

댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형

A Mathematical Model for Coordinated Multiple Reservoir Operation

김 승 권* / 박 영 준**

Kim, Sheung-Kown / Park, Young Joon

Abstract

In this study, for the purpose of water supply planning, we propose a sophisticated multi-period mixed integer programming model that can coordinate the behavior of multi-reservoir operation, minimizing unnecessary spill. It can simulate the system with operating rules which are self-generated by the optimization engine in the algorithm. It is an optimization model in structure, but it indeed simulates the coordinating behavior of multi-reservoir operation. It minimizes the water shortfalls in demand requirements, maintaining flood reserve volume, minimizing unnecessary spill, maximizing hydropower generation release, keeping water storage levels high for efficient hydroelectric turbine operation.

This optimization model is a large scale mixed integer programming problem that consists of 3,920 integer variables and 68,658 by 132,384 node-arc incidence matrix for 28 years of data. In order to handle the enormous amount of data generated by a big mathematical model, the utilization of DBMS (data base management system) seems to be inevitable. It has been tested with the Han River multi-reservoir system in Korea, which consists of 2 large multipurpose dams and 3 hydroelectric dams. We demonstrated successfully that there is a good chance of saving substantial amount of water should it be put to use in real time with a good inflow forecasting system.

Keywords: water supply planning, multi-period mixed integer programming model, multiple reservoir operation, minimum cost network flow model, water conservation

요 지

본 연구에서는 용수공급을 위한 이수관점에서 수력발전의 경제적 운영과 더불어 용수수요에 효과적으로 대처할 수 있는 댐군의 경제적 연계운영 최적화 모형을 제안한다. 제안된 모형은 댐군의 연계운영을 통한 발전방류의 최대화, 용수 수요량에 대한 물부족량(shortfall)의 최소화, 불필요한 여수로 방류량의 최소화, 홍수기를 대비한 저수지의 여유공간 확보, 그리고 발전효율을 높일 수 있는 저수위의 확보 등을 고려하였다. 제안된 최적화 모형은 구조적으로는 최적화 모형이지만, 실질적으로는 댐군의 연계운영의 행태를 표현한 시뮬레이션 모형이라 할 수 있으며, 용수공급계획 수립시 최대 용수공급 가용량 산정에 활용하기 위해서 개발된 모형이다. 최적화 모형은 약 3,920개의 혼합정수변수와 약 7만×13만 Node-Arc Incidence Matrix로 표현되는 네트워크 모형을 포함하는 여러 기간에 걸친 혼합정수계획 문제 (multi-period mixed integer programming)로 설계되었으며, 대형문제로부터 야기되는 수많은 자료를 효과적으로 처리하기 위하여 DBMS를 활용하였다.

본 모형의 효과를 검토하기 위하여 한강수계에 위치한 댐들 중에서 2개의 다목적 댐과 3개의 발전용 댐들의 연계운영에 실험하여 보았다. 실험결과, 본 연구에서 수립된 모형의 현실적인 이용을 위한 수정 보완과, 효과적인 댐 유역별 중장기 유입량 예측시스템이 개발되어 실시간으로 운영될 수 있도록 수정, 보완된다면 현재의 운영방법보다 더 좋은 운영방안을 제시하므로써, 환경보존에 따른 이득은 물론 용수공급 능력을 증대시킬 수 있는 대안이 될 수 있다.

핵심용어 : 용수공급계획, 다기간 혼합정수계획모형, 댐군의 연계운영, 네트워크 모형

* 고려대학교 공과대학 산업공학과 교수

Prof., Dept. of Industrial Engrg., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea / e-mail: kimsk@syslab.korea.ac.kr

** 고려대학교 정보통신기술공동연구소 연구원

Researcher, Research Inst. for Information and Communication Technology, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

1. 서 론

수자원의 효율적 이용 및 관리를 위하여 댐에 저수된 물을 효과적으로 이용한다는 것은 시스템의 관점에서 보면 확보된 수자원을 댐 건설의 목적에 따라 시간 및 공간별로 적절하게 할당시키는 것이라고 할 수 있다. 댐은 대개 용수공급(관개용수, 생활용수, 공업용수 등), 수력발전, 주운, 수질보전, 생태계보전, 오락 및 휴식공간의 확보, 그리고 홍수조절 등 대체로 한가지 이상의 목적을 달성하기 위하여 운영되며, 그 운영방법은 크게 두 가지 운영방안으로 대별된다. 하나는, 이수관점에서의 용수공급을 위한 운영이고, 다른 하나는 치수관점에서 홍수조절을 위한 운영방법이다(김승권, 1988). 용수공급을 위한 운영은 우기에 저수지의 유효저수 공간을 최대한 활용하여 수자원을 확보하도록 운영하는 것이며, 홍수조절을 위한 운영은 홍수기간 중에 댐의 안전관리 및 홍수조절을 위하여 운영하는 것이다. 두 가지 운영방법은 서로 상치되는 목적으로 운영될 뿐만 아니라 댐 운영 방법에 있어서도 커다란 차이가 있다. 본 연구에서는 이수관점에서 용수공급을 위하여 효과적으로 댐군을 연계하여 운영할 수 있는 방안을 모색해 보기 위한 혼합정수계획 모형을 제시한다.

일반적으로 이수관점에서의 최적 연계운영 방안을 위한 연구에는 Network Flow Optimization, Linear Programming, Dynamic Programming, 그리고 Nonlinear Mathematical Programming 등의 기법들이 다양하게 적용되고 있다.

Network Flow 알고리즘은 댐군의 공간적 위치를 고려한 운영행태를 표현하는데 적절하다. 그러나 수력발전을 고려할 경우 수위 유량으로 표현되는 발전량에 대한 함수가 비선형이기 때문에 순수한 네트워크 모형만으로는 수력발전의 운영양태, 여수로방류 상황 등 실제 댐의 운영상황을 정확히 표현하는 데는 다소 무리가 따른다. Dynamic Programming은 수학적 모형으로 실제 비선형의 특성을 표현하는데 용이하며, 댐군의 최적연계운영을 위한 다양한 해법절차를 제공해 준다. 그러나 분석대상 댐의 수가 통상 4개 이상 되면 "Curse of Dimensionality" 문제가 심각하여 효과적인 해의 도출이 어렵다. 이러한 DP의 단점을 보완하는 방법으로서 증분 동적계획법의 단계별 반복적인 적용에 의한 방법(최인석, 1987)이나 가상적인 통합 저수지를 활용하여 우회해 나가는 방법이 있다. Nonlinear Programming 기술의 활용은 매우 정확한 모델을 수

립할 수는 있으나, 현실적인 실제 모형에서 Global Optimum의 도출이 쉽지 않고, 일반적으로 계산량이 많아서, 댐의 개수가 많은 큰 시스템에서는 적용하기가 용이하지 않다. 현실적으로 사블레이션을 포함한 어떤 수학적 모형도 실제 상황을 완전하게 표현할 수 있는 모형은 없다고 보아도 무방하다. 그럼에도 불구하고 수많은 입출력 자료를 처리하여 의미있는 결론을 도출하기 위해서는 어떤 형태로든 대상 시스템을 표현할 수 있는 모형을 활용하지 않을 방도는 없다.

최근 수자원 분야에서 네트워크 모형을 활용한 연구들이 다양하게 시도되고 있다. 이는 네트워크 모형이 수문학적 행태(hydrologic behavior)를 표현하기가 용이하고 그 모형의 구조가 단순하여 일반적인 LP모형에 비하여 빠른 시간내에 해를 구할 수 있는 특성이 있기 때문이다. Martin(1981)은 27개의 TVA 댐군의 월간 수력발전 운영을 위해 Generalized Network Flow 알고리즘을 반복 적용할 것을 제안하였으며, Kuczera(1989)는 3개의 댐과 2개의 용수 수요지를 갖는 수계에서 수요에 대한 공급부족을 고려하면서 324기간에 대한 장기적인 수자원 공급모형을 Network Flow Optimization 모형으로 설계하여 LP보다 100배정도 빠른 최적 운영방안을 도출하였다. Chung 등(1989)은 Central Valley Project와 State Water Project의 모의실험 모형에 Network Flow Programming을 사용하였다. 한편, 연계운영 양태를 표현하는데 있어서 순수한 네트워크 모형만으로는 부족함이 있다. Sun 등(1995)은 여러 기간에 걸친 다목적 용수공급 문제에서 Network-type 제약식에 Non-network 형태의 제약식이 추가된 모형의 경우에 Network 특성을 이용한 Generalized Network 알고리즘을 사용하게 되면 LP code 보다 11내지 117배 빠른 수행속도로 해를 찾을 수 있음을 보였고, Niedda와 Sechi(1996)은 수자원 시스템의 최적 설계와 관리에 대한 문제에서 Global Optimum에 가까운 해를 구하기 위해 Network Linear Programming으로 부분문제를 형성하고 Subgradient Method를 이용하였다. Khaliqzaman과 Chander(1997)는 댐군의 설계에 있어서 댐의 규모를 결정하기 위하여 Network Flow Programming 모형을 제안하였다.

한편, Can과 Houck(1984) 및 Mohan과 Keskar(1991)은 각각 다목적댐 운영 방안 도출을 위해 Goal programming을 적용하였다. Can과 Houck(1984) 등은 Green River Basin에 대하여 4개의 다목적 댐군

의 실시간, 일간 운영을 위한 모의 실험의 엔진으로 Preemptive Goal programming 모형을 수립하고 기존의 LP 모형인 Green River Basin Optimization Model (GRBOOM)과의 비교를 통해 대상 수계에서 Goal programming 기법의 유효성을 보였다. 그리고 Mohan과 Keskar(1991)는 단일댐에 대하여 관개와 수력발전 생산이라는 두가지의 목적을 달성하는 수학적 모형을 수립하여 다목적댐 운영에 있어 목표저수량 보다는 목표방류량을 기준으로 운영하는 것이 바람직하다는 결론을 내렸다. 본 연구를 수행한 후에 뒤늦게 밝혀진 사실이지만, Randall 등(1997)은 California San Francisco Bay의 남동부에 위치한 Alameda County Water District에서 도시용수 공급을 위한 상수원, 지하수원, 펌핑 및 수처리 시설등을 포함한 상수공급 시스템의 실제 운영 양태를 모사하기 위하여 목적함수의 계수를 조정하는 방식을 택함으로써 혼합정수계획법을 엔진으로 활용하였다. 이 연구는 적용 대상시스템 및 목적이 본 연구와는 다르지만 본 연구처럼 목적함수 계수의 조정을 통하여 수학적 모형을 엔진으로 활용하였다는 점은 같다고 할 수 있다. Tejada Guibert 등(1993, 1995)은 여러기간에 걸친 다목적 댐군의 용수 공급 문제에 대하여 Stochastic Dynamic Programming(SDP)을 적용하였다. 이들 연구 외에도 댐 운영에 관련된 여러 연구들이 있다(Wurbs, 1993; Yeh, 1985).

본 연구는 댐군의 연계운영을 위한 여타 연구와는 달리 목적함수를 설정함에 있어서 경제성분석을 계산 목적으로 활용하지 않고, 댐군의 연계운영 모사를 위한 "엔진(engine)"으로 활용하고 여수로 방류량의 계산을 혼합정수 계획법의 혼합정수로 표현하고 있으며, 경제성 분석은 사후계산으로 다루고 있다는 점을 특징으로 하고 있다.

댐 운영을 위한 실제 상황은 이론적인 모델이 추구하는 단일 목적에 의한 최적화와는 달리 다목적적이므로 최적운영이라기 보다는 여러 상충되는 목적 및 구성 요소들 간의 타협, 조정을 위한 다목적 운영이 타당하다. 따라서 다중목적의 최적해를 위해서는 궁극적으로 다목적 계획법(multiobjective programming)을 활용하여야 할 것이다(Ko, 1989). 그러나 댐 운영의 현실과 계산의 용이성을 감안하여 본 연구에서는 통상적인 최적화모형이 추구하는 경제성에 기반을 둔 목적함수 대신 댐들간의 현실적인 연계운영의 모사를 목표로 목적함수를 구성하여 혼합정수계획모형을 수립하였

다.

2. 연계운영을 위한 수학적 모형 수립

저수지 운영이란 저수된 물을 방류시점마다 유입량과 당시의 저수량을 감안하여 댐 운영의 목표에 도달하기 위하여 최적량의 물을 방류시키는 것이다. 댐 운영을 위한 목표에는 용수공급(관개용수, 생활용수, 공업용수 등), 수력발전, 주운, 수질보전, 생태계보전, 오락 및 휴식공간의 확보, 그리고 홍수조절 등이 있으며, 이러한 여러 가치를 모두 고려하여 운영할 수 있는 효과적인 방법을 찾기란 그리 쉽지 않다. 특히 치수관점에서 홍수조절을 위한 운영은 재해예방의 차원에서 분초를 다투는 긴급한 상황의 운영이고, 이수관점에서의 용수공급목적을 위한 운영은 이보다는 시간적인 여유가 있는 의사결정 문제라 할 수 있다. 기본적으로 저수지군의 최적운영은 다양한 요소에 영향을 받는다. 그 중에서 가장 중요한 요소는 현재의 저수량과 미래의 유입량이다. 용수공급을 위한 댐군의 최적연계운영이라는 것은 유입량과 수요량 등의 변화에 따라 현재의 저수위에서 방류를 통하여 차기 저수지 수위를 어떻게 유지하느냐를 결정하는 것이라 할 수 있다. 그러나 저수지 방류량을 결정해야 할 시점에서 미래의 상황에 대한 불확실성이 상존하므로 장래의 유입량을 정확히 추정할 수 없다는 점이 저수지 방류량을 자신있게 정하지 못하는 이유가 된다. 또한 미래의 유입량을 확실하게 추정할 수 있다고 가정하더라도 현 상황에서 최적 방류량을 결정하는 문제는 같은 수계내의 댐들간의 저수상황에 따라서 각기 달리 방류를 하고 저수량을 최적 할당해야 하는 또 다른 의사결정 문제로 남는다. 즉, 위에서 언급한 문제 중에서 첫 번째 문제는 불확실성의 문제이므로 쉽게 극복될 수는 없을 것이다. 그러나 두 번째 문제는 수학적 최적화 모형을 통하여 극복될 수 있다고 생각한다.

본 모형에서는 다음의 네가지 요소를 함께 고려한다. 즉, 용수공급 부족량의 최소화, 저수량의 최대화, 발전 방류의 최대화, 그리고 여수로 방류량의 최소화 등이다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존의 여러 연구들이 시도하였던 경제성에 기반을 둔 단일 목적함수 수립을 지양하고 현실에 가까운 운영을 모사하기 위하여 각각의 주요 목적에 적당한 벌점(penalty) 또는 가중치(weight)를 부여하여 서로 상충되는 목적들간의 타협을 이룰 수 있는 다 목적함수로 구성하였다. 따라서 분석하고자 하는 상황에 맞도록 각 목적들에 대해 적당

한 가중치를 부여함으로써 비록 다중목적의 관점에서 볼 때 다중목적 최적해(non-inferior solution frontier)를 보장할 수는 없지만, 현재의 운영방안 보다 나은 방안이 도출되도록 하였다. 예를 들어서, 여수로 방류량을 최소화하여 댐으로 유입되는 유량의 적절한 확보를 가장 큰 목적으로 할 경우에는 여수로방류량에 대한 벌점(penalty)을 크게 부여하여 달성할 수 있으며, 발전방류를 통한 발전이득을 중점적으로 분석할 경우에는 발전방류량에 보다 큰 가중치를 부여하여 모형을 구성한다. 그리고 경제성 효과분석이 필요할 경우에는 모형을 통한 물량의 최적 할당량을 단위량당 경제

적인 가치를 이용하여 사후에 분석하면 된다. 즉, 수력 발전 에너지의 양과 경제성 평가는 사후 분석으로 미룬다.

본 연구에서 제시한 수학적 모형은 전체적으로는 네트워크 모형을 근간으로 하며, 그 위에 몇가지 제약식을 추가하여 혼합정수모형으로 구성하였다. 또한 본 모형에서는 각 댐의 유입량과 수요량은 미리 알고 있다고 가정한다. 제시한 수학적 모형중에서 네트워크 모형 부분을 그림으로 나타내보면 Fig. 1과 같다. Node S에서 각 댐으로의 유입 Arc가 발생하며, 각 댐에서는 발전방류 Arc를 통해 발전방류량이 발생하고, 유입량

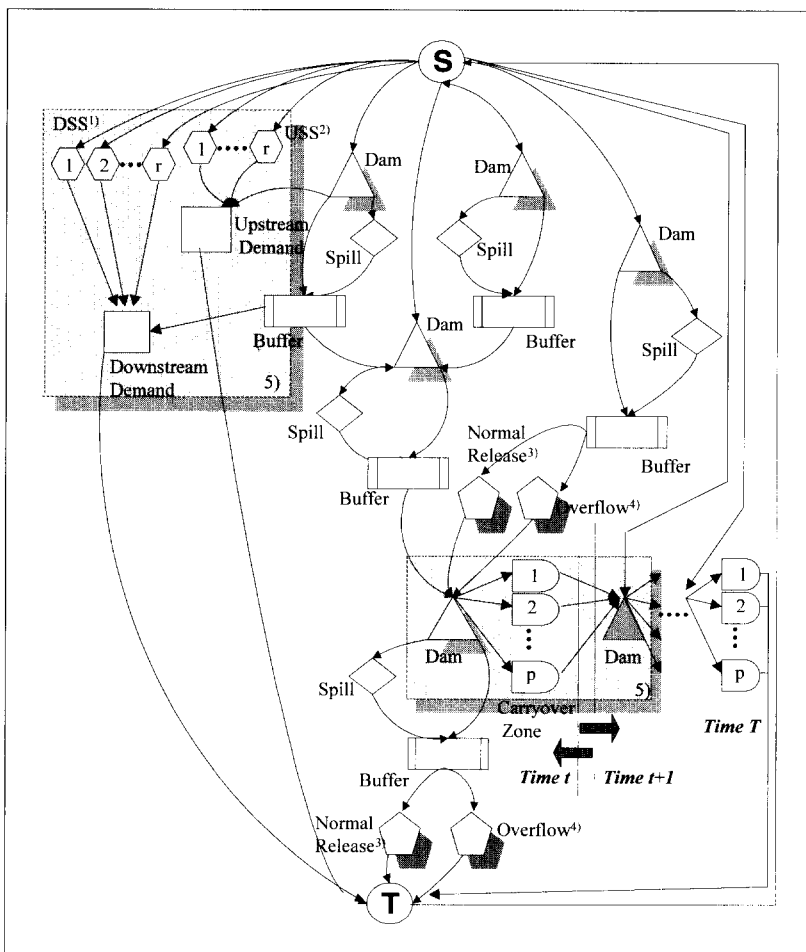


Fig. 1. 전체 네트워크의 개략 표현

- 1) DSS : Downstream Shortfall Segment, 2) USS : Upstream Shortfall Segment, 3) Normal Flow at Control Point, 4) Overflow at Control Point, 5) This Configuration repeats on Every Dam

이 댐의 최대저수량을 초과할 경우 Spill Arc를 통해 여수로방류량이 발생하며, 기말 저수량은 Carryover Arc를 통해 다음기간의 댐 Node로 흐르게 된다. 상류 지역 수요량은 댐 Node에서 상류 수요지 Node로 바로 공급하고, 하류 지역 수요량은 댐 Node에서 일단 발전방류를 시켜 버퍼(buffer) Node로 흘린 뒤 버퍼 Node에서 하류 수요지 Node로 흐르게 한다. 이때 버퍼 Node는 댐 하류의 수위를 상류로부터 흘린 물(방류목적에 관계없이)로부터 충당하기 위한 가상저수지의 역할을 한다. 만일 각 수요지의 수요량에 대해서 공급할 수 있는 양이 적을 경우에는 상당한 비용을 감수하고 고저라도 공급부족량이 발생하며 이는 Node S에서 각 수요지(상, 하류) Node로 가상의 유량을 발생시키므로써 유량 보전법칙을 만족시킨다. 각 Arc는 Fig. 2와 같이 (하한값, 상한값, 비용)이 존재한다.

한편, 용수부족의 단위 유량당 비용이 모든 유량의 수준에서 동일하게 된다면 임의의 기간에서 발생되는 수요지 별 용수부족량은 Simplex 알고리즘의 특성상 용수부족 벌점(shortfall penalty)이 가장 큰 수요지의 수요량을 우선적으로 최대한 충족시키게 된다. 이는 최적해의 현실성을 저해시키는 직접적인 원인중의 하나이다. 그러므로 이러한 수학적 해법의 단순성을 최대한

극복하고, 용수부족 발생 양상이 현실적으로 나타나도록 용수부족 Arc는 Multiple Arc와 Piecewise Linearized Cost Function을 사용한다(Khaliquzzaman 와 Chander, 1996; Kuczera, 1989; Sigvaldason, 1976). Fig. 3의 (a)는 r개의 구간으로 이루어진 비용 함수를 나타내고 있으며, (b)는 네트워크로 나타낼 경우 각 Arc의 하한, 상한 및 비용을 나타내고 있다. (a)에서 비용함수는 단조 증가함수로 표현되고 있다. 이는 최하위 구간(1번째 구간)의 양부터 공급부족이 발생하여 점차 상위 구간으로 공급부족량이 발생하도록 하기 위함이다. (b)에서 D는 수요량, h_1, h_2, \dots, h_r 등은 각 구간에서의 수요량에 대한 비율, 그리고 s_1, s_2, \dots, s_r 등은 각 구간에서의 용수부족에 대한 단위 비용을 의미한다. 이때 구간 k의 용수부족 Arc 하한은 0을 갖게 되며 상한은 $(h_k D - h_{k-1} D)$ 이 되며 비용은 s_k 가 된다. 따라서 Fig. 3과 같은 형태의 네트워크로 공급부족량을 구성하게 되었을 때 총 공급부족량은 각 구간 Arc에 할당된 값의 합이 된다. 즉,

SH_j : 댐 j의 수요량에 대한 총 공급부족량

SH_{jk} : 댐 j의 수요량에 대한 k번째 구간의 공급부족량이라 한다면

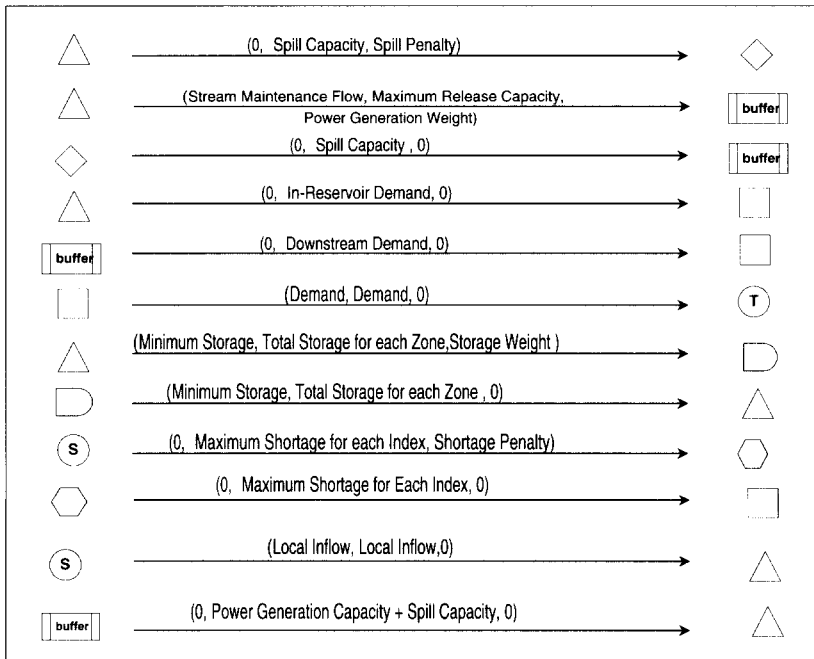


Fig. 2. Arc 구성도(lb, ub, coeff.)

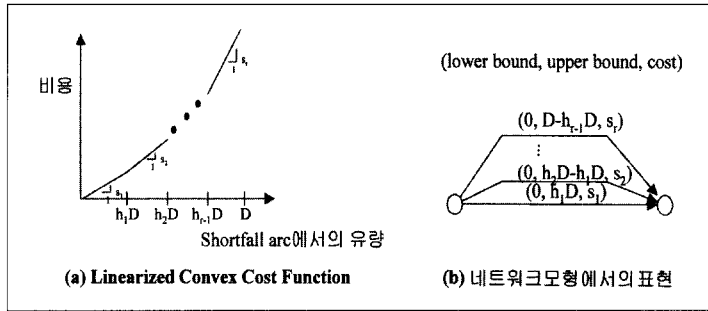


Fig. 3. 용수부족 Arc

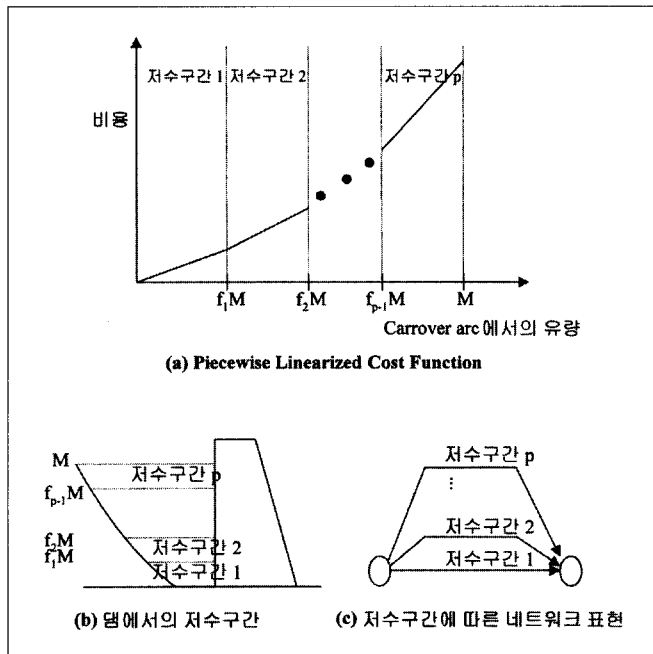


Fig. 4. Carryover Arc

$$SH_j = \sum_{k=1}^r SH_{jk}$$

이 성립한다.

또한 기말 저수량을 나타내는 Carryover Arc도 용수부족 Arc와 마찬가지로 Multiple Arc와 Piecewise Linearized Cost Function을 사용하여 각 댐의 저수량을 적당히 분배하여 극단적인 저수형태를 방지할 수 있도록 한다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 댐의 최대 저수용량(상시만수량)을 몇 개의 저수구간으로 분할하고 각각의 구간에 대해 비용을 단조 증가시켜서 Piecewise Convex Cost Function을 구성한다. 네트

워크 모형으로 표현할 때에는 몇 개의 Arc군들로 구성되어 나타낸다. Fig. 4의 (b)에서 각 저수구간 Arc는 용수부족 Arc와 거의 동일한 방법으로 하한, 상한, 그리고 비용값이 할당된다. 다만 댐의 최저 저수량(lower water level)을 고려하기 위하여 첫 번째 저수구간의 하한은 최저저수량으로 할당하고, 나머지 구간에서는 하한을 0으로 할당한다. 따라서 Fig. 4와 같은 형태의 네트워크로 저수량을 구성하게 되었을 때 총 저수량은 각 저수구간 Arc에 할당된 값의 합이 된다. 즉,

S_j : 댐 j 의 저수량(carryover)

S_{jk} : 댐 j 의 수요량에 대한 k 번째 저수구간의

저수량(carryover)이라 한다면

$$S_j = \sum_{k=1}^T S_{jk}$$

이 된다.

본 모형을 수학적으로 표현하기 위하여 다음과 같이 상수(Constants)와 변수(Variables)를 정의한다.

◆ 상수 정의

T : 총 계획기간

RES : 수계내 댐들의 집합, $RES \in \{1, 2, \dots, J\}$

A_j : 수요지 j 의 공급부족 구간 개수

B_j : 댐 j 의 저수구간 개수

U_j : 댐 j 의 상류댐들의 집합

Dup_j^t : 기간 t 에서 댐 j 의 상류 수요량

Ddn_j^t : 기간 t 에서 댐 j 의 하류 수요량

$SHup_{jk}^{ub}$: 댐 j 의 상류 수요량에 대한 k 번째 공급 부족 arc의 상한으로서,

$$\sum_{k=1}^{A_j} SHup_{jk}^{ub} = \text{Max}_t \{Dup_j^t\}$$

$SHdn_{jk}^{ub}$: 댐 j 의 하류 수요량에 대한 k 번째 공급 부족 arc의 상한으로서,

$$\sum_{k=1}^{A_j} SHdn_{jk}^{ub} = \text{Max}_t \{Ddn_j^t\}$$

S_j^{\min} : 댐 j 에서의 최소 저수량(LWL의 저수량)

S_j^{\max} : 댐 j 에서의 최대 저수량(상시만수량)으로서,

$$S_j^{\max} = \sum_{k=1}^{B_j} S_{jk}^{ub} + S_j^{\min}$$

S_{jk}^{ub} : 댐 j 에서의 저수구간 k 의 상한

S_{jk}^{lb} : 댐 j 에서의 저수구간 k 의 하한으로서, 첫 번째 저수구간($k=1$)에서는 $S_{jk}^{lb} = S_j^{\min}$ 이 되며, 나머지 구간($k \neq 1$)에서는 $S_{jk}^{lb} = 0$ 이 된다.

I_j^t : 기간 t 에서 댐 j 의 유입량

R_j^{\min} : 댐 j 에서의 최소 방류량(하천유지용수량)

R_j^{\max} : 댐 j 에서의 penstock을 통한 최대 발전방류 가능량(최대사용수량)

PW_{\min} : 연간 목표 발전방류량

p_{sp}^j : 댐 j 의 여수로방류 Penalty Coefficient

p_r^j : 댐 j 의 발전방류 Penalty Coefficient

$p_{up,k}^j$: 댐 j 의 상류 수요량에 대한 각 구간 k 에서의 공급부족 Penalty Coefficient

$p_{dn,k}^j$: 댐 j 의 하류 수요량에 대한 각 구간 k 에서의 공급부족 Penalty Coefficient

$p_{c,k}^j$: 댐 j 의 각 저수구간 k 에서의 저수량 Penalty Coefficient

◆ 변수정의

R_j^t : 기간 t 에서 댐 j 에서의 발전 방류량

SP_j^t : 기간 t 에서 댐 j 에서의 여수로방류량

Zub_j^t : 기간 t 에서 댐 j 에서의 상류 공급량

Zdn_j^t : 기간 t 에서 댐 j 에서의 하류 공급량

$SHup_{jk}^t$: 기간 t 에서 댐 j 의 상류 수요량에 대한 k 번째 구간에서 공급부족량

$SHup_j^t$: 기간 t 에서 댐 j 의 상류 수요량에 대한 공급부족량으로서,

$$SHup_j^t = \sum_{k=1}^{A_j} SHup_{jk}^t$$

$SHdn_{jk}^t$: 기간 t 에서 댐 j 의 하류 수요량에 대한 k 번째 구간에서 공급부족량

$SHdn_j^t$: 기간 t 에서 댐 j 의 하류 수요량에 대한 공급부족량

$$SHdn_j^t = \sum_{k=1}^{A_j} SHdn_{jk}^t$$

S_{jk}^t : 기간 t 에서 댐 j 의 k 번째 저수구간 저수량

S_j^t : 기간 t 에서 댐 j 의 말기 저수량으로서,

$$S_j^t = \sum_{k=1}^{B_j} S_{jk}^t$$

$Y_i^t = \begin{cases} 1 & \text{기간 } t \text{에서 댐 } j \text{에서 여수로방류가 발생} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

◆ 모형 수립

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in RES} (p_{sp}^i SP_i^t + p_r^i R_i^t + \sum_{k=1}^{A_i} p_{up,k}^i SHup_{ik}^t + \sum_{k=1}^{A_i} p_{dn,k}^i SHdn_{ik}^t + \sum_{k=1}^{B_i} p_{c,k}^i S_{ik}^t) \quad (1)$$

s.t. flow conservation equations (2)

$$R_i^{\min} \leq R_i^t \leq R_i^{\max} \quad i \in RES, t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$S_{ik}^{lb} \leq S_{ik}^t \leq S_{ik}^{ub} \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, B_i$$

$$SHup_{ik}^t \leq SHup_{ik}^{ub} \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, A_i$$

$$SHdn_{ik}^t \leq SHdn_{ik}^{ub} \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, A_i$$

$$\sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} R_i^t \geq PW_{\min} \quad (7)$$

$$Y_i^t \leq \sum_{k=1}^{B_i} S_{ik}^t / S_i^{\max} \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

$$SP_i^t \leq bigM Y_i^t \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$$Y_i^t \in \{0, 1\} \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

위 모형에서 식 (1)은 각 기간의 댐별로 주어진 유입량에 대해 용도별 총 가중치를 최소화하도록 하는 목적식이고, 제약식 (2)는 네트워크 모형의 각 노드에서 유량이 보존되어야 함을 의미한다. 제약식 (3)은 각 댐에서 방류하는 발전 방류량은 하천유지 용수량 (R_i^{\min})보다 커야하고 최대 발전방류 가능량 (R_i^{\max})보다 작아야 함을 의미한다. 제약식 (4)는 각 댐의 저수량은 각 저수구간에서 하한값보다는 커야하고 상한값보다는 작아야 한다는 것을 의미한다. 제약식 (5) 및 (6)은 각각 임의의 댐에 대한 상류 및 하류 수요량이 있을 때 용수부족이 발생할 경우 각 용수부족 구간에 대해서 각 구간의 상한값 이하로 발생하여야 함을 나타내고 있다. 이상의 제약식 (2)에서 (6)까지만 구성된다면 본 모형은 네트워크 모형으로 구성될 수 있다. 그러나 현실상황을 보다 적절히 반영하기 위해서는 다음의 제약식 (7), (8), (9), 그리고 (10)을 추가한다.

임의의 댐에서 여수로 방류는 해당 댐의 총 저수량이 수문조작에 필요한 저수위 이상이 되어야 한다. 따라서 제약식 (8), (9), (10)은 여수로 방류량이 발생하려면 해당 댐의 저수량이 상시만수량(건기) 또는 제한수량(우기)에 도달하여야 한다는 것을 표현하고 있다 (S^{\max} = 상시만수량 또는 제한수량). 제약식 (7)은 계획기간동안 모든 댐에서 방류한 총량이 계획발전 방류량 (PW_{\min}) 이상이 되어야 함을 의미한다. 이는 용수공급 위주로 댐을 운영할 때 목표 발전량을 감안하는 한 가지 방법으로 사용된다. 또한 제약식 (7)은 본 모형에서 분지한계법(branch and bound)을 적용하여 해를 구해낼 경우 가능해 영역을 줄여주므로써 계산시간의

절약을 이루게 하는 부수적인 역할도 한다.

한편 본 모형의 제약식 중에서 제약식 (2)는 Flow Conservation 식으로서, Fig. 1의 각 Node에 대해서 유입량과 유출량이 서로 같아야 한다는 제약식들이다. 따라서 본 모형에서 정의하고 있는 주요 Node, 즉 Dam Node, Upstream Demand Node, Downstream Demand Node, Supersink Node, Supersource Node, Spill Node, Shortfall Segment Node, Carryover Zone Node, Buffer Node, Control Point Node(Normal Release, Overflow)등에 대해서 각각 Flow Conservation 식을 구성하여야 한다. 다음 식들은 표현의 번거러움을 피하기 위하여 몇가지 대표적인 노드에 대해서만 표현한 것이다.

먼저, Fig. 1에서 각 댐의 Buffer Node로부터 하류 댐으로 유출되는 유량을 BR_i^t 라 정의하면,

버퍼 노드 :

$$Zdn_i^t + BR_i^t = R_i^t + SP_i^t \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

댐 노드 :

$$\sum_{k=1}^{B_i} S_{ik}^t + R_i^t + SP_i^t + Zup_i^t = \sum_{k=1}^{B_i} S_{ik}^{t-1} + I_i^t + \sum_{k \in U_i} BR_k^t \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

댐상류 수요지 노드 :

$$Dup_i^t = \sum_{k=1}^{A_i} SHup_{ik}^t + Zup_i^t \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (13)$$

댐하류 수요지 노드 :

$$Ddn_i^t = \sum_{k=1}^{A_i} SHdn_{ik}^t + Zdn_i^t \quad i \in RES, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (14)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

이때, 식 (12)는 Fig. 1의 Dam Node를 중심으로 유입량과 유출량을 표현한 것으로서, 식 (12) 우변에 나타나고 있는 Dam Node의 유입량은 기간초 저수량, 댐으로의 자연 유입량, 그리고 상류댐 방류로 인한 유입량 등으로 구성되며, 유출량은 식 (12)의 좌변에 표시된 것과 같이 기말저수량, 발전 방류량, 여수로방류량, 그리고 상류 수요지에 대한 용수 공급량 등으로 구성된다. 이때, 초기 저수량은 식 (12)의 우변에서 첫 번째 항목으로 표현되며, Fig. 1에서 오른쪽 아래의 음

영으로 된 부분에 나타나는 (t-1) 시점의 Carryover Zone Node들로부터 t 시점의 Dam Node로 향하는 Arc들로서 모든 Dam Node에 똑같은 방식으로 적용된다. 두 번째 항목인 자연 유입량(I_i^t)은 Supersource Node(S)에서 Dam Node로 향하는 Arc에 할당되고, 세 번째 항목인 상류댐으로부터의 유입량은 Buffer Node에서 Dam Node로 향하는 Arc에 나타난다. 식 (12)의 좌변에는 Dam Node의 유출량 항목들을 표현하고 있다. 기말저수량은 좌변의 첫 번째 항목에 나타나 있으며, Fig. 1에서는 Dam Node에서 Carryover Zone Node들로 향하는 Arc들로 표현된다. 두 번째 항목인 발전 방류량(R_i^t)은 Dam Node에서 Buffer Node로 향하는 Arc로 표현되며, 세 번째 항목인 여수로방류량(SP_i^t)은 Dam Node에서 Spill Node로 향하는 Arc로 표현된다. 마지막 항목으로 상류 수요지 공급량(Zup_i^t)은 Dam Node에서 Upstream Demand Node로 향하는 Arc로 표현된다.

한편 Supersource Node와 Supersink Node는 네트워크 모형을 위한 가상의 노드로서, Supersink Node의 Mass Balance를 위해서 팔당댐 하류에 위치한 인도교 수위표에 대한 Normal Release Node와 Overflow Node에서 Supersink Node로 유출되는 유량을 각각 NR_2^t 및 OF_2^t 라 하자. 이때 아래첨자 2는 인도교 수위표를 의미하는 것으로, 본 연구에서는 여주 수위표와 인도교 수위표를 고려하고 있으며 각 Control Point를 아래첨자로 구별한다.

Supersource 노드 :

$$\sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} I_i^t + \sum_{i \in RES} S_i^0 + \sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} \sum_{k=1}^{A_i} SHup_{ik}^t + \sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} \sum_{k=1}^{A_i} SHdn_{ik}^t = SystemTotal \quad (15)$$

Supersink 노드 :

$$SystemTotal = \sum_{i=1}^T NR_2^t + \sum_{i=1}^T OF_2^t + \sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} Dup_i^t + \sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} Ddn_i^t + \sum_{i \in RES} \sum_{k=1}^{B_i} S_{ik}^T \quad (16)$$

식 (15)는 Supersource Node에 대한 표현으로서, 분석기간 동안 수계내로 들어오는 총 유입량(분석기간

동안의 총 자연 유입량 + 분석기간 초에서의 총 저수량 + 분석기간 동안의 총 공급 부족량)을 표현하고 있으며, 식 (16)은 Supersink Node에서의 총 유출량(분석기간 동안 인도교 수위표를 통과하는 총 유량 + 분석기간 동안 각 댐에서의 총 상류 및 하류 수요량 + 마지막 기간에서의 각 댐의 총 저수량)을 의미한다. 이와 같은 방식으로 모든 노드에 대해서 Flow Conservation 식을 표현할 수 있는데 그 중 중요한 일부를 표현한 것이 식 (11)~식 (16)이다.

본 모형의 크기는 계획기간의 크기와 고려되는 댐의 개수에 따라 증가한다. 댐의 개수가 5개이고 1년을 계획기간으로 설정하고 각 단위 기간을 건기(9월 21일부터 6월 20일까지)는 월간으로, 우기(6월21일부터 9월 20일까지)는 반순(5일)으로 분석할 경우 28개 기간이 되며, 노드의 개수는 2,454개 이고 아크의 개수는 4,729개가 된다. 또한 0-1 정수변수는 댐의 개수*계획기간수로 나타나며, 1년을 계획기간으로 할 경우 140개의 정수변수가 사용된다. 이때 각 아크는 하나의 변수를 의미하므로 1년을 분석할 때의 총 변수의 개수는 정수변수를 포함하여 4,869개가 된다. 한편 제약식은 크게 네트워크 형태 제약식과 비네트워크 형태 제약식으로 구분될 수 있으며, 네트워크 형태 제약식의 개수는 제약식 (2)에 해당되는 제약식이 2,454개이고, 제약식 (3)에 대해서는 140개, 제약식 (4)는 1,064개, 그리고 제약식 (5)와 (6)에 대해서는 각각 1,372개씩으로서 총 6,402개가 되며, 비네트워크 형태 제약식의 개수는 제약식 (8)~(10)이 각각 140개씩이고, 제약식(7)는 1개로서 총 423개가 된다. 그러므로 비네트워크 제약식은 전체 제약식의 약 6.2 %를 차지하게 된다.

3. 한강유역 댐군에 대한 실험 예

본 모형의 효과를 검토해 보기 위하여 Fig. 5와 같이 한강수계에 위치한 댐군 중에서 2개의 다목적 댐과 3개의 발전용 댐을 선정하여 연계운영에 적용하여 보았다. 현재 한강 유역에는 총 10개의 댐이 있으나, 이 댐들 중에서 화천댐, 소양강댐, 그리고 충주댐을 제외한 나머지 댐은 그 유효저수량이 상대적으로 적어 이들 댐을 포함하여 분석한 경우 수집하여야 하는 자료의 량과 계산량의 증가에 비해 얻어지는 연계운영 효과가 미미할 것으로 판단되어 분석대상에서 제외되었다. 그러나 이들을 분석대상에서 제외시키므로써 장기용수공급계획 수립시 실제로는 여유분이 있으므로 공급 계획 수립에 역작용을 하는 것은 아니다. 다만, 청평댐

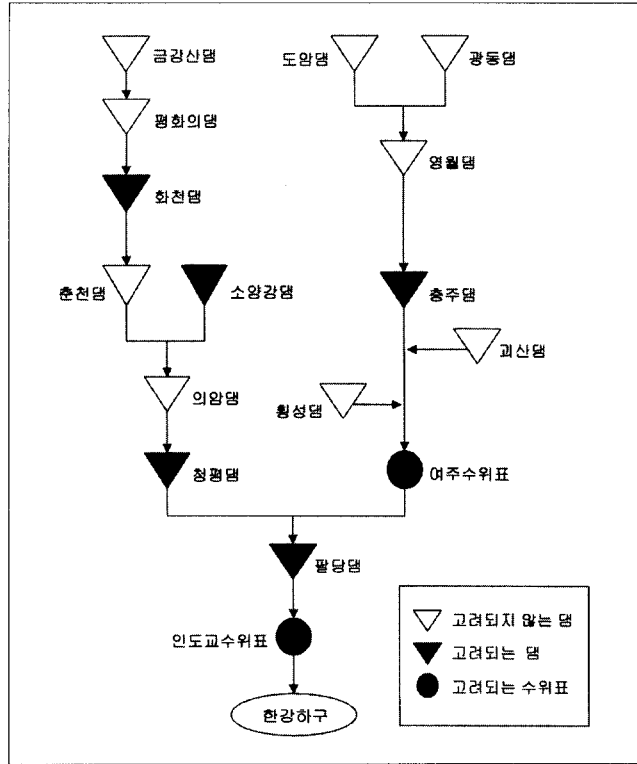


Fig. 5. 연계운영 모식도

의 경우 3개댐(화천댐, 소양강댐, 충주댐)을 제외한 나머지 댐들 중에서 비교적 규모가 크고 북한강과 소양강의 합류점인 의암 하류에 위치하여 연계운영시 조절점의 효과를 보기 위하여 고려대상에 포함시켰으며, 마찬가지로 북한강 수계와 남한강 수계가 합쳐지는 팔당댐을 고려 대상에 포함시켰다. 본 예에서는 용수수요를 가장 우선적으로 만족시키면서 미래의 수요에 대비하도록 저수량을 확보하는 용수공급 위주의 댐 운영방법으로 본 모형을 적용하였으며, 한강수계의 평균 유입량에 가깝다고 여겨지는 86년 10월부터 89년 9월까지의 실제 유입량 자료를 사용하여 실제 운영결과와 본 모형의 결과를 비교하였다. 실제 유입량 자료는 일정 시간별 댐의 수위를 측정하여 얻어지게 되며, 따라서 유입량 자료에는 이미 각 댐의 증발량이 고려되어 있다고 볼 수 있다. 그리고 청평댐과 팔당댐의 실제 유입량 자료에는 상류댐 방류로 인한 유입량도 함께 포함되어 있기 때문에 실제 유입량 자료를 곧 바로 사용하지 않고 각 댐의 실제 유입량에서 상류댐의 방류량을 제외하여 유입량을 산정하였다. 또한 총 3년의 분석기간중

건기로 구별되는 9월 21일부터 6월 20일까지는 월별로, 우기는(6월21일부터 9월20일까지) 홍수시 여수로방류 상황이 보다 잘 반영되게 하기 위하여 반순별(5일)로 분석하였다. 따라서 3년의 경우에 분석기간(T)은 84가 되고 연계운영시 고려되는 댐의 수는 총 5개가 되며, 최적화 모형은 $7,358 \times 14,185$ Node-Arc Incidence Matrix와 420개의 정수(integer) 변수로 구성된다. 해를 구하는 방법은 기본적인 분지한계법을 사용하였으며, 컴퓨터 Package로서 CPLEX를 이용하였다 (CPLEX Manual, 1995).

본 모형의 목적함수는 용수공급 부족량의 최소화, 저수량의 최대화, 발전방류의 최대화, 그리고 여수로방류량의 최소화 등이 고려되며, 각 목적의 계수는 분석 목적에 부합되도록 적절한 벌점 또는 가중치를 부여하였다. 적절한 가중치의 선택은 수학적 모형 수립에 대한 경험과 수력에너지 및 용수공급 시스템 전반에 대한 이해가 필요한 부분으로서 실제 대상 수계 및 저수지 운영 목표에 따라서 달라지므로 지속적인 연구가 필요한 부분이다(Kim과 Park, 1998). 따라서 분석자는 각

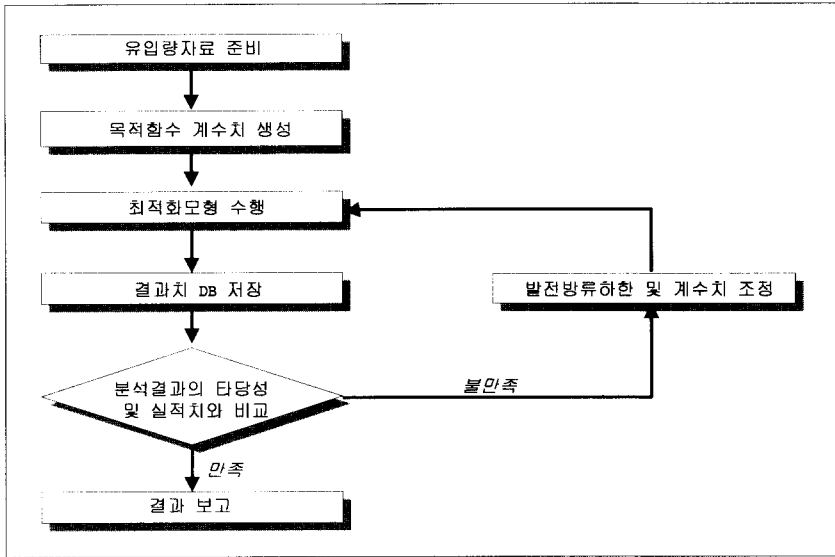


Fig. 6. 연계운영 모형분석을 위한 세부절차

목적에 대하여 상대적 중요도 평가를 통하여 각 목적 계수를 할당하고 최적화 모형의 결과가 만족할 때까지 계수를 수정하면서 본 모형을 통한 최적 연계운영방법을 모색할 수 있다. 본 예제에서는 용수 부족에 대해 가장 큰 벌점을 할당하였으며, 여수로방류량, 발전방류량 그리고 저수량 순으로 벌점을 할당하였다. 이와 같은 우선 순위로 벌점을 할당한 것은 본 모형이 용수를 우선적으로 공급하고 다음으로 불필요한 여수로 방류를 방지하며, 발전방류보다는 어느정도의 저수량을 확보하도록 하기 위함이다. Fig. 6은 가중치를 할당, 조정하는 절차를 보여주고 있다.

한편 한강수계에서 현재까지 축적된 모든 자료를 이용할 수 있는 28년간을 분석기간으로 할 경우에는 약 7만×13만 Node-Arc Incidence Matrix와 3,920개의 정수 변수로 구성되는 대형문제가 된다. 그러므로 28년간의 대형문제를 해결하기 위해서는 사람이 일일이 모형을 수립하기는 곤란하다. 따라서 자동으로 모형을 수립해 주고 또한 입력된 데이터를 저장하고 모형의 해를 사람이 인식하기 쉽도록 해 주는 자동화된 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 자동화 시스템을 구축하기 위하여 데이터베이스를 활용하였다. 구축된 시스템은 사용자의 편의성을 고려하여 모형에 필요한 입력자료를 데이터베이스에 손쉽게 입력할 수 있도록 하였으며, 입력된 자료를 이용하여 수학적 모형을 자동으로 수립하고, 도출된 해를 분석자가 알기 쉽도록 테

이블과 그래프로 나타내주도록 하였다. 실험결과 28년간의 문제를 해결하기 위하여 데이터베이스 입출력시간을 포함한 총 소요시간은 Windows NT를 기반으로 한 150 MHz 208 Mbyte RAM Pentium PC Server에서 약 18시간 정도 걸리지만, 1년 단위의 경우는 약 20분 정도면 충분하다. 이때 문제의 해를 구해내는 계산시간은 수초에서 수분정도이고 대부분의 소요 시간이 자료의 입출력에 소요된다. 이것은 수학적 모형을 실제로 응용할 경우에 문제가 되는 부분은 효율적인 알고리즘의 개발보다는 실제적인 모형의 수립과 관련자료의 효과적인 처리가 더욱 더 중요하게 된다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 본 모형을 통하여 최적으로 도출된 각 댐의 운영방안을 보여주고 있으며, Fig. 8에서 본 모형의 결과와 분석기간동안 실제 운영한 실적치를 비교해 보면 장기적인 관점에서 본 모형의 결과가 여수로방류량을 약 27.7 % 감소시키므로써 용수 공급자원의 낭비를 줄이고, 발전방류량은 약 8.6 % 증가시켜 전기에너지의 생산은 늘리며, 저수량은 실적치보다 약 15.9 %의 증가를 보여, 평균발전수위를 크게 높여 줌으로써 궁극적으로는 생산 전력의 증가를 가져올 수 있음을 보여준다.

본 모형은 원래 한강수계의 용수공급 능력량 산정을 위하여 개발된 것이지만, 결과적으로 실적치보다 더 좋은 운영효과를 보여주므로 본 모형을 사용하여 댐의

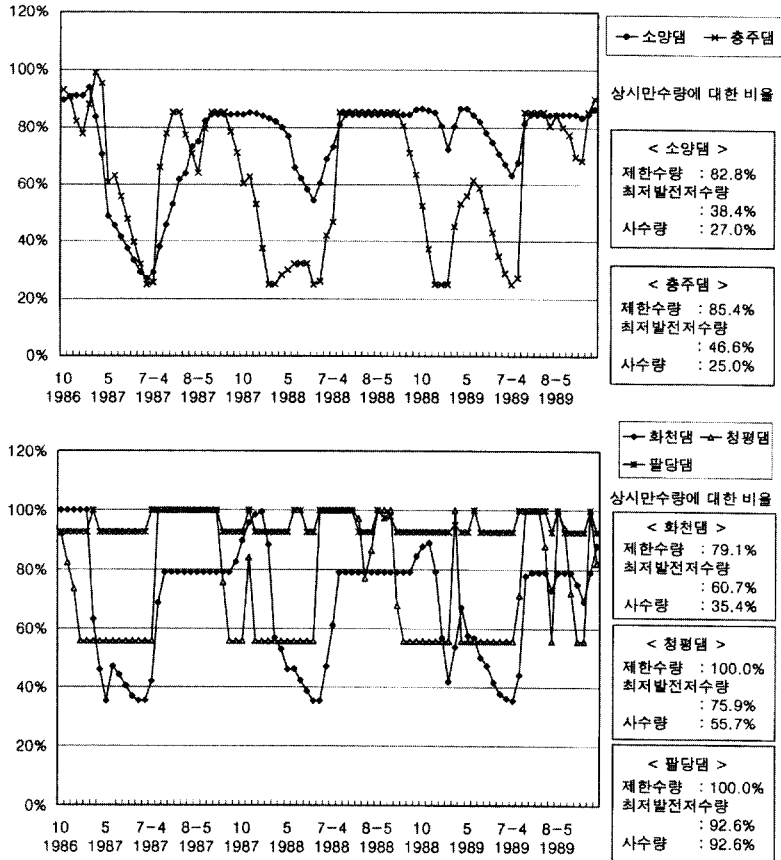


Fig. 7. 각 댐의 시간별 저수량 변화

운영방법을 개선할 수도 있음을 보여준다. 본 모형을 사용하여 댐의 운영방법을 개선하게 되면 이론적으로는 기존의 댐군의 효과적인 연계운명을 통해 크게는 화천 댐 크기 정도의 댐을 추가로 건설하는 것과 비슷한 효과를 얻을 수 있을 것으로 전망된다. 물론 이 결과는 실험에 활용된 3년간의 유입량을 확실히 알고 있다는 가정이 전제된 것이므로 연계운영에 따른 실질효과가 실제로 얻을 수 있는 절감효과에 비하여 과장된 값일 것이다. 그럼에도 불구하고 최적 연계운영에 따른 시너지에 의한 절감분위 포함되어 있으므로 유입량 예측이 비교적 정확하다면, 현재의 운영방법보다 더 나은 운영을 가능케 할 것으로 생각한다. 그러나 실제 운영에 적용할 운영모형으로 활용하기 위하여는 유입량 예측의 민감도에 대한 후속 연구와 활용 방법에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다. 현실적으로 추가적인 댐의 건설은 막대한 비용과 환경문제를 수반하기 때문에 용

수공급 능력의 확충하기 위하여 절대적인 용수 공급 부족이 예상되지 않는 한 댐을 건설하는 방법보다는 운영방법의 개선을 통한 용수능력의 확대 방안을 먼저 모색해보는 것이 바람직하다.

그리고 본 모형은 확정적 모형으로서 유입량에 따라 다른 대안을 도출해 내기 때문에 유입량의 정확한 예측이 중요하다. 유입량을 예측하는 방법으로서, 단기적으로는 강우-유출 모형을 들 수 있고, 장기적으로는 통계적이거나 확률적인 모형을 생각할 수 있으며 중-장기적으로는 두 가지를 혼합한 모형을 사용할 수 있을 것이다. 따라서 유입량 예측 분야와 현실적인 실시간 연계운영방안 수립을 위한 모형과 실시간 의사결정을 위한 방법론에 대한 지속적인 연구가 필요하며, 본 모형과 함께 효과적인 유입량 예측시스템이 개발되어 운영될 수 있다면, 현재의 운영방법보다 더 좋은 운영방법을 제시할 수도 있을 것이다.

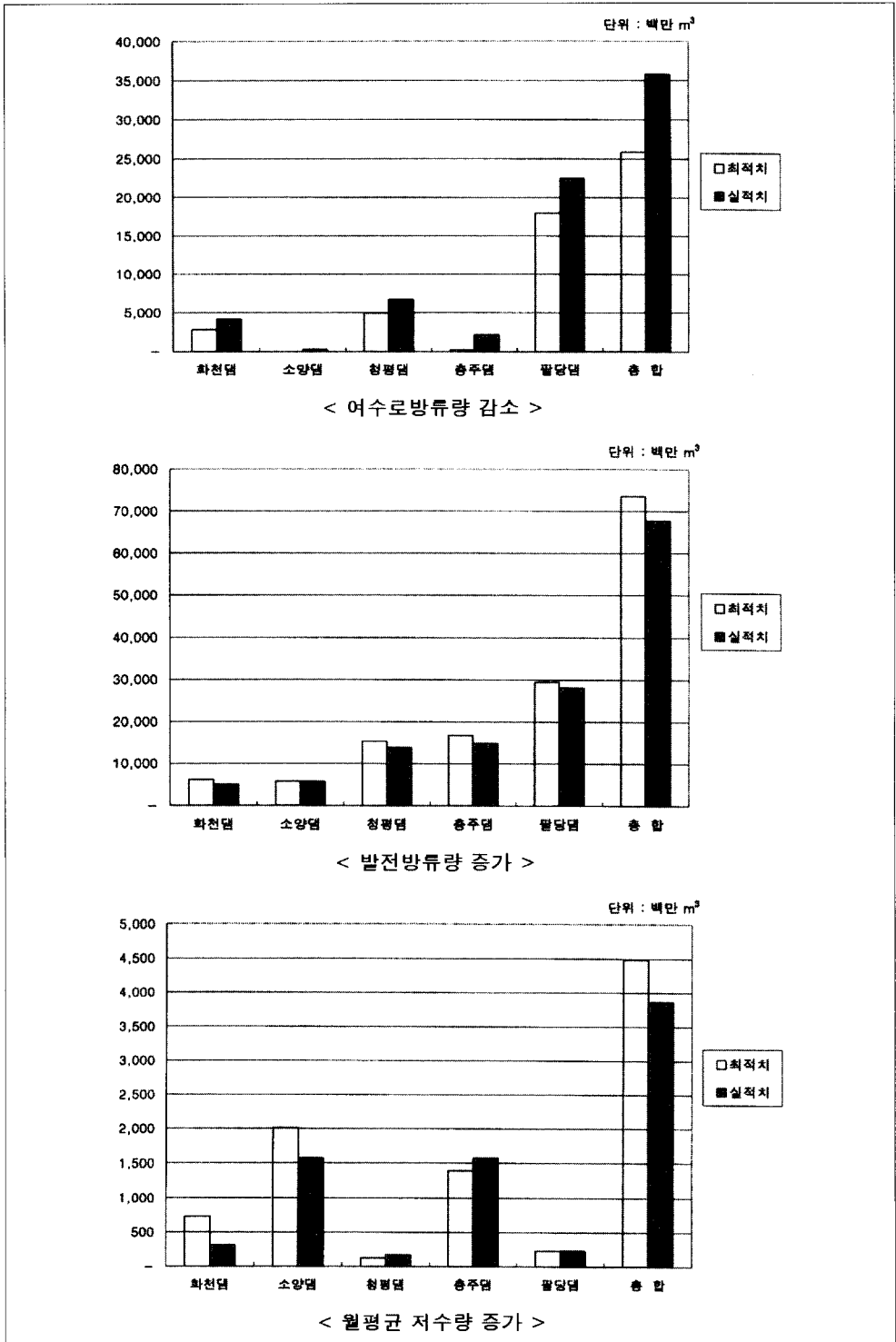


Fig. 8. 결과 비교

4. 결 론

본 연구에서는 수력발전을 감안하여 용수수요에 대해 효과적으로 대처할 수 있는 댐군의 연계운영 최적화 모형을 제안하였다. 댐군의 연계운영을 위하여 최적화 모형을 사용하고자 하는 시도는 본 연구가 처음은 아니다. 그러나 본 연구는 여타 댐군의 연계운영 연구와는 달리 목적함수를 설정함에 있어서 경제성분석을 계산 목적으로 활용하지 않고, 연계운영 모사를 위한 “엔진(engine)”으로 활용하고 여수로 방류량의 계산을 혼합정수 계획법의 혼합정수로 표현하고 있으며, 전기 에너지 량 계산과 경제성 분석은 사후계산으로 미루고 있다는 점을 특징으로 하고 있다. 최적화 모형은 네트워크 모델을 기본으로 하여 여러기간에 걸친 혼합정수 계획 문제 (multi-period mixed integer network flow linear programming)로 설계되었으며, 댐군의 연계운영을 통하여 발전방류의 최대화, 용수 수요에 대한 공급부족의 최소화, 불필요한 여수로방류량의 최소화, 저수량의 최대화등 여러 가지 목적들에 대해서 각각 가중치 또는 priority factor를 부여하여 저수지들간의 연계운영을 모사할 수 있도록 설계하였다. 3년간의 분석기간에 대해서 본 모형을 적용해 보면, $7,358 \times 14,185$ Node-Arc Incidence Matrix와 420개의 정수변수로 구성되며, 한강수계에서 현재까지 축적된 모든 자료를 이용할 수 있는 28년간을 분석기간으로 할 경우에는 약 $7만 \times 13만$ Node-Arc Incidence Matrix와 3,920개의 정수 변수로 구성되는 대형 혼합정수 계획 문제가 된다.

본 모형을 한강수계내 댐군의 연계운영에 적용하여 2개의 다목적 댐과 3개의 발전용 댐의 연계운영 실험을 해 본 결과 실제 운영실적보다는 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 대체로 행렬의 크기는 모형의 현실성과 밀접하게 연관되어 있다. 본 모형은 현실적인 용수공급 가능량을 가늠할 수 있을 정도로 정교하고 규모가 제법 큰 현실적인 모형이다. 구조적으로는 최적화 모형이므로 실제 운영실적에 비하여 향상된 결과를 얻을 수 있는 대안을 제시하지만, 기본적으로는 댐들의 연계 운영을 표현하는 시뮬레이션 모형으로 활용될 수 있다. 따라서 용수공급 계획수립의 단계에서 용수 수요량을 증가시켜 봄으로써 현실적으로 얼마만큼의 용수공급이 가능할지를 가늠해 보기 위하여 본 모형을 활용할 수 있다. 그러나 본 모형을 실시간 연계운영에 곧바로 활용할 수는 없다. 본 모형이 실시간 연계운영에 활용되

기 위해서는 효과적인 중단기 유입량 예측모형의 개발과 아울러 실시간 운영에서 고려되어야 할 현실적인 요소들이 반영될 수 있도록 모형의 가변성이 충분히 확보되어야 하며, 수학적 연계운영 모형을 실시간 의사결정에 활용하는 방법론이 제시되어야 한다.

또한 본 연구에서 수립된 수학적 모형의 현실적인 활용을 위해서는 분석에 필요한 기초자료를 쉽게 입력할 수 있고, 입력된 자료를 사용한 수학적 모형이 자동으로 구성되어 그 결과를 분석자가 알기 쉽게 그래픽 등으로 나타내 줄 수 있는 컴퓨터시스템이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위하여 Windows-NT 환경 하에서 Microsoft SQL Server를 사용하여 어느정도 자동화된 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템은 CoMOM(Coordinated Multi-Reservoir Operating Model for Han River Basin)이라 명명하였다. 개발된 CoMOM 시스템의 지속적인 추가 수정 및 보완과 함께, 예측의 신뢰성이 어느 정도 보장될 수 있는 효과적인 댐 유역별 중장기 유입량 예측시스템이 개발되어 실시간으로 함께 효과적으로 운영될 수만 있다면, 현재의 운영방법보다 환경보존에 따른 이득을 차지하고도 용수공급 능력을 증대시킬 수 있는 더 좋은 운영방안을 제시할 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 1997년 한국수자원공사에서 도화종합공사를 통하여 고려대학교 방재과학연구소에 의뢰한 ‘기존댐 용수공급 능력조사(한강수계)’의 학술부문 연구성과 중의 일부로서, 이 연구를 지원해 준 건설교통부 수자원정책과, 한국수자원공사 댐관리처, 그리고 자료수집에 도움을 주신 도화종합기술공사 관계자들에게 심심한 사의를 표한다. 그리고 이 모형의 컴퓨팅 환경에서의 실제 구현을 위하여 애쓴 시스템분석 연구실의 박사과정 김재희 군과 석사과정 소경철, 문사인 군의 노력에 감사한다.

참 고 문 헌

- 김승권 (1988). “저수지 운영방안의 방법론적인 고찰.” 한국수문학회지, 제21권, 제1호, pp. 16-25.
- 최인석 (1987). 다수준 동적계획법을 이용한 댐군의 홍수조절에 관한 연구. 석사논문, 고려대학교.
- Can, E.K. and Houck, M.H. (1984). “Real-time reservoir operations by goal programming.” *Journal of Water Resources Planning and*

- Management*, Vol. 110, No. 3, pp. 297-309.
- Chung, F.I., Archer, M.C., and DeVries, J.J. (1989). "Network flow algorithm applied to california aqueduct simulation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, No. 2, pp. 131-147.
- CPLEX Manual (1995). Using the CPLEX Callable Library - version 4.0, CPLEX Optimization, Inc. Incline Village, NV.
- Khaliquzzaman and Chander. S. (1996). "Network flow programming model for multireservoir sizing." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 1, pp. 15-22.
- Kim, S.K. and Park, Y.J. (1998). "Coordinated multireservoir operating model." *May 26-29 1998 Spring Meeting*, American Geophysical Union, Boston, Massachusetts
- Ko, S.K. (1989). *Optimizing reservoir systems operation with multiobjective decision analysis*. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University
- Kuczera, G. (1989). "Fast multireservoir multiperiod linear programming models." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 169-176.
- Martin, Q.W. (1981). *Surface water resources allocation model AL-V program documentation and user's manual. UM 35*, Texas Department of Water Resources, October 1981, pp. 1-47.
- Mohan, S., and Keskar, J.B. (1991). "Optimization of multipurpose reservoir system operation." *Water Resources Bulletin*, Vol. 27, No. 4, pp. 621-629.
- 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.
- Randall, D., Cleland, L., Kuehne, C.S., Link, G.W., and Sheer, D.P. (1997). "Water supply planning simulation model using mixed integer linear programming 'Engine'." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 2, pp. 116-124.
- Sigvaldason, O.T. (1976). "A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 263-278.
- Sun, Y.H., Yeh, W.W-G. Hsu, N.S. and Louie, P.W.F.(1995). "Generalized network algorithm for water supply system optimization." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 121, No. 5, pp. 390-398.
- Tejada-Guibert, J.A., Johnson, S.A., and Stedinger, J. R. (1993). "Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using stochastic dynamic programming." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 12, pp. 3969-3980.
- Tejada-Guibert, J.A., Sharon, A.J. and Stedinger, J. R. (1995). "The value of hydrologic information in stochastic dynamic programming models of a multireservoir system." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 2571-2579.
- Wurbs, R.A. (1993). "Reservoir-system simulation and optimization models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE., Vol. 119, No. 4, pp. 455-472.
- 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:98-050/접수:1998.08.01/심사완료:1998.11.18)