

수자원 공학에서의 최적화 기법의 활용 (Ⅲ)



김 승 권 |

고려대학교 산업시스템 정보공학과 교수
kimsk@korea.ac.kr

1960년대 초 부터 수자원공학에서의 최적화 기법은 상당한 기대 속에서 많이 활용되어 왔다. 최적화 모형은 시뮬레이션 모형에 비하여 상당히 많은 장점이 있음에도 불구하고, 기대한 만큼의 효과를 보지 못하고 있다. 그동안 실패한 사례도 많지만, 성공적인 사례도 많이 나오고 있다. 실패하는 이유는 개발자에게 더 많은 책임이 있지만, 모형에 대한 이해부족에 따른 사용자의 잘못도 있다. 최적화 모형은 장점도 있지만, 단점도 많으므로 그 한계를 확실히 이해하고, 개발자는 물론 사용자도 실제 활용에 많은 주의를 기울여야 한다. 무리하게 사용하게 되면 시뮬레이션 모형을 활용하는 것 보다 종종 못한 결과가 나올 수도 있다. 최적화 모형에 대한 이해를 돕기 위해서 부족하지만, 수자원 공학에서 최적화 모형의 활용에 관련된 내용을 세 번에 나누어서 정리하였다.

Contents...

1. 수공학과 최적화

- 1.1 수자원 공학이란?
- 1.2 경제적 효율과 최적화
- 1.3 한계비용과 기회비용
- 1.4 객관적 평가의 기준과 파레토 최적해
- 1.5 수자원 시스템과 최적화 모형
- 1.6 최적화 모형 활용 예

2. 최적화 기법의 소개

- 2.1 최적화 기법의 소개
- 2.2 최적화의 장점과 한계
- 2.3 다 기준, 다목적 의사결정과 최적화
- 2.4 불확실성과 최적화

3. 응용 사례 연구

3. 응용 사례 연구

3.1 서론

최적화 기법의 활용은 수자원 분야 밖에서 이미 상당히 보편화 되어 있다. 주로 생산 및 재고 관리나, 자원배분 또는 시설확충, 승무원 일정계획, 물류 등과 같이 활동수준이 비용에 직접적으로 영향을 미치는 서비스 분야의 중장기 계획수립 및 자원 관리 등의 문제에 많이 활용되고 있다. 미국도 활발하지만, 특히 북구 유럽의 물류 및 교통 서비스 산업에서 아주 성공적으로 활용되고 있어서 최적화 기법은 비용 절감노력에 지대한 공헌을 하고 있다. 본 강좌에선 수자원에 관련된 최적화 모형의 응용 사례로 저수지 군 연계 운영 모형의 개발 및 적용을 중심으로 소개하고자 한다.

저수지군 연계 운영이라 함은 수계 내에서 각기 다른 목적으로 분리 운영되고 있는 댐들의 방류량을 독립적으로 정하지 않고, 전체 저수지의 저수상황 및 하류 수요량을 통합적으로 고려하여 각 저수지의 운영 목표에 맞게 앞으로의 저수량과 방류량을 시간적 공간적으로 할당하는 것을 의미한다. 각 저수지의 운영 목표로는 홍수조절, 용수공급(생활용수, 공업용수, 관개용수 등), 수력발전, 수질보전, 생태계보전, 오락 및 휴식 공간 확보 등이 있으며, 이러한 여러 가지 목적을 모두 효과적으로 고려한 운영 방안을 찾는 것은 쉬운 일이 아니다. 이를 위해서 실무에서는 일정한 운영 룰(operational rule)을 설정하고, 시뮬레이션 모형을 활용하여 그 효과를 분석하는 방법을 많이 사용하고 있다. 하지만, 우리나라는 수문상황이 변화무쌍하지만 미국처럼 다음해로 전년도 저수량을 이전할 수 있을 만큼 댐 저수지의 저수용량이 규모가 크지도 못하므로 매년 일정한 운영 룰이 존재하리라고 생각하는 것은 순진한 생각일지 모른다. 그러므로 할 수 있는 한 최대로 유입량을 예측하고, 유역 전체의 저수상황 및 하류 수요량을 통합적으로 고려하여 미래 용수 부족에 대비하면서, 각 저수지의 운영 목표에 맞게 저수량과 방류량을 시간적 공간적으로 실시간으로 최적 할당하는 방식이 최선이 아닐까 생각한다. 저수지 운영 문제는 순차적인 의사결정 문제이므로 분석기간 내 유입량 예측자료의 활용이 불가피하다. 그런데 장기 유입량 예측은 너무 어려운 과업이므로 유입량 예측에 따른 헷지(hedging) 효과 보다는 공간적 가상 통합운영의 측면에서 발생할 시너지에 더 비중을 두어서 실시간으로 최적 연계운영을 해나가는 것이 (예측에 의한 시너지효과와 통합연계 운영에 따른 시너지를 명확하게 구분하기는 어렵다.) 더 현실적일 것이라고 생각된다. 따라서 유역 통합적 저수지군 최적 연계 운영 모형 개발이 필요하다.

대개의 최적화 모형은 경제성에 기반을 둔 단일 목적 함수를 가정함으로써 현실과는 동떨어진 결과를 도출하곤 하였다. 발전 편익최대화를 목적에 두면 저수지의 저수량이 빠른 속도로 고갈되어 미래 용수 부

족에 대비하기 어렵다. 결국 저수량 고갈 속도를 추가 제약식으로 제어해야 되는데, 이는 모형의 자유도를 심각하게 침해하게 되고, 최적화 모형 수립의 본래 목적에 맞지 않는다. 운영룰에 따를 것을 목적으로 할 경우는 궁극적으로 구하고자 하는 바를 제시해야 하는 딜레마에 빠지게 된다. 한편, 현실은 다목적이고 불확실하므로, 미래 유입량의 변화에도 대응이 가능한 결정이 되어야 한다. 그러나 미래 유입량 예측도 어렵고, 각 목적간의 우선순위를 가능하기 위한 적당한 가중치(weighting factor)를 찾는 것도 현실적으로 쉽지 않다. 왜냐하면, 어떤 목적들은 서로 영향을 주고받고 때로는 상충 관계를 형성하기도 하기 때문이다. 그러므로 좀 더 현실적인 최적화 모형이 되기 위해서는 실제 운영과정을 모사할 수 있도록 적절한 초기 가중치를 부여하여 모형을 구축하고, 그 중 상충되는 목적간의 절충안으로 파레토 최적해 전방선(Pareto optimal frontier)을 구해서 제시하는 다중 목적 의사결정 기법이 요구된다 (김승권, 1998; Kim et al., 2005). 그리고 다중 목적 기법으로 구해진 파레토 최적해 중에서 의사결정자의 경험과 통찰력을 활용하여 가장 선호하는 경제적인 해를 선택하게 하면, 가중치 설정의 어려움과 불확실성에 따른 최적해의 민감성에도 어느 정도 능동적으로 대처할 수 있게 된다. 순차적 저수량 할당이 이루어지려면, 유입량 시계열이 고려되어야 한다. 이때 유입량 예측이 비교적 정확해야 헷징(hedging)에 따른 시너지가 창출된다. 하지만 현실적으로 유입량을 정확하게 예측하는 것은 거의 불가능하다. 그럼에도 불구하고 최근에는 기상 수문학 기술이 발전함에 2~3일 정도의 단기 유입량 예측은 신뢰도가 높아졌다. 그러나 그 기간 이후의 유입량 예측에는 여전히 많은 어려움이 있다. 그러므로 현재로서는 계절적 요인이 뚜렷하게 드러나는 장기 유입량 예측에는 통계적인 유입량 추세를 적용하고, 그에 덧붙여 가뭄과 홍수 등 다양한 유입량 시나리오를 고려한 추계학적 최적화 기법을 적용하는 것이 최선이다. CoMOM (Coordinated Multiple Reservoir Operating Model) 은 이와 같은 저수지군 연계운영

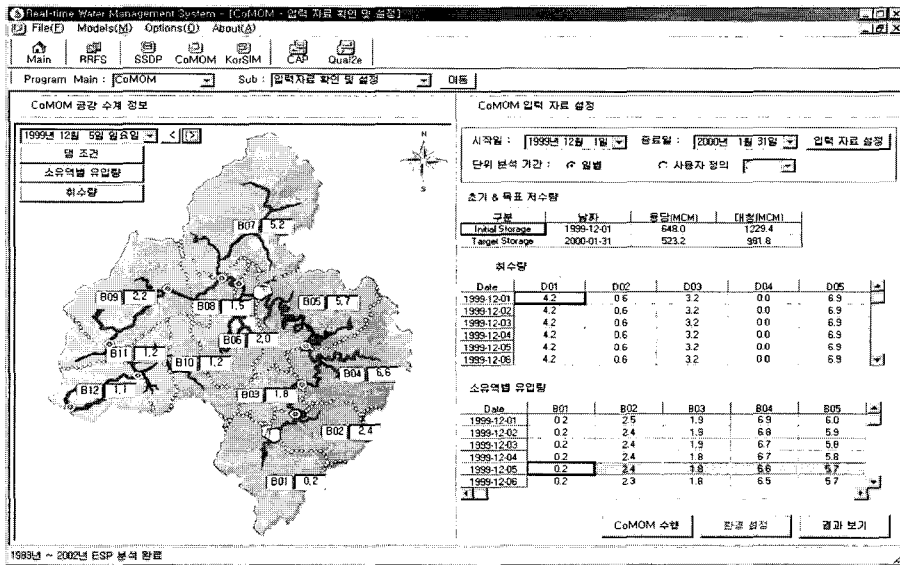


그림 1. CoMOM 4.0의 금강수계 GUI

계획 수립을 위해서 필요한 요소들을 반영한 최적화 모형 (김승권, 2004; Kim et al., 2005) 이므로 이 최적연계운영 모형의 개발 과정을 최적화 기법의 응용 사례로서 소개한다.

CoMOM 4.0은 동적 네트워크 흐름 모형(Dynamic Network Flow Optimization)을 기반으로 한, 다중목적 혼합 정수 목표계획 모형(MOMIGP, Multiple Objective Mixed Integer Goal-Programming)이다. 이 모형은 저수지군의 일별 방류계획을 수립하는데 도움을 주기 위하여, 대화형 다중목적 계획법이 적용되어 상충되는 목적의 파레토 (Pareto) 최적해를 제시하고, 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택할 수 있도록 하였다. 또한 미래 유입량의 불확실성에 효과적으로 대응하기 위한 추계학적 기법을 적용할 수 있도록 모형이 개선되고 있다. CoMOM 4.0은 금강 수계 및 낙동강 수계에 적용되었으며, 앞으로 한강 및 섬진강 등 다른 수계에도 새롭게 발전시킨 진전된 모형 기술을 적용시켜 기존의 모형을 개선할 계획이다. 그림 1은 21세기 프론티어 연구개발 사업을 주관하는 수자원 지속적 확보 기술 개발 사업단의 '통합수자원 관리기술의 유역 물 관리 운영기술개발 사업'의 하부 단위 과제에서 구축한

CoMOM 4.0을 위한 금강 수계 GUI 틀이다.

3.2 네트워크 흐름 모형의 수립

네트워크 흐름 모형은 수자원 시스템의 물 흐름을 가장 효과적으로 표현할 수 있는 수학적 모형으로써, 저수지, 발전소, 수요지와 같은 수계내의 각 지점 및 시설 등을 나타내는 노드(Node)와 이 노드를 연결하여 물이 흐르도록 해주는 하천과 도수로 등을 표현하는 아크(Arc)로 구성된다. 수계 내의 각 노드와 아크를 그림 2와 같이 표현하여 네트워크 모형을 수립할 수 있다. 이와 같은 네트워크 모형은 선형 계획 모형으로 표현되는데, 이 선형 계획 모형은 각 노드에 들어오는 물의 양과 나가는 물의 양이 같다고 설정하는 흐름량보전 (flow conservation/water balance) 제약식과 각 노드와 아크의 상·하한 값을 설정하는 제약식으로 표현된다.

이때 그림 2와 같은 공간적인 네트워크가 이전 기간과 다음 기간으로 시간적으로 서로 연결되어 있으면 이를 시간을 고려한 동적 네트워크라고 한다. 동적 네트워크는 분석 기간의 수에 따라 문제크기가 커지지만, 소위 Node-Arc incidence 행렬로 표시되

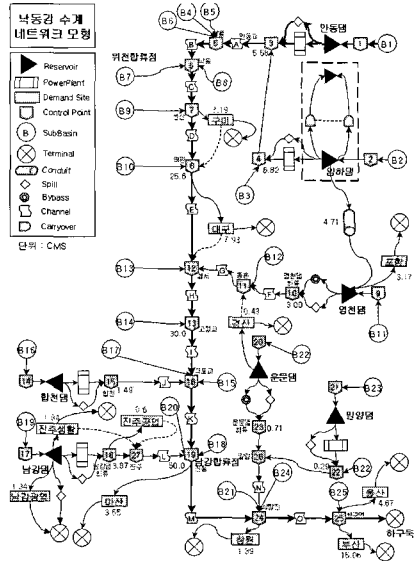
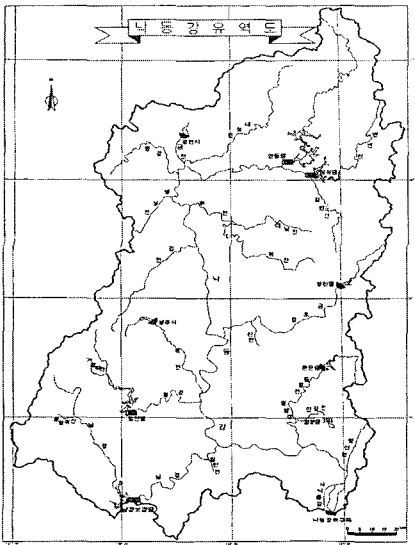


그림 2. 수자원 시스템의 네트워크 모델링

는 네트워크 모형의 특성을 유지하는 한, 문제 크기에 크게 영향 받지 않고 일반적인 선형 계획 모형보다 매우 빠른 속도로 해를 도출 할 수 있다. 그러므로 네트워크 모형은 수자원 시스템 분석 및 최적화에 매우 적합한 모형이라 할 수 있다. 따라서 텍사스 TVA 같이, 댐의 개수가 수십 개가 되고 규모가 커서 여수로 방류가 잘 일어나지 않는, 대규모 유역에의 적용도 손쉽다. 하지만 여수로 조절을 분명하게 고려해야 하는 저수지군 연계운영 모형은 순수한 네트워크 모형만으로는 표현될 수 없다. 왜냐하면 여수로 방류는 저수지 수위가 여수로 수위 (crest elevation) 보다 높아야만 방류가 가능하기 때문이다. 즉 조건부 제약식이 추가되어야 하며, 조건부 제약식은 이진 변수를 활용하며, 저수위가 여수로 수위를 넘었는지를 결정해 준다. 결국 네트워크 모형의 선형 제약식과 이진 정수 제약식이 혼합된 혼합 정수계획 모형(Mixed Integer Programming Model)으로 구성되게 된다. 정수 제약식이 포함된 문제는 문제 크기가 증가함에 따라 해를 도출하는 시간이 기하급수적으로 증가하고, 경우에 따라서는 최적해를 보장하지 못하는 경우가 발생할 수도 있다. 그러므로 정수 제약식은 피할 수 없는 경우에만 사용하여야 할 것이다. 저수지군

연계운영 계획 모형에서는 이진 변수가 여수로의 숫자와 분석기간의 숫자의 곱만큼 있어야 하는데, 최근의 CPLEX와 같은 최적화 엔진은 매우 효율적이므로 정수 제약식에 큰 영향을 받지 않고 매우 빠른 속도로 해를 도출 할 수 있다.

3.3 목적 함수의 구성 및 다 기준, 다목적 의사결정

각 저수지의 운영 목표에 맞게 저수량과 방류량을 시간적, 공간적으로 할당하는 효과적인 운영계획을 수립하기 위해서는 적절한 목적함수의 구성이 필요하다. 고려된 목적은 표 1과 같다. 상식적으로 볼 때 유입량이 불확실할 때 취할 수 있는 가장 좋은 방법은 불필요한 방류를 줄이고 여수로 방류가 발생하지 않을 만큼 최대한 저류하여 미래의 용수 수요에 대비하는 것이다. CoMOM 4.0의 목적 함수는 이 같은 상식적인 논리가 구현되도록 구성하였다. 즉 수계의 일별 운영 특성 및 제약을 반영한 가운데 용수 부족을 최소화하고, 홍수 조절 용량을 확보한 가운데 여수로 방류를 최소로 하면서 물을 최대한 저수하여 미래의 용수 부족에 대비한다. 기본적으로는 발전량을 하류 용수 수요 범위 내에서 최대화 되도록 하지만, 저수

표 1. CoMOM 4.0의 목적 또는 목표 및 우선순위

번호	우선순위	목적 또는 목표에 대한 설명	기본 가중치	비고
Z1	1	조절점의 흐름량은 유지용수 이상이 되며 하천 통수능을 넘지 않는다.	10^{20}	물리적 목표
Z2	2	저수지 저수량은 최저 운영 기준 수위 이상을 유지한다.	10^{16}	물리적 목표
Z3	3	수요지 용수 공급 부족량을 최소화 한다.	10^{12}	관리상 목표
Z4	4	조절점의 흐름량은 관리 상한과 하한을 넘지 않도록 한다.	10^{10}	물리적 목표
Z5	5	각 댐의 여수로 방류량 및 수계의 유출량을 최소화 한다.	10^8	관리상 목표
Z6	6	저수지 저수량은 상시 만수위 또는 제한 수위를 넘지 않는다.	10^8	물리적 목표
Z7	7	월말 목표 저수량을 준수 한다.	10^7	관리상 목표
Z8	8	일별 운영 목표(저수량, 방류량, 흐름량 등)를 준수한다.	10^6	관리상 목표
Z9	9	저수량을 최대화 한다.	유효저수량 $\times 10^9$ 연평균유입량	절충될 목표
Z10		발전량을 최대화 한다.	W/MWh	절충될 목표

량과의 trade-off 분석을 통하여 의사결정자가 원할 경우, 관리적 측면에서 총 발전방류량을 늘려서 발전 편익이 최대로 될 수도 있도록 다중 목적으로 구성하였다. 각 목적은 현재 또는 미래의 편익 달성을 위한 운영상 목적(operational objective)과 수계 운영 제약 및 특성을 효율적으로 반영하기 위한 기능적 운영 목표(technical goal)로 구성된다. 기능적 운영 목표는 조절점의 통수능 상·하한, 저수지의 제한 수위 또는 상시 만수위 준수와 같은 물리적 제약 등을 목표 계획법으로 표현한 것이다. 만약 이를 목표계획법으로 처리하지 않고 일반 제약식으로 표현한다면, 사용자의 자료 입력 오류 또는 심각한 물 부족 및 시스템이 감당할 수 없는 홍수의 발생 등으로 인하여 제약식을 준수하지 못하는 일이 발생할 수도 있다. 만약 제약식을 준수하지 못하면, 모형은 불능해(Infeasible Solution)를 도출하게 되는데 그럴 경우, 사용자가 그 원인을 밝히는 것은 쉬운 일이 아니다. 그러나 운영 제약 등을 목표 계획법으로 표현하면, 운영 목표(제약 등)를 준수하지 못하더라도, 최대한 목표에 가까운 해를 도출하게 되며, 사용자는 목표에서 벗어난 정도를 확인하여 원인을 분석하고 목표 조정여부를 판단을 할 수 있게 된다. 이와 같은 기능적 운영 목표는 물리적 제약뿐만 아니라 월 말 목표 저수량 및 일별 운영 목표(목표 저수량, 방류량, 흐름량 등)와 같은 관리상 목표에도 확대 적용되어

의사결정자의 운영 의도와 관리 수준을 효과적으로 반영 할 수 있도록 한다.

한편 우선 순위가 높은 목적 또는 관리상 목표부터 순서대로 절대적으로 큰 가중치를 부여하여 선취적 우선순위(Preemptive Priority)를 갖게 함으로써 설정된 목적 및 목표를 순차적으로 달성하게 한다. 각 목적과 목표에 적용된 우선순위와 가중치는 표 1과 같다. 그리고 가뭄 대비에도 효과적이고, 발전 수위 유지에도 도움을 주는 저수량 최대화 목적과 그에 상충되는 발전량 최대화 목적간의 절충(trade-off)을 위해서는 CBITP (Convex hull of individual maxima based Interactive Tchebycheff) 를 활용하여 가능한 파레토 최적해(Pareto optimal solution)를 제시하고 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택할 수 있도록 하였다 (Kim S.K. et. al. 2005; J. Kim, S.K. Kim, 2006). 이것은 기존의 수학적 모형이 감도 분석에 의존하는 것 보다는 한 차원 높은 방식으로서 방류량 결정시 단일 목적 수학적 모형이 얻을 수 있는 최적해를 포함할 뿐 아니라 그보다 더 많은 다양한 최적해를 고려해보고자 하는 시도로서, CoMOM의 중요한 특성의 하나라 할 수 있다.

이를 위해서 대화형 다중목적 계획법 CBITP를 활용하여 가능한 파레토 최적해를 제시하고 그 중에서 의사결정자가 가장 선호하는 해를 선택할 수 있도록 하였다. 그림 3은 대화형 다중목적 계획법을 통해 제

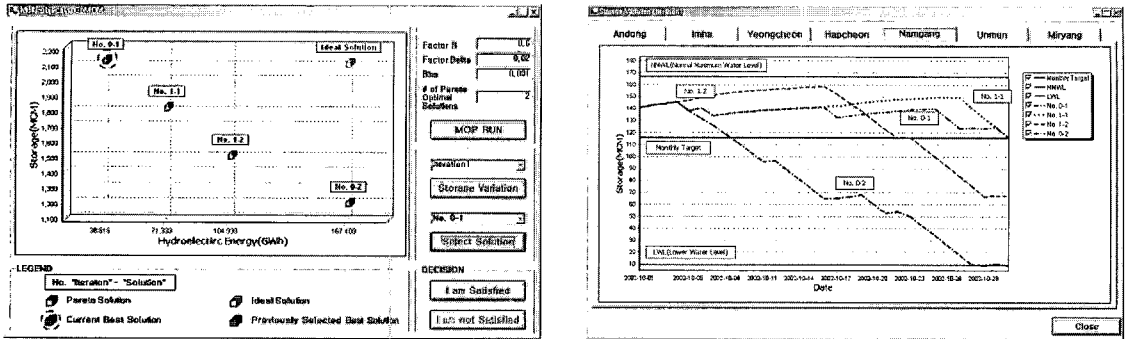


그림 3. 대화형 다중목적 계획법을 통해 제시되는 해

시되는 해의 예로써, 의사결정자가 제시된 파레토해 중에서 가장 선호하는 해를 선택하면, 선택된 해 주변의 또 다른 파레토 최적해를 다시 제시하게 해 주어 최종적으로 가장 선호하는 최적해를 결정할 수 있도록 한다.

3.4 불확실성하에서 최적화 모형의 실시간 운영 효과 검증

저수지군의 최적운동을 위하여 고려되어야 할 가장 중요한 요소는 현재의 저수량과 미래의 유입량이다. 그러나 저수지 방류량을 결정해야 할 시점에서 장래의 유입량을 정확히 추정할 수 없다는 점이 저수지 방류량을 자신 있게 정하지 못하는 이유가 된다. 그러므로 최적화 모형을 현실에 적용하였을 때의 효

과를 분석하기 위해서는 현실과 같은 불확실성의 조건 하에서 최적화 모형을 적용하는 모의 운영을 진행하며, 이를 실시간 모의 운영이라고 정의한다 (김승권, 2004). 이와 같은 실시간 모의 운영 절차는 그림 4와 같다. 먼저 연계운영 계획을 수립하기 위해서는 유입량을 예측하여야 하는데, 2~3일 정도의 유입량은 비교적 정확히 예측이 가능하다는 가정 아래 실적 유입량을 적용하고, 그 이후 기간은 평균 유입량을 적용한다. 이때 유입량을 정확하게 예측할 수 있는 기간은 변화시켜가며 실험을 진행하여 유입량 예측 정확도가 미치는 효과를 따로 분석해 본다. 이와 같이 예측된 유입량을 CoMOM에 입력하여 각 저수지의 일별 방류 계획을 수립하고, 수립된 방류계획에 따라서 각 저수지에서 방류하도록 한다. 하지만 실제 저수지를 대상으로 실험을 할 수 없으므로 실제 저수

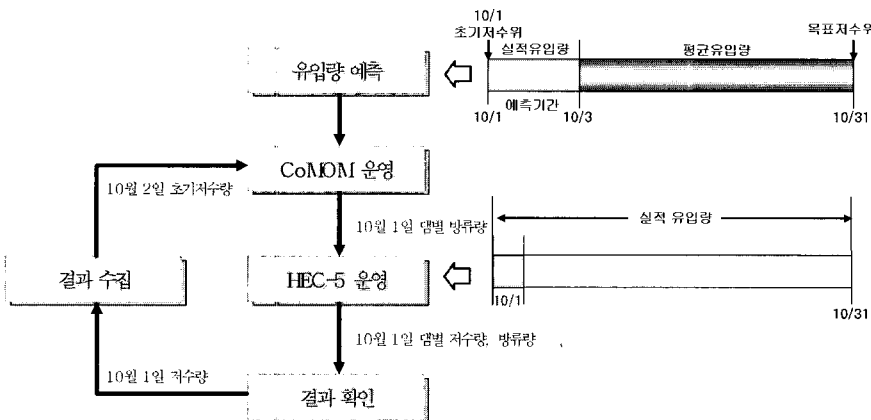
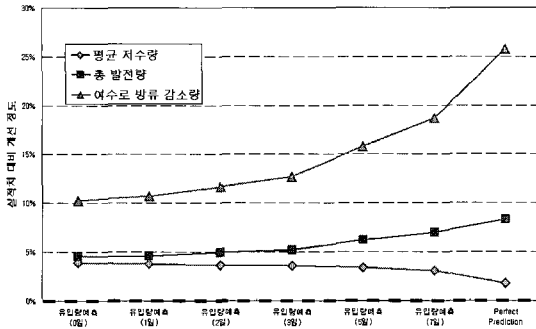
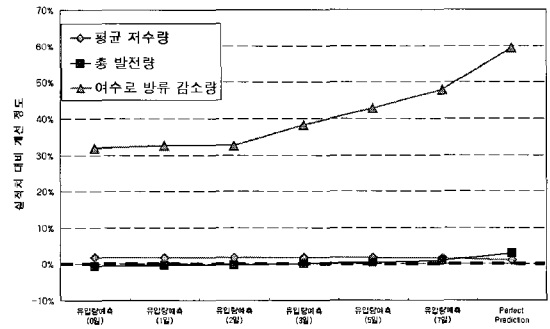


그림 4. 불확실성 하에서 CoMOM을 활용한 실시간 모의운영



a. 홍수기 포함



b. 홍수기 제외

그림 5. 실시간 저수지군 연계 모의 운영의 실적치 대비 개선 정도

지 운영을 대신할 모의 운영 모형을 사용하여야 하는데, 미공병단 수문공학연구소(Hydrologic Engineering Center)에서 개발한 HEC-5를 사용하였다. HEC-5는 매 운영시점에서 실제 유입량(실적 유입량)이 들어오고, CoMOM이 수립한 방류 계획대로 방류를 진행하였을 때 연계 되는 저수량을 제시한다. 실시간 모의실험은 과거 실적 유입량을 마치 실제로 발생된 유입량인 것처럼 가정하고, 위에서 제시한 별도의 예측 유입량을 기준으로 수행하게 되는데, 대개의 경우 예측된 유입량이 어긋날 것이므로 제시되는 저수량은 CoMOM이 계산했던 다음날 저수량과는 다르게 된다. 이렇게 HEC-5 가 제시한 저수량은 다음날의 CoMOM의 초기 저수량이 되며, 이 초기 저수량을 바탕으로 위 과정을 계획기말까지 매 단위기간에 반복한다.

이와 같은 방법으로 낙동강수계의 4개 다목적댐(안동, 임하, 합천, 남강)에 대하여 2000년 10월 ~ 2004년 9월까지 1개 수문년씩 총 4개의 수문년, 동안 매일 CoMOM을 365×4번 반복 적용하여 일별 최종 방류량을 결정하는 실시간 모의 운영을 진행하였다. 그 결과를 실적치와 비교한 개선 정도는 그림 5와 같다. 그림 5를 보면 단기 유입량 예측이 불가능할 경우, 즉 평균 유입량을 예측 유입량으로 사용할 경우에도 통합운영의 시너지 효과(주로 공간 통합적 시너지)로 인하여 저수량과 발전량이 증가하고, 여수로 방류량이 감소하게 되는 좋은 결과를 보여준다.

또한 유입량 예측 정확도가 증가함에 따라 그 효과가 증대됨을 알 수 있다. 결국 수계 내 통합 연계운영은 불확실성 하에서도 실적보다 좋은 결과를 보여줌을 확인 할 수 있다.

3.5 추계학적 선형계획 모형의 활용

효율적인 저수지군의 연계운영계획을 수립하기 위해서는 정확한 증장기 유입량 예측이 필요하다. 그런데 현실적으로 정확한 유입량을 예측하는 것은 불가능하다. 하지만 기상 예측 기술이 발달함에 따라 단기 유입량 예측 정확도가 향상되고 있으며, 특히 기상청의 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)와 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 정보를 활용한 단기간 유입량 예측은 그 정확도가 높아지고 있다. 그렇다하여도 10일 이상의 증장기 유입량 예측은 여전히 많은 한계를 갖고 있다. 이와 같은 유입량 불확실성에 효과적으로 대응하기 위해서는 가능한 유입량 시나리오를 모두 고려하여 확률적 측면에서 기대 성과 또는 기대 편익이 최대가 되는 운영 방안의 도출이 요구되며, 이를 위해서는 추계학적 최적화 기법의 적용이 필요하다. 추계학적 모형은 추계학적 동적 계획 모형(Stochastic Dynamic Programming)과 추계학적 선형계획 모형(Stochastic Linear Programming)이 널리 활용되고 있다. 추계학적 동적

계획법은 비선형적 요소를 감안하기 쉽고, 시물레이션 모형을 내재시켜 분석하기 편한 장점이 있다. 그리고 미래 유입량의 가능성을 이산형(discrete) 유입량 시나리오 뿐만 아니라 연속 확률 분포 형태로도 분석이 가능하다. 하지만 상태 변수의 개수와 이산화 차원의 크기에 따라 수행시간이 기하급수적으로 증가하는 ‘차원의 저주(Curse Of Dimensionality)’ 문제가 있다. 이에 반해, 추계학적 선형 계획 모형은 이산형(discrete) 유입량 시나리오 형태로 미래 불확실성을 고려하면서도 문제의 크기에 상관없이 비교적 빠른 속도로 해를 도출 할 수 있다. 그러나 비선형 문제를 선형화 시켜야 하는 번거로움과 조건부적인 제약을 고려할 경우 이항정수의 사용이 불가피하다는 문제는 남는다.

추계학적 선형 계획 모형을 위해서는 유입량 시나리오 나무 (scenario tree)를 구성하여야 하며, 시나리오 나무의 구성형태 및 방식에 따라 2단계 (two-Stage) 모형과 다단계 (multi-Stage) 모형으로 구분된다. 2단계 모형은 미래 유입량의 불확실성이 시점에 따라 차이가 크게 나타나지 않는 경우에 사용되며, 일반적으로 월별 운영 계획에 적합하다고 할 수 있다. 이에 반하여 다단계 모형은 미래 유입량 불확실성이 단계별로 다르게 나타나는 경우에 해당하며, 일반적으로 1단계 또는 2단계의 불확실성이 마지막 단계의 유입량 불확실성보다 작게 표현된다.

1) 시나리오 나무의 구성

단기 기상 예측 정보를 활용하여 효율적인 저수지군의 일별 방류 계획 수립을 위해서는 다단계 추계학적 선형 계획 모형을 위한 시나리오 나무(multi-stage inflow scenario tree)를 구성한다. 각 단계에서 활용하는 기상 예측 정보는 그림 6와 같다 (이용대 등, 2006).

첫번째 단계는 현재로부터 2일간이 되며, RDAPS 정보를 활용한 1개의 유입량 시나리오를 생성하고, 두 번째 단계는 3일 이후 10일까지로 설정하였으며 GDAPS 정보를 활용하여 유입량 시나리오를 생성한

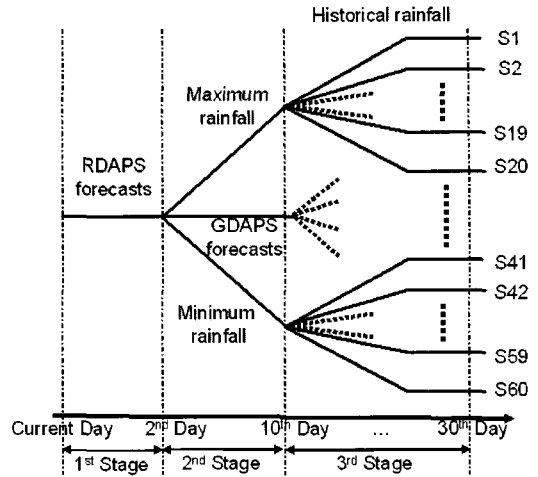


그림 6. 단기 기상 예측 정보를 활용한 다단계 유입량 시나리오 나무

다. 이때 GDAPS 정보의 정확도에 현실적 한계가 있으므로 과거 실적 강수량의 최대치와 최소치 정보를 추가하여 3개의 시나리오를 생성한다. 그리고 10일 이후로부터 계획기말 까지는 세 번째 단계로서 현실적인 유입량 예측이 불가능하므로 ESP (Ensemble Streamflow Prediction) 시나리오 생성 방법과 같이 과거 실적 강수량을 활용하여, 과거 실적 강수량의 자료 수만큼의 유입량 시나리오를 생성한다. 이때의 유입량 시나리오들은 강우 예측 정보를 RRFS (Rainfall Runoff Forecasting System: US Army Corps of Engineers 2006) 의 SSARR: Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation model 을 수자원 공사 수자원 연구원에서 우리나라 수문환경에 적합하게 개선한 모형)와 같은 강우-유출 모형에 입력하여 얻게 된다.

2) 모형의 기본 구조

추계학적 선형 계획 모형은 미래 유입량을 정확히 알지 못하고, 시나리오의 형태와 그 시나리오로 될 확률만 안다는 가정 아래 통계적 또는 확률적인 기대값을 최대화 하는 결정을 내리게 되는데, 이를 ‘모르면서 내리는 결정 (non-anticipative decision)’ 이라고 한다. 이때 불확실한 사상이 어떻게 귀결될지를 모

르면서 내리는 의사결정 변수를 계획 변수 (planning variable)라 하며, 그 결정으로 인하여 추후에 발생되어 전파되는 일련의 파급효과가 모형 측면에서 불가능해의 영역에 들어가 있지 않도록 '대응적 행동 (recourse action)' 을 하게 되는 대응 의사결정 변수 (recourse variable)를 설정한다. 부연하면, 일별 방류계획은 미래 유입량을 정확히 알지 못하고, 가능한 미래 유입량 시나리오만을 아는 가운데, 기대값을 최대화 하도록 결정된다. 이때의 일별 방류 계획으로 인하여 앞으로 발생할 서로 다른 유입량 시나리오로 인한 불가능해가 발생할 수도 있으므로 이에 대응할 수 있는 보다 유연한 의사결정이 요구되는데, 이 변수를 대응 변수 (recourse variable)라 한다. 본 모형에서는 시나리오 경로별로 불확실한 사상이 진행 될 경우 결정되는 일련의 대응 변수를 일별 저수량, 발전량 등으로 설정하였다. 즉 연이어서 결정되는 일련의 일별 저수량 및 발전량 등은 전 단계의 계획 변수인 일별 방류량이 결정된 후, 시나리오에 따라 다르게 결정된다. 이때 대응 변수인 각 시나리오별 저수량이 모두 저수 상·하한을 준수 하도록 계획 변수인 방류량이 결정되어야 하며, 이를 불가피하게 준수 하지 못할 때는 매우 큰 벌점을 부여받게 된다. 이를 통하여 일별 방류계획이 미래에 발생할 수 있는 모든 시나리오에 대하여 가능해 범위 내에서 결정되도록 한다. 결국 확정론적 모형과 달리 미래의 극한 가뭄이나 홍수까지 고려된 의사결정이 이루어질 수 있게 되는 것이다. 이때 매 단계마다 취할 수 있는 n 개의 시나리오 중 특별한 정보가 없으면, 임의의 시나리오를 택할 확률이 $1/n$ 이라 가정한다.

3) 추계학적 모형의 효과 분석

추계학적 모형의 효과를 검증하기 위하여 낙동강 수계의 4개 다목적댐 연계운영에 적용하여, 1983년 ~ 2002년까지의 20년간의 실적 유출량을 이용하여 실시간 모의 운영을 수행하여 "추계학적 모형의 해와 정보의 가치(Value of Information)"를 (Birge, 1997)가 제시한 기준에 따라서 분석하여 보았다. 즉

미래 유입량을 전혀 알지 못해 과거 실적 강수량 평균을 적용하여 강우-유출 모형으로부터 얻는 결과를 적용할 때 (EV, Expected Value Problem), 미래 유입량을 시나리오 형태로 다양하게 추정하여 추계학적 모형을 적용하였을 때 (RP, Recourse Problem), 그리고 미래 유입량을 정확히 알 때 (WS: Wait-and-See)에 대하여 실시간 모의 운영을 진행하였다. 그 결과는 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는 바와 같이 추계학적 모형을 실시간 운영에 사용하였을 때는 평균 강수량을 적용한 경우에 비해서 평균 저수량과 평균 발전량은 증가하고, 평균 여수로 방류량은 감소하는 효율적인 운영 결과를 보여준다. 또한 이와 같은 결과는 미래 유입량을 정확히 알 때(WS)는 크게 개선된 결과로 나타난다.

한편, 저수량의 변동 폭은 정보의 양이 증가하고 불확실성이 해소됨에 따라 감소하여, 안정적인 운영을 함을 알 수 있다. 여수로 방류량의 변동 폭도 감소함을 확인할 수 있는데, 이를 통하여 추계학적 모형이 미래를 정확히 아는 경우(WS) 보다는 못하지만, 홍수 사상에 대하여 더욱 잘 대응하고 있음을 알 수 있다. 한편 발전량의 변동 폭은 예상과 달리 예측 정보가 증가함에 따라 커지는데, 이는 CoMOM 모형의 기본 원리가 발전 보다는 수자원 보전이 기본 목적이므로 불필요한 여수로 방류를 줄이는 만큼 운영효과가 발생한다는 사실을 상기하면 이해가 된다. 즉 미래 용수 부족에 대비하여 저수량을 높게 유지하고자 하는 한, 순 발전량 증가는 여수로 방류량의 감소 정도가 반영되게 되는데 유입량이 작은 해 (시나리오)에는 여수로 방류가 거의 일어나지 않으므로 발전량 증가가 미미하다. 그에 반해, 유입량이 많은 해에는 WS의 경우 여수로 방류량의 감소가 매우 크게 나타나고, 그에 따른 발전량의 변동 폭이 커지게 되는 것으로 생각된다. 이상의 결과를 종합적으로 판단할 때 추계학적 모형이 단순하게 평균 강수량을 적용한 확정론적 모형보다 좀 더 나은 결과를 보여준다고 결론 지을 수 있다.

추계학적 모형의 효과분석 결과는 '구축된 최적 연

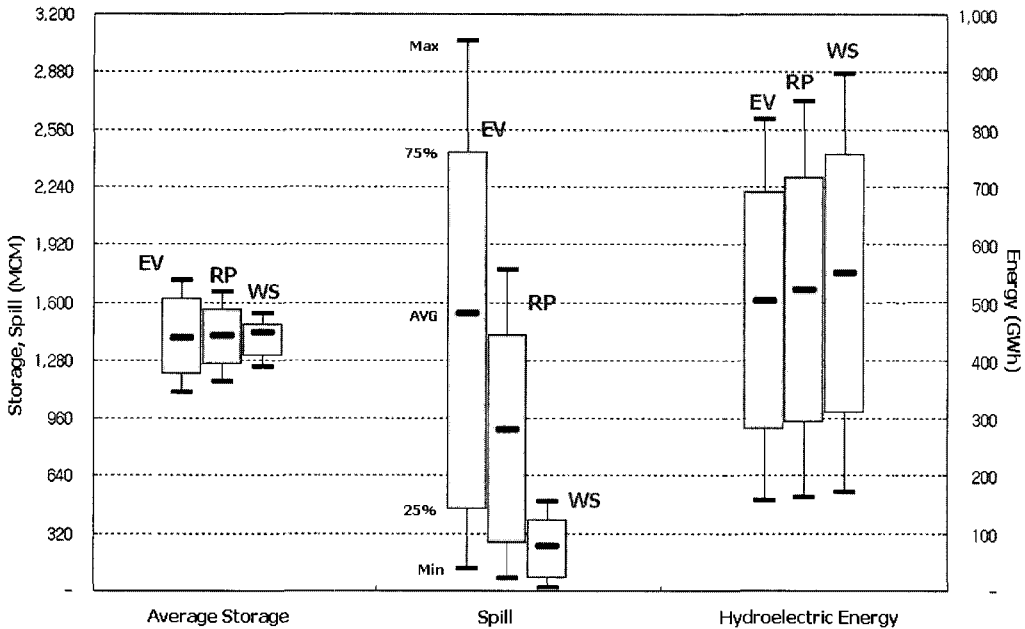


그림 7. 추계학적 모형 효과 분석을 위한 모의운영 결과에 대한 Box Plot

계운영 모형, CoMOM이 이론대로 실제로도 좋은 결과를 낼 수 있다'가 합리적 결론이라는 것을 보여주는 것이다. 여기서 한 가지 주목해야 될 것은 불확실성이 존재하므로 어차피 변동 폭이 존재하는 것을 막을 수는 없다는 사실이다. 그러므로 최악의 경우엔 나쁜 경우가 나올 수도 있지만, 평균적으로 항상 좋은 결과를 내어 주고 있으며, 그 변동 폭을 미리 가늠하여 합리적인 대응을 할 수 있고, 유입량 예측의 정확도에 따라서 그 변동 폭이 적어지고 결과도 좋아질 수 있다는 사실이다.

3.6 최적화 기법의 현실 적용을 위한 제언과 결어

최적화 기법의 현실 적용을 위한 제언을 마지막으로 수자원 공학과 최적화 기법에 대한 세 번에 걸친 강좌를 마무리 하려 한다. 효율적인 최적화 모형을 개발하기 위해서는 현실을 어느 정도 단순화 시키는 과정이 필요하다. 그러나 너무 단순화 시키면 모형의

수립이 쉽지만, 현실과는 동떨어진 결과를 도출 하게 되며, 반대로 현실을 최대한 세세하게 기술하도록 하면, 모형은 복잡해져서 자료 수집관리가 어려워지고, 모형을 수립하고 해를 도출하는데 많은 어려움이 따르게 된다.

예를 들면, 발전량을 계산하는 문제 자체는 저수량에 따라 결정되는 수두와 발전 방류량의 곱으로써 비선형 구조를 갖게 되므로, 발전량과 저수량이 함께 결정되어야 한다. 하지만, 실제 대규모 수력발전의 경우, 이 결정은 수력발전에 활용될 수력 터빈 선택의 문제와 결부 되어 있다. 그리고 터빈 선택의 문제는 전력망에 연계되어 있는 원자력, 화력 등의 다른 발전형식의 발전조합에 따른 power dispatching 과 unit commitment scheduling 문제와 닿아 있다. 이를 정확하게 반영하기 위하여 대규모 혼합정수 비선형 계획 문제를 풀어야 한다. 그런데 이 경우는 가능해를 구하는 것도 쉽지 않게 된다. 그러므로 좀 더 현실적인 결과를 도출하기 위해서는 모형이 다룰 문

제의 범위를 정하고, 적절한 근사(approximation) 방법으로 근사 해를 구한 후에 모의 운영 모형을 이용한 사후 분석 등으로 보완 할 수 있다. 즉, 현실을 모형에 모두 반영하기 보다는 현실적인 목표에 주안점을 두고 모형을 수립하여 나가야 할 것이다.

한편 최적화 모형은 목적 함수의 구성과 목적함수 계수 결정에 대체로 민감하게 반응한다. 따라서 분석하고자 하는 대상이 생산 및 재고 관리나, 자원배분 또는 시설확충, 승무원 일정계획 등과 같이 중장기 계획수립 및 일정관리에 관련된 서비스 수준을 정하는 문제가 아니고, 실시간 시스템 운영을 추구하는 문제라면, 목적함수 구성 시에 정확한 자료를 구하기 어려운 비용이나 이득 중심으로 단일 목적함수를 구성하는 것 보다는 보다 운영 성과를 객관적으로 표시해주는 특정 지표나 시스템의 기능적 효율을 최대화시키는 다중 목적함수로 구성하는 것이 낫다. 현실은 항상 변화하므로 활용될 자원의 기회비용도 변한다. 따라서 단위 비용 또는 이득도 가변적이어서 오늘의 최적해가 내일의 최적해가 아니기 십상이다. 그러므로 성과지표 중심의 다중 목적함수로 구성하여 자료의 불확실성의 일정 부분을 trade-off 분석으로 수용하여 열등하지 않은 해 (non-inferior solution) 로 구성된 파레토 프런티어(Pareto-frontier)를 구하고, 이 해들 간의 경제적 이득을 사후 비교해 최적 대안을 선정하는 것도 좋은 전략임을 강조하고 싶다.

최적화 모형은 의사결정을 바로 내려주는 프로그램이 아니라 실무자의 판단을 지원해 주는 의사결정 지원도구로서 실무자의 시스템 운영에 대한 통찰력을 높이고, 경험의 지평을 넓혀준다. 그렇게 되기 위해서는 실무자의 운영 목표와 의지를 정확히 반영해 줄 수 있도록 개발자와 실무자의 끊임없는 토론과 의견 공유와 현실 적용에서 발생하는 문제를 꾸준히 반영하는 피드백(Feedback) 과정이 있어야 한다. 미국의 캘리포니아 수자원 국에서는 수십 명의 쟁쟁한 박사급 인력으로 독립된 '모델 지원부서'를 운영하여 지속적으로 모형을 관리 개선하고, 수자원 정책담당자에게 수시로 정책 조정 및 조언을 하게 한다. 물론 웬

만한 선진국 일반 대기업에는 OR 부서나 기획조정실이 그런 역할을 담당한다. 우리나라 수자원 담당국도 그와 비슷한 전문 지원부서의 확대 내지 신설이 필요하다. 시뮬레이션 위주로 계획을 꾸리는 것은 스스로 한계를 정하고 그 속에 안주하여 더 나은 대안을 포기하는 무사 안일을 추구하는 방법이다. 최적화기법을 꾸준히 개발하고, 활용해서 정책 결정에 필요한 보다 나은 대안을 제시하도록 해야 한다. 그리고 개발된 모형에 대한 꾸준한 개선 및 관리 그리고 실무자 교육이 이루어져야 진정한 수자원의 최적 활용을 통한 업무개선이 이루어 질 수 있을 것이다.

수자원 분야에 대한 최적화 기법의 활용은 저조한 편이다. 그 이유는 아마도 학부기간 동안 그 주제에 충분히 노출될 기회가 없었던가 아니면, 시뮬레이션 모형이 더 쉽고 친근하게 느끼기 때문일 것이다. 최적화 주제에 익숙하지 않은 일반인에게는 최적화 모형이 시뮬레이션에 비해서 직관적인 호소력이 떨어지는 것은 사실이다. 선형계획만을 두고 보면 선형성에 내재된 단점으로 인하여 제시되는 최적해 자체의 유연성이 떨어질 뿐, 모형수립의 유연성까지 떨어진다 고 볼 수는 없다. 선형계획 최적해의 비유연성은 비선형문제를 선형화시키고, 다중 목적 선형 계획법을 활용하면 상당히 극복될 수 있다. 혼합정수를 잘 활용하면 ELECTRE-1S 와 같이 해법이 복잡하여 시뮬레이션 모형이 아니면 안 될 것 같은, 다 기준 의사결정 문제까지도 최적화 모형으로 구성하여 분석을 단순화 시킬 수 있다 (박석영 등 2005, Jaehee Kim et.al. 2006). 직관적인 호소력 부족문제도 주어진 입력상황에 따라서 달리 언어지는 결과의 타당성을 비교 분석하게 함으로써 극복할 수 있을 것이다.

이제 끝을 맺을 차례다. 나름대로 최적화가 추구하는 내용과 최적화 기법에 내재된 한계를 감안한 현실적 응용의 방식을 보여주고자 노력했지만, 지면 제약과 능력의 한계로 충분한 설명도 못하면서 독자의 심기만 불편하게 한 것 같아서 한편으로 죄송스럽다. 그러나 지식 기반사회가 발전해감에 따라서 최적화 기법의 응용은, 겉으로는 잘 드러나지는 않지만, 앞

으로도 더욱 더 발전해 나갈 것이다. 세계 주요 지식 기반 용역업체 (교통, 수송, 건설관리, 물류, 재무 및 투자설계 컨설팅 포함)의 전문성과 깊숙이 엮여서 계속 성장할 것이다. 차제에 일반 대학이나 대학원의 교과 과정에 경제성 분석과 연계된 최적화 응용에 대한 교육과정이 좀 더 강화되어 많은 관심과 활발한 응용이 있길 바란다.

참고문헌

- Birge, J. R. and Louveaux, F., (1997), "Introduction to Stochastic Programming.", Springer Verlag.
- 김승권, 박영준(1998), "댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형", 한국수자원학회논문집, 31(6), pp 779-793.
- 김승권 (2004). "낙동강수계 일별 최적운영모형 개발 보고서", 한국수자원공사.
- Kim, S. K., Lee, Y. D., Kim, J. H., and Ko, I. H.(2005). "A multiple objective mathematical model for daily coordinated multi-reservoir operation", Water Science and Technology: water supply, 5(3-4), pp 81-88.
- 박석영, 김재희, 김승권 (2005) "ELECTRE 1S의 구현시 일치판정 기준비율 도출과 핵심대안 선정을 위한 혼합정수계획 모형", 대한산업공학회지 Vol.31, No.4, pp.265-276.
- Jaehee Kim, Sheung-Kown Kim (2006). "A CHIM-based interactive Tchebycheff procedure for multiple objective decision making," Computers & Operations Research 33 pp 1557~1574.
- Jaehee Kim, Yongdae Lee, Sheung-Kown Kim (2006). "A Mathematical Model to Implement ELECTRE 1S for Coordinated Multi-Reservoir Operation", The Proceedings of the 7th International Conference on Hydroinformatics 2006, Nice, FRANCE, ISBN 81-903170-5-9, Vol.4, pp 2733-2740.
- Yongdae Lee, Sheung-Kown Kim, Ick Hwan Ko (2006). "Multistage Stochastic Linear Programming Model for Daily Coordinated Multi-Reservoir Operation", (working paper).