

낙동강수계 일별 저수지군 최적 운영 모형 개발

Development of a Daily Reservoir Operating Model for Nakdong-River Basin

이용대*, 조남웅**, 김재희***, 박명기****, 김승권*****

YongDae Lee, NamWoong Cho, Jaehee Kim, Myung-ky Park, Sheung-Kown Kim

요 지

본 연구에서는 낙동강수계 일별 운영 계획 수립을 위한 저수지군 최적 연계운영 모형(CoMOM, Coordinated Multiple Reservoir Operating Model)을 개발하였다. 이를 위하여 동적 네트워크 흐름 모형을 기반으로 한 다중목적 혼합 정수 목표계획 모형 (MOMIGP, Multiple Objective Mixed Integer Goal-Programming)을 수립하였다. 이 모형은 월말 목표 수위 및 운영 제약 등을 목표 계획법으로 구성하였으며, 일별 운영의 특성을 고려하여 하도추적의 효과를 반영하였고, 선형화된 발전함수를 이용하여 발전량을 최대화 하도록 한 후 정확한 발전량을 사후에 산정하였다. 이와 같이 수립된 수학 모형을 GUI를 비롯한 프로그램(CoMOM)으로 개발하여 사용자가 편리하게 수행 할 수 있도록 하였다. 이 프로그램은 의사결정자의 운영 목표와 의도를 효과적으로 반영할 수 있도록 대화형 목표 계획법을 구현하였으며, 상충되는 여러 목적에 대하여 가능한 파레토(Pareto) 최적해를 제시하고 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택하도록 대화형 다중목적 계획법 CBITP(Convex hull of individual maxima Based Interactive Tchebycheff Procedure)를 활용하여 구현하였다. 한편 객체지향적 프로그램 기법을 활용하여 수계 내의 노드(저수지, 수요지, 발전소 등)를 추가 하거나 삭제 할 수 있도록 하여, 다른 수계로의 확장이 용이하도록 개발하였다.

핵심용어 : 저수지 일별 운영, 다중목적 계획법, 혼합 정수 계획법, 목표 계획법, 네트워크 최적화

1. 서 론

일별 저수지군 최적 연계운영모형은 월간 계획을 준수하며 일별 운영의 특성을 적절히 반영한 가운데 수자원을 가장 효율적으로 사용할 수 있는 저수지 운영 방안을 제시하여야 한다. 이를 위한 모형 개발 연구는 시뮬레이션 모형과 최적화 모형 등 다양한 방향으로 꾸준히 연구되고 있다. 먼저 시뮬레이션 모형으로 HEC-5(Hydrologic Engineering Center, 1998), MODSIM(Labadie, 1995), WEAP(1998), AQUATOOL(Andrue et al., 1995) 등은 용수 공급, 발전 등 다양한 목적을 반영한 Rule Curve에 의해 일별 운영 방안을 도출하여 준다. 하지만 이와 같은 시뮬레이션 모형은 현실 상황을 충실히 반영한 결과를 제시 할 수는 있지만, Rule Curve 운영에 내포된 여러 문제로 인하여 의사결정자가 원하는 최선의 대안을 도출해 줄 수 는 없다. 최적화 모형으로는 SLP(Successive Linear Programming) 기법을 이용하여 발전량을 최대화하는 운영 방안을 도출하도록 하는 Hydrosoft (Robitaille et al., 1995), VISTA(Allen et al., 1996) 등의 모형이 개발되어 사용되고 있지만 용수 공급 등 다른 목적을 반영하지 못하는 현실적인 한계를 보여주었다. 다른 한편으로 최적화 모형과 시뮬레이션 모형을 모두 적용한 Riverware(Eschenbach et al., 2001)는 목표 계획법을 바탕으로 다중 목적을 고려한 일 별 운영 방안을 도출함으로써 효율적인 수자원 운영에 많은 성과를 남기고 있다. Riverware는 HEC-5를 대체시킬 목적으로 개발된 최적화 시뮬레이션이 가능한 범용화된 패키지로서 그 역할이 기대된다. 그러나 가중 합계법에 의한 다중 목적 계획에 의존함으로써 최선의 열등하지 않은 해를 항상 보증할 수 없다는 한계가 있다.

본 연구에서는 하도 추적 등 일별 운영 특성을 고려한 가운데, 목표 계획법과 CBIPT (Kim, J. H. and Kim, S. K., 2005)를 이용하여 발전 및 용수 공급 등 여러 목적을 고려한 최적화 모형을 제시한다.

* 준회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정 · E-mail : ydlee@korea.ac.kr

** 준회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사과정 · E-mail : ever1213@korea.ac.kr

*** 준회원 · 군산대학교 경영회계학부 전임강사 · E-mail : jheekim@kunsan.ac.kr

**** 정회원 · 한국수자원공사 물관리센터 과장 · E-mail : mkpark@kowaco.or.kr

***** 정회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수 · E-mail : kimsk@korea.ac.kr

2. 수학 모형의 수립

본 모형은 동적 네트워크 흐름 모형(Dynamic Network Flow Optimization)을 기반으로 한 다중목적 혼합 정수 목표계획 모형(MOMIGP, Multiple Objective Mixed Integer Goal-Programming)으로 수립되었다. 낙동강 수계의 각 시설의 흐름을 동적 네트워크로 구성하여 물의 흐름이 시점별로 각 시설에 최적으로 배분 되도록 하였으며, 여기에 수문에 의한 방류 조절을 하는 한국적 특성 및 하도 추적 효과의 반영, 발전 함수의 선형화 등 일별 저수지군 운영의 특성을 고려한 제약식을 추가하였다. 그리고 목적 함수를 운영 목표를 포함한 다중 목적으로 구성하고, 각 목적에 선취적 우선순위(Preemptive Priority)를 부여하여 우선 순위가 높은 목적 및 운영 목표를 먼저 달성하도록 하였다. 한편 발전량 최대화와 저수량 최대화와 같이 상호간에 상충되는 목적에 대해서는 대화형 다중목적 계획법 CBITP를 활용하여 가능한 파레토(Pareto) 최적해를 제시하고 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택할 수 있도록 하였다. 좀 더 상세한 모형의 수학적 및 네트워크 모형 관련 기술은 (김승권, 2004)를 참조 하면 된다.

2.1 목적함수

목적 함수는 수계의 일별 운영 특성 및 제약을 반영한 가운데 용수 부족을 최소화 하고, 홍수 조절 용량을 확보한 가운데 물을 최대한 저수하여 미래의 용수 공급에 대비하며, 발전량을 최대화 하여 현재의 편익을 최대로 달성 할 수 있도록 다중 목적으로 구성하였다. 본 모형에서 고려된 목적은 표 1과 같다. 각 목적은 현재 또는 미래의 편익 달성을 위한 목적(Objective)과 수계 운영 제약 및 특성을 효율적으로 반영하기 위한 운영 목표(Goal)로 구성 된다. 운영 목표(Goal)는 조절점의 통수능 상·하한, 저수지의 제한 수위 또는 상시 만수위 준수와 같은 운영 제약 등을 목표 계획법으로 표현 한 것이다. 만약 이를 제약식으로 표현한다면 사용자의 자료 입력 오류 또는 심각한 물 부족 및 시스템이 감당할 수 없는 홍수의 발생 등으로 인하여 제약식을 준수 하지 못하는 일이 발생할 수 있다. 이와 같이 제약식을 준수하지 못하는 경우, 모형은 불능해(Infesible Solution)를 도출 하게 되며, 사용자가 그 원인을 밝히는 것은 쉬운 일이 아니다. 이에 반하여 운영 제약 등을 목표 계획법으로 표현하면, 운영 목표(제약 등)를 준수 하지 못하더라도, 최대한 목표에 가까운 해를 도출하게 되며, 사용자는 목표에서 벗어난 결과를 확인하여 원인을 찾고 판단을 할 수 있게 된다. 이와 같은 운영 목표(Goal)는 운영 제약뿐만 아니라 월 말 목표 저수량 및 일별 운영 목표(목표 저수량, 방류량, 흐름량 등)에 적용되어 의사결정자의 운영 의도를 효과적으로 반영 할 수 있도록 한다.

표 1. 유입량 예측 기간별 실시간 모의운영의 결과

번호	우선순위	목적 또는 목표에 대한 설명	기본 가중치	비고
Z ₁	1	조절점의 흐름량은 유지용수 이상이 되며 하천 통수능을 넘지 않는다.	10 ²⁰	Goal
Z ₂	2	저수지 저수량은 최저 운영 기준 수위 이상을 유지한다.	10 ¹⁶	Goal
Z ₃	3	수요지 용수 공급 부족량을 최소화 한다.	10 ¹²	Obj.
Z ₄	4	조절점의 흐름량은 관리 상한과 하한을 넘지 않도록 한다.	10 ¹⁰	Goal
Z ₅	5	각 댐의 여수로 방류량 및 수계의 유출량을 최소화 한다.	10 ⁸	Obj.
Z ₆	6	저수지 저수량은 상시 만수위 또는 제한 수위를 넘지 않는다.	10 ⁸	Goal
Z ₇	7	월말 목표 저수량을 준수 한다.	10 ⁷	Goal
Z ₈	8	일별 운영 목표(저수량, 방류량, 흐름량 등)를 준수한다.	10 ⁶	Obj.
Z ₉	9	저수량을 최대화 한다.	유효저수량 연평균유입량 × 10 ²	Obj.
Z ₁₀		발전량을 최대화 한다.	W/MWh	Obj.

한편 각각의 운영 목표와 목적들은 선취적 우선순위(Preemptive Priority)를 갖게 되고, 우선 순위가 높은 목적 또는 목표부터 절대적으로 큰 가중치를 갖게 되어, 설정된 목적 및 목표를 순차적으로 달성하게 된다. 각 목적과 목표에 적용된 우선순위와 가중치는 표 1과 같다. 그리고 저수량 최대화와 발전량 최대화와 같이 상호간에 상충되는 목적들에 한해서는 CBITP를 활용하여 가능한 파레토(Pareto) 최적해를 제시하고 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택할 수 있도록 하였다. 이것은 방류량 결정시 기존의 수학적 모형들이 얻으려는 최적해

를 포함하여 더 많은 다양한 최적해를 고려해보고자 하는 시도로서 기존의 수학적 모형과 그 기반이 구별된다.

그리고 각 시설별로 우선 순위를 설정하기 위한 상대적 가중치를 설정하였다. 먼저 저수지별 저수량의 상대적 가중치는 ‘유효 저수용량/연평균 유입량’으로 설정하였는데, 그 이유는 유효저수용량에 비하여 연평균 유입량이 적은 댐은 다른 댐에 비하여 앞으로 저수용량을 모두 채울 확률이 적으므로 물을 많이 저수하여 미래 용수 수요에 대비하는 것이 유리하기 때문이다. 이 같은 가중치 설정의 저변에는 Space Rule (Bower et al., 1962)의 개념이 반영되어 있다고 할 수 있다. 한편 각 발전소의 기본 가중치는 발전 단가를 기준으로 설정하였으며, 발전 단가가 높은 발전소에서 더 많은 전력 생산이 이루어지도록 하였다. 그리고 각 수요지의 상대적 가중치는 상류 수요지가 하류 수요지보다 약간 큰 가중치를 갖도록 하였다. 이렇게 설정하는 이유는 현실적으로 실제 물 부족이 발생하였을 때 각 수요지의 물 공급 우선순위를 결정할 현실적 방법이 없으며, 상류에서 물을 먼저 사용하고 하류에서 남은 물을 사용할 수밖에 없기 때문이다. 하지만 물 부족 시 물 공급 우선순위 및 배분 방안이 결정된다면 각 수요지의 가중치를 조정하여 이를 달성할 수 있도록 설계되어 있다.

2.2 제약조건

제약식은 동적 네트워크 흐름 모형의 유량 보전 제약식과 각 시설의 흐름 상·하한, 한국적 여수로의 특징 및 하도 추적 효과의 반영, 발전 함수의 선형화 등 일별 저수지군 운영의 특성을 고려한 제약식으로 구성되었다. 그리고 목표 계획법을 위한 제약식을 이용하여 기말 목표 저수위와 일별 목표 방류량을 준수 하도록 하였으며, 운영 제약을 지키도록 하였다.

구체적으로 유량 보전 제약식은 그림 1과 같은 네트워크의 각 노드에서 유입량과 유출량의 합을 같게 하는 것으로써, 각 시점별로 각 시설 물 흐름의 연속성이 보장되도록 한다. 즉 네트워크를 동적으로 구성하여 수계 내 각 시설의 물리적 연결 관계뿐만 아니라 저수지의 저수(Carryover)와 같이 시점별 물의 이동의 연속성을 정의 하도록 하였다. 그리고 시설의 흐름 상·하한 제약식은 발전 최대 사용수량과 같이 시설의 물리적 흐름의 한계를 설정한다. 한편 여수로 방류와 관련된 제약식은 저수지의 저수량이 여수로 방류 가능 수위 이상에서만 여수로 방류가 가능하도록 설정하는 것으로써, 이진 변수를 활용한 조건부 제약식으로 구성하였다. 이밖에도 하도 추적 및 발전 함수 선형화와 같은 일별 운영 특성을 반영하기 위한 제약식들이 포함되었다.

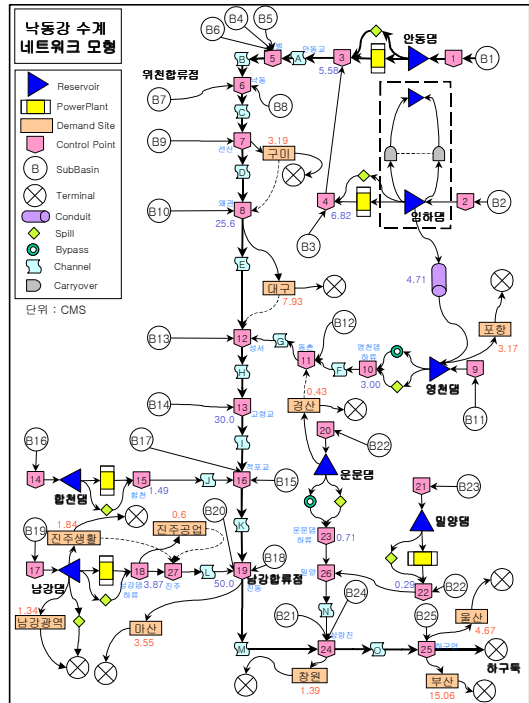


그림 1. 낙동강 수계 네트워크 모형

2.3 하도 추적 효과의 반영

일별 저수지군 최적 연계 운영 모형은 안정적인 용수 공급 계획과 신뢰성 있는 운영 계획 수립을 위하여 하도 추적 효과를 고려하여야 한다. 특히 낙동강 수계는 댐에서 방류한 물이 하류 조절점이나 수요지까지 도달하는데 걸리는 도달 시간이 매우 길어 하도 추적 효과를 반영한 용수 공급 계획 수립이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 하도 추적 효과를 반영하기 위하여 Coefficient Method(Hydrologic Engineering Center, 1998)를 적용한 제약식을 구성하였다. Coefficient Method는 $O_t = a_0 I_t + a_1 I_{t-1} + \dots + a_R I_{t-R}$ 와 같은 식으로 표현 된다. 즉 t시점의 하도 유출량(O_t)은 t-r시점에 하도에 들어온 물 중 r 기간 중에 하도를 빠져나가는 물량($a_r I_{t-r}$)의 총합($\sum_{r=0}^R a_r I_{t-r}$)을 갖게 됨을 의미한다. 여기서 지체 비율을 결정해주는 a_r 은 하도추적 상수로써 실적 자료를 바탕으로 현실에 맞게 추정 되어야 한다.

2.4 발전 함수의 선형화

발전량은 $KWh = 9.8 \times [\text{발전 방류량}] \times [\text{수두}] \times [\text{발전효율}] \times [\text{발전시간}]$ 의 식에 의해서 계산된다. 하지만 [발전 방류량]과 [수두]의 곱으로 이루어진 발전량 함수는 비선형이다. 이와 같이 목적 함수가 비선형으로 이루어진 비선형 최적화 모형(Nonlinear Optimization Model)은 전역 최적해(Global Optimal)를 보장하지 못할 뿐만 아니라 최적화 수행시간이 빠르지 못하다는 단점이 있다. 그러므로 발전량 최대화를 위한 선형화가 필요한데, 이를 위하여 <식1>과 같은 선형식을 이용하였다. (Loucks 등, 1981)

$$\begin{aligned} \text{[발전량]} = & \{(\text{추정평균방류량}) \times [\text{수두}] + (\text{추정평균수두}) \times [\text{발전방류량}] - (\text{추정평균방류량}) \\ & \times (\text{추정평균수두})\} \times (\text{발전효율}) \times (\text{발전시간}) \end{aligned} \quad \text{<식1>}$$

이 식은 발전 함수의 제 1차 Taylor 전개 함수로써, 이 식을 목적 함수에 적용하여 추정된 발전량과 사후에 계산된 발전량의 오차가 일정 범위에 들어올 때까지 반복적으로 수행한다. 단, 초기의 추정평균수두 및 추정평균방류량은 저수량 최대화 목적과 <식2>의 발전량 식을 목적식에 적용한 보수적 운영 기법(Water conservation operation)을 통하여 얻게 되는데, 보수적 운영 기법은 발전을 위하여 잠재적인 수두를 더욱 높이는 저수량을 제공함으로써 발전량 최대화의 효과를 얻게 된다(Kim, S. K 등, 1999).

$$\text{[발전량]} = (\text{추정평균수두}) \times [\text{발전방류량}] \times (\text{발전효율}) \times (\text{발전시간}) \quad \text{<식2>}$$

2.5 대화형 다중 목적 계획법

저수지군 연계 운영의 실제 상황은 이론적인 모델이 추구하는 단일 목적에 의한 최적화와는 달리 여러 상충되는 목적 및 구성 요소들 간의 타협, 조정을 위한 다목적 운영을 필요로 한다. 여러 목적을 동시에 고려한 문제의 경우 우선 순위를 갖는 선취적 목적(Preemptive Objectives)과 서로 상충 관계(Trade-off)를 갖는 목적들로 구성될 수 있다. 이때 서로 상충 관계(Trade-off)를 갖는 목적들을 동시에 최적화할 때는 각 목적들이 모두 고려된 열등하지 않은 해가 고려되어야 하는데, 유효해 (efficient solution) 또는 파레토 최적해(Pareto optimal solution)로도 불리는 이 해의 개념을 사용하여 문제를 해결한다. 본 연구에서는 대화형 다목적 계획법 CBITP를 활용하여 가능한 파레토 최적해를 제시하고 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택할 수 있도록 하였다. 그림 2는 대화형 다목적 계획법을 통해 제시되는 해의 예로써, 의사결정자가 제시된 해 중에서 가장 선호하는 해를 선택하면, 주변의 가능한 파레토 최적해를 다시 제시해 주어 최종적으로 가장 선호하는 해를 결정할 수 있도록 한다.

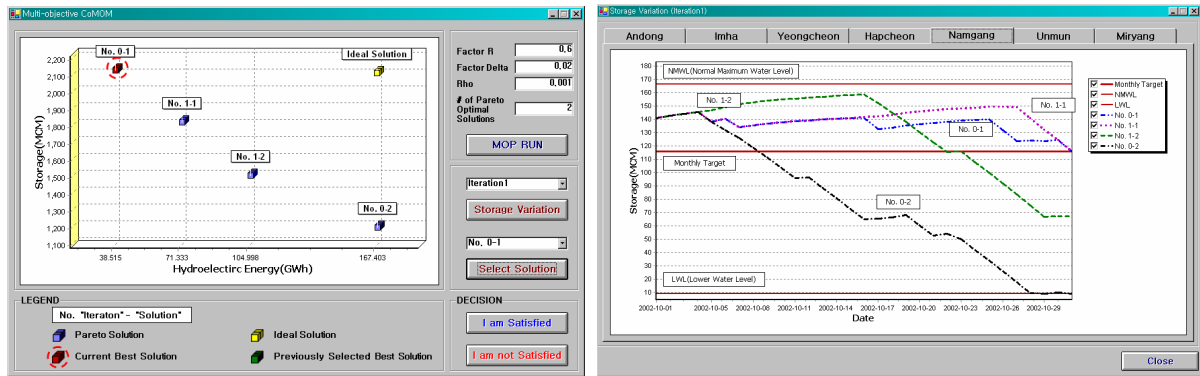


그림 2. CBITP를 활용한 대화형 다중목적 계획법

4. 모형의 검증 및 효과 분석

본 연구에서 개발된 CoMOM을 낙동강 수계 일별 운영에 실제 적용하였을 때의 효과를 분석하기 위하여 다음과 같은 세 가지 실험을 진행하였다. 분석기간은 2000년 10월 ~ 2004년 9월까지 1개 수문년씩 총 4개의 수문년으로 하였으며, 낙동강수계의 4개 다목적댐(안동, 임하, 합천, 남강)의 연계 운영 결과만을 평가하였다.

- <Case 1>. 실적 방류량을 활용한 CoMOM과 HEC-5의 연계운영효과 비교
- <Case 2>. 불확실성하에서 CoMOM의 연간 운영 계획을 적용한 일별 모의운영
- <Case 3>. 불확실성하에서 CoMOM의 일별 계획을 활용한 실시간 모의 운영

먼저 <Case 1>은 CoMOM과 HEC-5(Hydrologic Engineering Center, 1998)의 연계운영 특성 및 효과를 공정하게 비교하기 위하여 같은 수문 상황에서 HEC-5와 CoMOM에 각 저수지별 실적 방류량의 같은 양의 총합을 각 저수지의 하류 합류 조절점에 반드시 흐르도록 설정하였을 때의 결과를 비교하였다. 그 결과 CoMOM 결과가 HEC-5 결과 대비 평균 저수량은 8.2백만톤 증가하였고, 발전량은 62GWh/년 증가하였다. 그리고 총 방류량을 실적치를 기준으로 하였으므로 실적치와 평균 저수량은 변동이 없고, 발전량은 34.02GWh/년 증가하였다. 그리고 <Case 2>는 미래 유입량 예측이 어려운 가운데 CoMOM을 실시간으로 적용하지 않는다면 어떤 결과를 보여주는가를 확인하기 위한 것으로 CoMOM을 실제 운영에 적용하였을 때 얻을 수 있는 효과의 하한치가 될 수 있다. 이를 위하여 평균 유입량을 적용하여 CoMOM에서 얻은 1년간의 운영 계획(방류량)을 그대로 HEC-5에 적용하여 결과를 도출 하였다. 그 결과 CoMOM의 모의운영 결과가 실적대비 평균 저수량은 362백만톤 증가하였고, 발전량은 37GWh 감소하였다. 마지막으로 <Case 3>는 미래의 유입량을 정확히 예측하지 못하는 가운데 CoMOM을 실시간 운영에 적용하였을 때를 상정 효과를 분석한 것으로써 매일 CoMOM을 수행하여 얻은 저수지별 방류 계획을 HEC-5에 적용한 후, HEC-5를 통해 도출된 당일 말기 저수량을 다음날 CoMOM의 초기 저수량으로 사용하여 CoMOM을 수행하는 실시간 운영과정을 반복적으로 모의 하였다. 그 결과 앞으로 3일까지의 유입량을 예측 가능하다고 했을 때 평균저수량 51백만톤 증가, 발전량 29GWh/년(약 25.7억원)증가하는 결과를 보여 주었다.

5. 결론

본 연구에서는 낙동강수계 일별 운영 계획 수립을 위한 저수지군 최적 연계운영 모형(CoMOM)을 제시하였다. CoMOM은 일별 운영의 특성을 반영한 제약식을 구성하였으며, 저수지군 연계운영의 현실을 고려하여 목표 계획법을 적용하였으며 및 대화형 다중 목적 계획법을 이용하여 의사결정자의 의도를 효과적으로 반영하도록 하였다. 그리고 효과 분석 결과 CoMOM은 모의 운영 모형인 HEC-5보다 더 우수한 연계운영 효과를 얻을 수 있음을 보여주었으며, 미래의 유입량을 정확히 예측하지 못하더라도 CoMOM을 실시간으로 적용한다면 발전량 증대를 통한 수익 증대와 저수량 증대를 통한 용수공급 안정성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-2)과 한국수자원공사의 “낙동강수계 일별 최적운영모형 개발” 용역의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김승권(2004). 낙동강수계 일별 최적운영모형 개발 보고서, 한국수자원공사
2. Allen, R. B., Olason, T., and Bridgeman, S. G. (1996). A decision support system for power systems operations management. Proc., 5th Water Resour. Operations Mgmt. Workshop, ASCE, New York.
3. Andreu, J., Capilla, J., and Sanchis, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. J. Hydro., Amsterdam, 177(3/4), 269-291.
4. Bower, B. T., M. M. Hufschmidt, and W. H. Reedy. (1962). Operating procedures: Their role in the design and implementation of water resource systems by simulation analysis. in Design of Water Resource Systems, edited by A. Maass et al., chap. 11, pp. 443-458, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
5. Eschenbach, E. A., Magee, T., Zagona, E., Goranflo, M. and Shane, R. 2001. Goal programming decision support system for multiobjective operation of reservoir systems. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 127, No 2, pp. 108-12
6. Hydrologic Engineering Center(1998), HEC-5 User's Manual Version 8.0, U.S Army Corps Engineers
7. Kim, S. K (1999), Hydro Energy from Multiple Reservoir Operation, Proceedings of the WATERPOWER'99 Conference, Water Resources Session 23: Decision Support Systems II
8. Kim, J. H. and Kim, S. K.(2005), A CHIM-based interactive Tchebycheff procedure for multiple objective decision making, Computers & Operations Research (in print: available online at www.sciencedirect.com)
9. Labadie, J. (1995). River basin model for water rights planning, MODSIM. Tech. Manual, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, Colo.
10. Robitaille, A., Welt, F., and Lafond, L. (1995). Development of a real time river management system for hydro-Quebec's short term operation. Waterpower '95
11. WEAP (1997), Water evaluation and planning system user's guide., Tellus Institute, Boston.