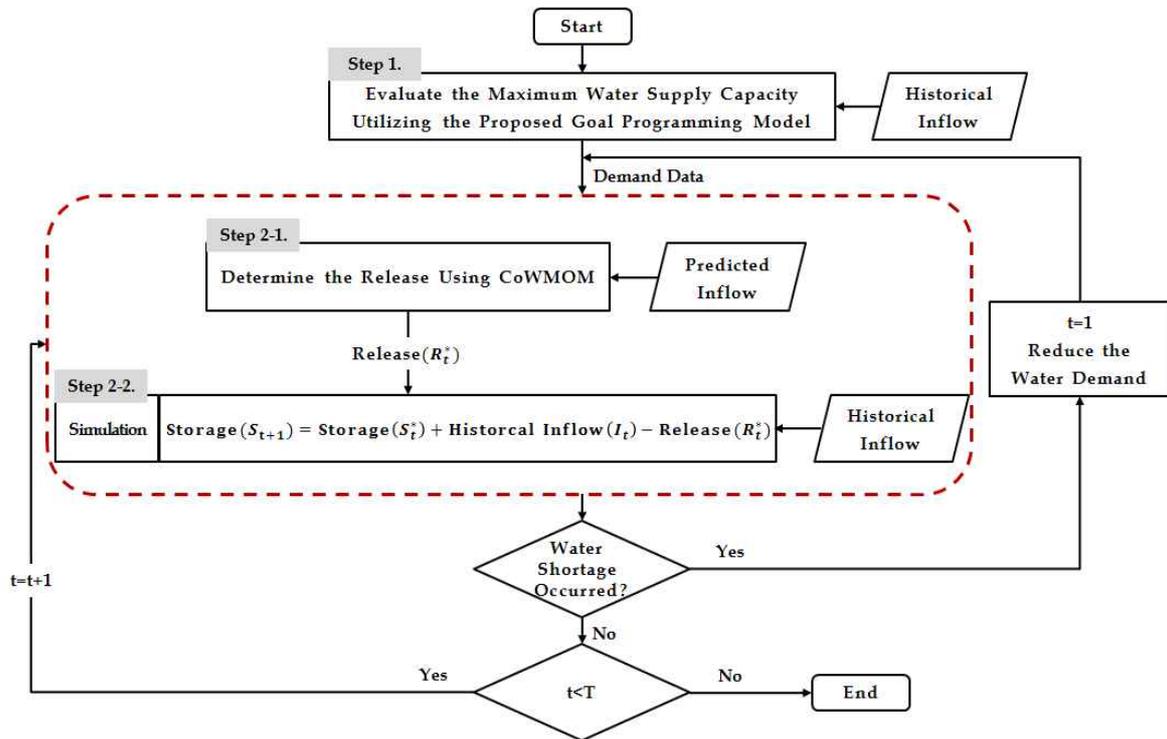


Fig. 1. Simulation Process to Evaluate the Water Supply Capacity with Uncertain Inflow Data

미한다. 본 연구에서 제안하는 실시간 모의운영 과정의 첫 번째 단계에서는 용수공급 가능량의 최대치를 파악한다. 즉, 3.1절의 목표계획모형에 실제 유입량을 적용하여 도출된 용수공급량을 유입량 정보를 모르는 상황에서 얻을 수 있는 용수공급 가능량의 최대치로 보면 된다. 다음 단계에서는 앞서 목표계획모형을 통해 구한 용수공급 가능량을 CoWMOM의 수요량으로 설정하고, 예측 유입량을 적용하여 $(t \sim T)$ 의 분석기간에 대한 일별 최적 방류량을 구한다. 그리고 다음에는 앞서 구한 기간 t 의 최적 방류량과 당일(t)의 실제 유입량을 반영해서 다음 날($t+1$)의 초기 저수량을 구하고, 이를 초기값으로 해서 $(t+1 \sim T)$ 의 분석기간에 대해 CoWMOM을 수행하는 과정을 반복한다. 이 과정에서 물 부족이 발생하면 현재의 수요량을 줄이고 다시 첫 번째 기간부터 모의운영을 시작한다. 여기서 물 부족 시점에서 실시간 모의운영 과정을 멈추는 이유는 신뢰도 100%를 기준으로 용수공급 능력을 평가하였기 때문이다. 이상의 방법은 Step 2-1의 방류량 결정단계에서 예측 유입량을 토대로 방류량을 결정하지만, Step 2-2에서는 실제 유입량을 반영해서 다음 기간의 저수량을 산정하기 때문에, 실시간 운영을 모사한 실제적인 용수공급능력을 산정할 수 있게 한다.

4. 금강 수계에 대한 용수공급능력 평가

4.1 입력자료 구성

제시된 모형의 적용성을 평가하기 위해 금강 수계를 대상으로 하여 용수공급능력 평가를 수행하였다. Fig. 2는 용담댐과 대청댐, 그리고 신설되는 세종보, 공주보, 백제보를 포함한 금강 수계의 네트워크를 도시한 것이다. 모형의 초기 입력 자료로, 댐 제원은 댐 운영 실무편람(한국수자원공사, 2010)의 내용을 따랐고, 보의 제원은 실제 자료를 활용하였다. 그리고 수계의 유입량 자료는 수자원 장기종합계획(국토해양부, 2006)자료에서 1967년 01월~2006년 12월(총 40년)의 순물소모량을 감안한 유역의 일 유입량을 활용하였다. 분석기간은 분석방법에 따라 달라지는데 1) 단계 1의 목표계획기반 최적화 모형의 활용성을 검증하기 위한 분석에서는 유입량 자료에 따라 1967년 01월~2006년 12월의 40년간을 대상으로 하였고, 2) 실제 댐 운영 상황을 모사한 2단계 실시간 모의운영의 분석에서는 40년간의 유입량 자료에서 수문년단위로 극한 갈수기간인 1981년 10월~1982년 9월의 1년간을 대상으로 하였다. 여기서 용수공급 가능량의 최대치를 산정하기 위한 1단계 목표계획기반 최적화 모형의 유입량 자료는 1981년 10월~1982년 9월의 유입량을 사용하였다. 또한, 2단계 실

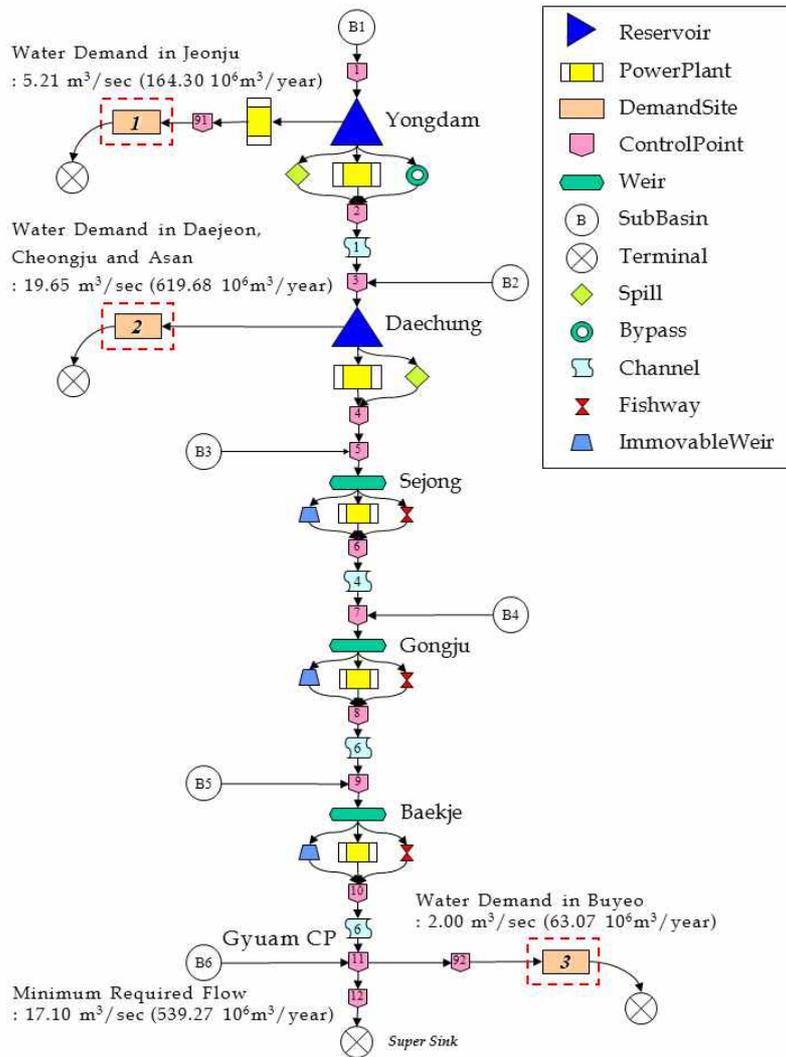


Fig. 2. Network Representation of Geum-River Basin

시간 모의운영에 있어 유입량 정보를 모르는 상황을 가정하기 위한 유입량 자료는 수문년단위로 40년간의 연 유입량을 빈도분석하여 하위 25% 수문년의 일 유입량(1972년 10월~1973년 9월)과 50%의 일 유입량(1971년 10월~1972년 9월)을 사용하였다. 또한 댐의 초기 저수위는 상시 만수위, 보의 초기 저수위는 관리수위로 설정하여 입력자료를 구성하였다. 모형의 금강 수계 기본 공급계획량은 댐 운영 실무편람의 2010년 용수 공급 계약량을 적용하였으며, Table 2의 두 번째 행이 여기에 해당한다.

4.2 목표계획기반 최적화 모형에 의한 용수공급능력 평가 결과

본 모형에서는 신뢰도 100%를 적용한 용수공급능력 평가를 수행하였다. 따라서 용수부족이 발생하기 직전의 용수공급량을 최대 용수공급 가능량으로 보았다. Table 2

의 세 번째 행은 목표계획기반 최적화 모형을 활용하여 유입량을 알고 있다는 가정 하에서 최대 용수공급능력을 산정한 것이다. 여기서 각 수요지의 공급량은 3.1절에서 제시한 목표계획모형에 의해 동일한 비율로 증가시켜, 결국 수계 전체의 용수공급량을 증가시킨 결과이다. 분석기간 1967년 01월~2006년 12월을 대상으로 한 금강 수계의 최대 용수공급능력은 2,078백만 m³/년으로 산정되었다. 이 결과는 용담댐 상류에서 공급하는 전주권역 용수공급량 229백만 m³/년, 대청댐 상류에서 공급하는 대전, 청주, 아산권역 용수공급량 1,126백만 m³/년, 대청댐 하류에서 공급하는 부여권역 114백만 m³/년 그리고 규암 조절점에서의 유지유량 539백만 m³/년을 포함한 수계 총 용수공급량이다. Figs. 3 and 4는 각각 용담댐, 대청댐의 저수위 변화추이를 도시한 것이다.

Table 2. Results of the Evaluation of Water Supply Capacity Using the Goal Programming Model

Study Period: 1967.01~2006.12
Unit: 10⁶m³/year

	Upstream Area of Yongdam Dam (Jeonju)	Upstream Area of Daechung Dam (Daejeon, Cheongju and Asan)	Downstream Area of Daechung Dam (Buyeo)	Minimum Required Flow at Gyuam Control Point	Total
Normal Water Demand	164	620	63	539	1,386
Maximum Water Supply Capacity	299	1,126	114	539	2,078

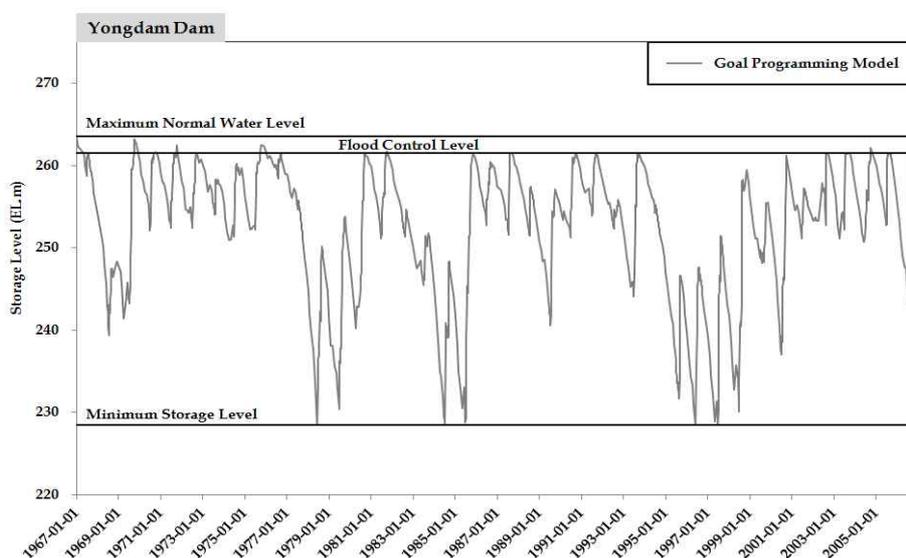


Fig. 3. Variation of Storage Level of Yongdam Dam

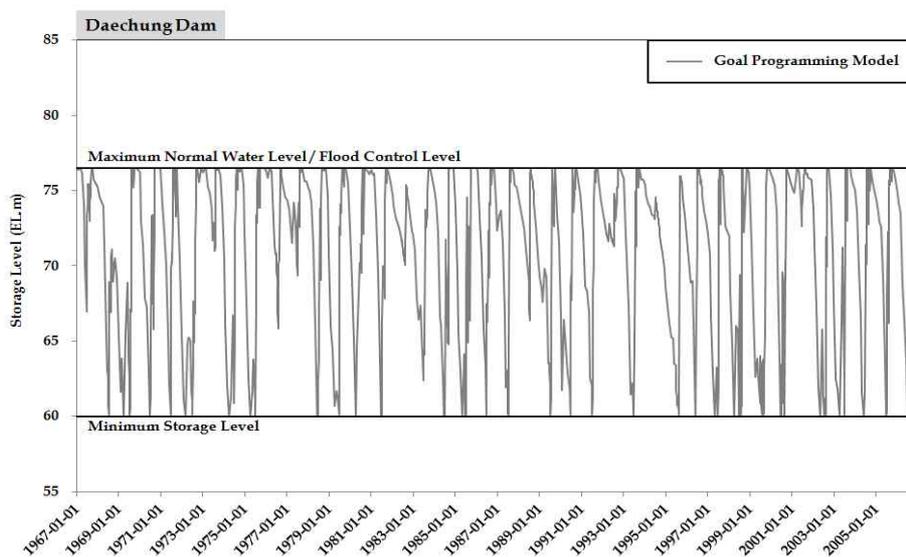


Fig. 4. Variation of Storage Level of Daechung Dam

4.3 실제 댐 운영 상황을 모사한 2단계 실시간 모의운영의 용수공급능력 평가 결과

4.2절의 분석은 1단계 목표계획모형의 활용성을 검증하기 위한 것이었다. 본 절에서는 최대 갈수기간인 1981수문년을 대상으로 2단계 실시간 모의운영을 활용한 분석을 실시하였다. 앞선 분석과는 분석기간이 상이하므로, 1981수문년을 대상으로 최대 용수공급 가능량을 1단계에서 다시 산정하고 이결과를 2단계 실시간 모의운영의 최대치로 활용하였다. 즉, 극한 갈수 상황 아래 단계 1의 목표계획기반 최적화 모형을 통하여 신뢰도 100%의 최대 용수공급능력을 산정한 후, 산정한 용수공급능력 최대치를 토대로 하위 25%, 50% 예측 유입량을 가정하여 Fig. 1의 실시간 모의운영 과정을 통해 용수공급능력을 산정하였다. Table 3은 실시간 모의운영을 통해 불확실한 유입량 정보를 고려할 경우의 용수공급능력 평가 결과를 정리한 것이다. 그 결과 정확한 유입량 정보를 알고 있을 경우 최적화 모형을 통해 산정한 금강 수계의 용수공급능력은 3,064백만 m³/년인 반면, 하위 25% 예측 유입량을 가정할 경우 2,591백만 m³/년 그리고 하위 50% 예측 유입량을 가정할 경우 1,565백만 m³/년으로 나타났다. 이 결과는 유입량 정보를 알고 있을 경우에 비해 각각 473백만 m³/년 (18.7%)과 1,499백만 m³/년(59.4%)이 감소한 것이다.

여기서 주목할 점은 예측 유입량과 실제 유입량의 격차가 클수록 금강 수계의 총 용수공급량의 차이가 크다는 점이다. 즉, 하위 25% 예측 유입량을 가정할 경우가 하위 50% 예측 유입량을 가정할 경우에 비해 더 많은 용수공

급을 할 수 있음을 알 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 3.2절에서 언급하였듯이 불확실한 유입량 정보를 고려할 경우의 실시간 모의운영 절차에서는 먼저, 예측 유입량을 반영한 CoWMOM의 일별 최적 방류량을 결정하고, 실제 유입량을 반영한 모의운영을 진행한다. 따라서 실시간 모의운영의 최종적인 운영 결과는 CoWMOM의 최적 방류계획에 의해 결정된다. 그런데, 실시간 모의운영에 있어서 CoWMOM은 예측유입량이 실제유입량보다 적게 추정되는 경우, 이수 측면에서 보수적 관점의 운영을 위해 용수공급량을 제외한 불필요한 무효방류를 최대한 줄이는 경향을 가진다. 반대로 예측유입량이 실제유입량보다 과다하게 추정되는 경우, 미래 유입량에 대한 낙관적 전망을 토대로 방류량을 늘리는 경향을 보여 물의 낭비를 유발함으로써 향후 물 부족 사태를 야기하는 경향을 보인다. 따라서 Table 3에서 확인할 수 있듯이 용수공급능력 평가에 있어 예측 유입량과 실제 유입량 정보의 격차가 증대됨에 따라 저수지 운영의 비효율성이 증가하고, 그 결과로 용수공급능력 역시 감소한다. 한편, Figs. 5 and 6은 최적화 모형의 운영 결과와 실시간 모의운영 결과에 대한 각 댐별 저수위 변화 추이와 댐 하류 방류량을 도시한 것이다. Fig. 5의 용담댐 저수위 변화 추이를 자세히 살펴보면 전체적으로 유사한 패턴을 보이지만, 더 많은 유입량이 있을 것으로 가정한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해서 용수 수급에 어려움을 겪을 수 있음을 의미한다. 한편, 유입량을 하위 25%와 50%로 가정한 경우, 댐의 수위가 하한까지 떨어지지 않고 다소 높은 수위를 유지하고 있어 용수공급에 여유가 있는 것처럼 보일 수 있지만, 사실은 그

Table 3. Results of the Evaluation of Water Supply Capacity Using the Two-Phase Method for Critical Period

Study Period: 1981.10~1982.09
Unit: 10⁶m³/year

Cases		Inflow Data	Water Supply Capacity	Difference (B-A or C-A)	%
Goal Programming Model	Case A*	2,578 (Historical Data of Water Year 1981)	3,064	-	-
Real-Time Simulation Using CoWMOM	Case B**	4,162 (25 Percentile of Historical Records of 40 Years)	2,591	-473	-18.7
	Case C***	5,785 (50 Percentile of Historical Records of 40 Years)	1,565	-1,499	-59.4

*: Under the assumption that we know the inflow data

** : We used 25 percentile of historical records of 40 years as the inflow prediction

***: We used 50 percentile of historical records of 40 years as the inflow prediction

렇지 않음에 유의할 필요가 있다. 이는 본 연구에서 수요량을 증가시킬 때 각 수요지의 수요를 모두 동일한 비율로 늘렸기 때문으로, 대청댐상류(대전, 청주, 아산권역)와 대청댐하류(부여권역)의 심각한 유량 부족으로 이 수요지에 대해서는 더 이상 수요를 늘리는 것이 불가능한 반면, 용담댐은 상류의 수요를 충족하고도 남을 정도의 저수량을 유지하고 있음을 뜻한다. 아울러 용담댐하류 방류량 패턴에서 하위 50% 예측 유입량 정보를 사용한 저수지 운영 결과의 3월 방류량이 급격하게 증가한 이유는 금강수계의 하류 댐인 대청댐이 저수하한에 이르렀기 때문이다. Fig. 6의 대청댐 저수위 변화추이를 살펴보면 하위

50% 예측 유입량 정보에 의한 저수지 운영결과 즉, 예측 유입량과 실제 유입량과의 격차가 큰 경우의 저수지 운영 결과가 매우 좋지 않음을 알 수 있다. 즉, 대청댐의 하류 방류량 패턴에서 알 수 있듯이 분석기간 초부터 하류 방류량을 늘려 용수공급량을 제외한 불필요한 방류를 하는 것을 확인할 수 있다. 이 같은 결과는 앞서 언급하였듯이 낙관적 유입량 정보를 적용해서 방류계획을 수립할 경우 향후 용수 공급에 어려움이 있음을 의미하고, 반대로 정확한 유입량 정보가 용수공급능력을 크게 제고시킬 수 있음을 뜻한다.

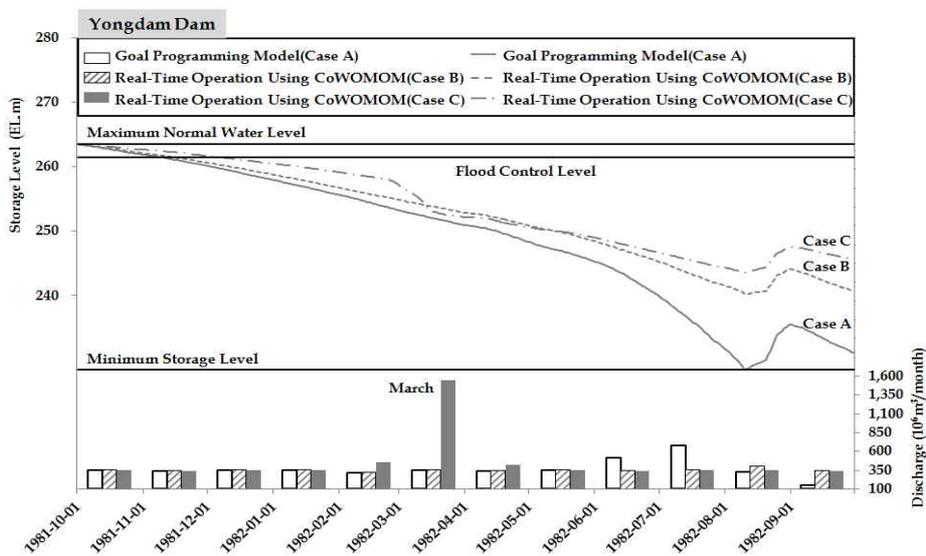


Fig. 5. Variation of Storage Level and Discharge from Yongdam Dam

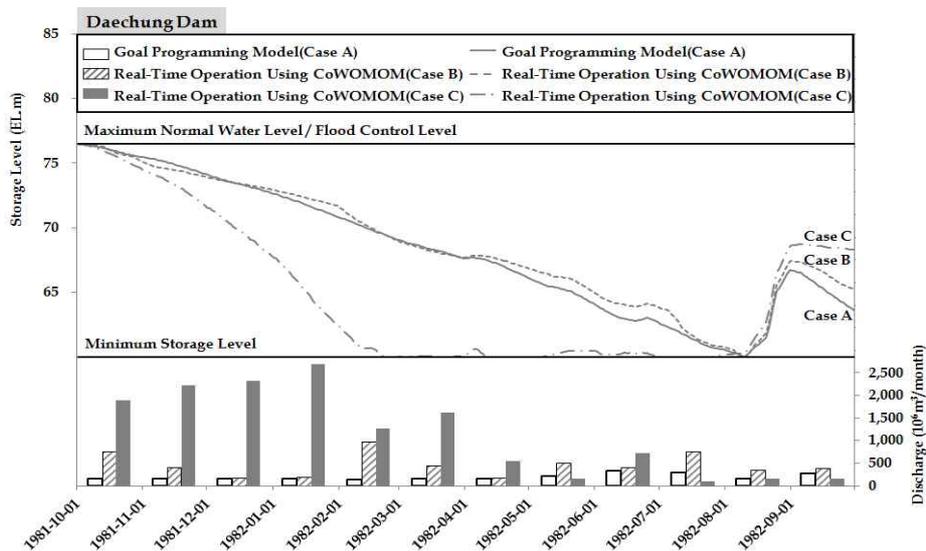


Fig. 6. Variation of Storage Level and Discharge from Daechung Dam

5. 결론

본 연구에서는 댐 군의 용수공급능력을 보다 쉽게 도출할 수 있는 목표계획기반 최적화 모형을 활용한 2단계 방법을 제시하였다. 1단계에서는 정확한 유입량 정보가 있을 경우에 대하여 최대 용수공급능력을 도출할 수 있는 목표계획 기반의 최적화 모형을 활용한다. 이 모형은 수요량을 증가 시키며 용수부족 여부를 확인하는 시행착오법 대신, 한 번에 최대 용수공급량을 산정할 수 있다는 점에서 장점이 있다. 그리고 이렇게 도출한 용수공급능력을 최대치로 활용해서, 유입량 정보를 모르는 상황 하에서 보다 현실적인 용수공급능력을 산정하는 과정을 따른다.

이 방법을 다기능 보가 신설되어 기존 수문환경과 차이점을 보이는 금강 수계에 적용한 결과, 분석기간 1967년 1월~2006년 12월(총 40년)을 대상으로 목표계획기반 최적화 모형을 활용한 용수공급능력은 2,078백만 m^3 /년으로 산정되었다. 또한, 극한 갈수기간인 1981수문년을 대상으로 한 분석에서는 유입량 정보가 정확할 경우의 용수공급능력이 3,064백만 m^3 /년이었던 것에 반해, 하위 25% 예측 유입량으로 가정한 경우 2,591백만 m^3 /년, 그리고 하위 50% 예측 유입량으로 가정한 경우 1,565백만 m^3 /년으로, 정확한 유입량을 사용한 경우에 비해 각각 18.7%와 59.4%가 감소한 것으로 나타나서, 유입량 정보가 용수공급능력 평가에 얼마나 영향을 미치는지 계량적으로 확인할 수 있었다. 결과적으로, 목표계획기반 최적화 모형에 의한 용수공급능력은 신뢰도 100% 용수공급 가능량의 최대치로 활용할 수 있을 것이며, 2단계 실시간 모의운영에 의한 용수공급능력은 1981수문년과 같은 극한 갈수기간에 대한 보다 현실적인 용수공급 가능량으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 유입량 정보를 사전에 알 수 없는 상황을 고려한 제 2단계의 용수공급능력 평가 결과는 어떤 유입량 정보를 활용하느냐에 크게 좌우된다. 따라서 추후 연구를 통해 유입량의 발생 확률을 감안하여 확률적인 의미에서의 용수공급능력을 제시할 수도 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 전북대학교 연구기반 조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

국토해양부 (2006). 수자원장기종합계획.

- 김민규, 이용대, 김승권 (2007). "Fuzzy 목표 계획법을 활용한 저수지 운영 계획 수립 방안 연구." **2007 대한산업공학회 춘계학술대회는문집**, 대한산업공학회, pp. 1053-1060.
- 김승권, 박영준 (1998). "댐군의 최적 연계운영을 위한 혼합정수계획 모형." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 779-793.
- 이용대, 전승목, 김승권, 고익환 (2006). "연계 운영을 위한 병렬 저수지의 저수량 할당 방안." **2006 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 343-348.
- 정태성, 강신욱, 고익환, 황만하 (2007). "금강유역에서의 KModSim을 이용한 의사결정지원시스템 개발 및 적용성검토." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 319-329.
- 산업기지지개발공사 (1981). 대형 다목적댐 공사지.
- 한국수자원공사 (1991). 용담 다목적댐 타당성조사보고서.
- 한국수자원공사 (2009). 한강수계 실시간 저수지 운영시스템 구축(분석모형 개발).
- 한국수자원공사 (2010). 댐 운영 실무 편람.
- Alexander, G.N. (1962). "The use of the Gamma distribution in estimating regulated output from storages." *Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia*, Vol. 4, No. 1, pp. 29-34.
- Dandy, G.C., Connarty, M.C., and Loucks, D.P. (1997). "Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir systems" *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 350-358.
- Gould, B.W. (1964). Discussion of Alexander G.N. "Effect of variability of stream-flow on optimum storage capacity. In: Water Resources Use and Management." *Proceedings of a Symposium Held in Canberra*, Melbourne, pp. 161-164.
- Kim, S.K., Kim, J.H., and Choi, J.Y. (2011). "Real-time Reservoir Operation Simulation for the Han River Basin in Korea." *Proceedings AWWA 2011 Summer Spaciality Conference*, Utah, USA.
- Labadie, J.W. (2004). "Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. (1981). *Water resource systems planning and analysis*.

Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

McMahon, T.A., and Mein, R.G. (1986). *River and Reservoir Yield*. Water Resources Publications, USA.

Rippl, W. (1883). "The capacity of storage reservoirs for water supply." *Proceedings Institution of Civil Engineers*, Vol. 71, pp. 270-278.

Waitt, F.W.F. (1945). "Studies of droughts in the Sydney catchment areas." *Journal of The Institution of Engineers*,

Australia, Vol. 17, No. 4-5, pp. 90-97.

Yeh, W.W.G. (1985). "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.

논문번호: 12-048	접수: 2012.05.03
수정일자: 2012.05.31	심사완료: 2012.05.31