

# 수자원 공학에서의 최적화 기법의 활용 (I)



**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 상당이 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 앞으로 세 번에 나누어서 정리해 본다.

## 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

## 1. 수자원 공학과 최적화

### 1.1 수자원 공학이란?

일반적으로 공학이란 수학과 자연과학의 지식을 응용하여 자연의 물질과 힘을 경제적으로 활용하는 방법을 개발하고 연구하는 전문분야이다. 즉, 실험연구 및 실무로부터 얻어진 과학과 수학을 응용하여 경제적 효용이 있는 시설 및 제품을 설계하고, 서비스를 만들어 지속적으로 유지하게 함으로써 인간이 운택한 문화생활을 영위하도록 돕는다. 그 중에서 수공학은 인간의 생존에 필수적인 물을 다루는 공학으로서 물의 자연 순환 주기 (hydrologic cycle) 내에서 자연 환경적인 요소들을 최대한 고려하여 깨끗한 물을 확보하고, 지속적으로 공급할 수 있는 시스템의 구축과 관리 방법을 연구하는 학문이다. 과학자가 이

제까지 축적된 인류의 체계적인 지식에 새로운 지식을 추가하고 보편적인 자연법칙을 발견하는데 희열을 느낀다면, 엔지니어는 새로운 지식의 생산도 하지만, 그 보다는 지식을 특정 상황에 응용하여 설비나 제품을 만들고, 서비스 체계를 구축하여 인류의 복지에 직접적인 기여를 하는데 더 많은 기쁨을 누린다. 그러므로 수자원 공학 분야에서는 물을 저장하고, 운송하는 과정에서 물 운동 및 위치에너지를 적절히 제어함으로써 급격한 물 흐름이 발생하여 수자원 공급 및 수송시설이 손상되지 않도록 수자원 시설 설계 및 유지관리에 관련된 연구를 한다. 그리고 지속적인 수자원 확보와 유지 관리가 이루어지도록 서비스 시스템의 신뢰성과 효율 극대화를 위한 운용관리 시스템 개선에 대한 연구도 한다.

자연환경의 속성상 깨끗한 물은 지리적으로 시간적으로 특정 지역에 지표수 및 지하수 형태로 분산되어 있고, 최대 공급 가능량도 한정되어 있다. 따라서 효율적으로 운영관리가 이루어지려면 시기적, 지역적으로 분산된 수자원의 수요와 공급이 원활하게 연계되어서 물량이 넘치지도 모자라지도 않고 최상의 수질이 유지되도록 해주어야 한다. 그를 위해서 저수 및 공급을 위한 구조물이나 설비를 최적으로 설계, 건설하고, 서비스의 유지 관리비용이 최소화 되도록 법적, 제도적인 서비스 체계를 구축하여야 한다. 따라서 엔지니어에게 효율이나 최적화에 대한 개념은 아무리 강조해도 지나침이 없다.

### 1.2 경제적 효율과 최적화

여기서 수자원을 효율적으로 공급하고, 최소 비용으로 유지 관리해야 한다는 것은 '최적화' 라는 주제와 아주 깊은 관련이 있다. 효율적으로 공급해야 한다는 뜻은 투입량에 비해서 산출량이 더 커야 한다는 의미이고, 유지 관리비용이 최소로 들게 하기 위해서는 서비스를 받기 위해서 투입시켜야 하는 비용 유발요소를 최소한으로 억제하고 편익 산출요소를 극대화해야 한다. 그러나 물리적으로 산출량이 투입되는

양 보다 클 수는 없다. 다만 산출되는 것의 경제적 가치가 투입되는 가치에 비하여 클 수 있을 뿐이다. 따라서 효율적인 설계나 운영이란 투입되는 자원의 경제적 가치에 비해서 시스템운영 또는 서비스의 결과로 나오는 산출의 가치가 더 커지도록 하는 것을 의미한다. 양수 발전을 예를 들어 보자. 상부 저수지에서 발전 터빈을 통하여 하부 저수지로 흘린 물을 다시 펌프를 사용해서 상부 저수지로 퍼 올린다면, 그 과정에서 소요되는 에너지를 감안한 물리적인 효율은 캘리포니아의 Oroville댐 양수 발전의 경우, 대략 67% 정도 밖에 되지 않는다. 그러나 양수된 물을 에너지 가치가 극대화 되는 첨두발전 시점에 흘려서 발전에 활용함으로써 효율이 100%가 넘는 경제적 이익을 얻을 수 있다. 여기서 의미하는 통상적인 효율이란 경제적 효율을 의미한다. "최적화"는 경제적 효율이 가장 커지도록 하는 대안을 제시하고 선택하는 것이다.

### 1.3 한계 비용과 기회비용

한계 비용(marginal cost) 또는 증분 비용(incremental cost)이란 어떤 프로젝트를 수행할 때 추가로 한 단위 더 생산할 때 또는 한 단위 덜 생산할 때 소요되는 비용으로서 적정 생산량의 크기를 결정할 때 필요한 정보이다. 이에 비하여 평균 비용(average cost)은 총 생산비용을 총 생산량으로 나눈 값으로서 한계비용에 비하여 자료수집이 훨씬 더 용이하지만, 과거 자료를 기준으로 얻어지므로 프로젝트의 경제성 평가를 위해 적절한 정보를 제공한다고 볼 수 없다. 규모의 경제(economies of scale) 관점에서 볼 때, 증분 투자이익이 증분 투자비용보다 큰 범위 내에서는 투자 규모를 가능한 범위 내에서 최대한 늘려서 투자를 하는 것이 경제적 효율을 최대로 하는 대안을 선정하게 한다. 마찬가지로 여러 가지 대안들 중에서 최선의 대안을 선택해야 할 경우는 소요 비용이 제일 작은 것에서부터 큰 것을 나열하여 그 순서대로 대안들 간의 증분 투자이익이 증분 비용을 초과

하는 대안을 반복적으로 비교 선택하여 마지막으로 선택되는 대안을 선정해야 한다. 이는 의사결정자의 형편에 따라서 정해지는 최저 수익률 (minimum attractive rate of return) 아래로 내부투자 수익률 (internal rate of return)이 떨어지기 전까지는 기회비용의 관점에서 지속적으로 투자를 늘리는 것이 최선이라는 것과도 상통한다. 그리고 이것은 미시 경제학에서 말하는 한계수입이 한계비용과 같아 질 때 최적해가 도출 된다는 것의 다른 표현이다.

프로젝트의 올바른 경제성 평가는 프로젝트 수행으로 미래에 발생될 기회비용이 얼마인지를 파악할 수 있어야 가능하다. 기회비용은 어떤 자원을 특정 용도에 사용하게 되면, 다른 용도로 사용함으로써 얻을 수 있었을 이득을 얻지 못 하게 되므로 그 잃어버린 이득이 비용에 해당한다는 뜻이다. 따라서 현재 용도로 사용하는 것이 더 좋은지, 아니면 다른 용도로 사용하는 것이 더 좋을지를 평가하는 기준이 된다. 즉, 잃어버린 기회에 투자 했었다라면 얻을 수 있었던 이득을 얻지 못 함으로써 잃어버린 이득은 비용으로 간주되어야 한다는 뜻이다. 어떤 대안의 편익이 소요되는 비용 보다 커야 된다는 효율의 정의를 상기 해 볼 때, 효율적인 의사결정이란 결국은 차선의 대안에 비해서 현 대안을 선정함으로써 추가되는 단위 비용 대비 추가 편익 (추가 편익의 추가 비용에 대한 비율이 1 보다 큼)이 더 큰 값을 제공하는 대안을 선정해야 최선의 대안을 선정할 수 있다는 말이 된다. 이는 증분 투입 비용 보다 증분 편익이 더 작아지기 전까지는 지속적으로 더 나은 대안을 찾아 가는 '증분 투자 분석'의 논리적 기반이 되며, 의사결정시 취할 수 있는 여러 가지 대안들 중에서 결국은 가장 효율적인 최선의 대안, 즉 순수 편익이 가장 큰 대안을 선택하게 한다. 한계비용은 추론되어야 한다. 그러나 그 한계비용을 찾아낸다는 것은 아주 어려운 작업일 수 있다. 실제로 비용자료는 회계 장부상에 나타나는데 대개는 총 비용이나 평균비용이 나타나기 때문이다. 그러나 통합 시스템적인 수학적 모형 수립을 통한 분석을 하게 되면, 추가되는 대안 선택에 따른 기

회비용분석이 내재되므로 대안별로 따로 한계비용분석을 할 필요가 없게 된다. 다만 전체적인 경제성 척도를 표현하는 과정에서 한계비용 산정에 영향을 미치는 비용요소들이 포함되어 모형이 수립되도록 하는 것이 중요하며, 수립된 모형을 효과적으로 풀 수 있게 하는 적절한 해법을 선택하여 최적 해를 구하면 된다. 선형계획 해법의 속성에 대한 것은 뒤에 설명 하겠지만, 모형을 적절히 수립하면, 개념적으로 볼 때, 선형계획 해법에서 증분 투자 분석의 논리적 기반이 내재되어 있음을 알 수 있다. 따라서 비선형적인 요소를 선형화하는 문제만 해결되면, 선형계획 (Linear Programming)과 같은 최적화 모형을 활용하면 저절로 합리적인 의사결정을 할 수 있게 된다. 선형계획법에서는 일단 구해진 가능 해(feasible solution)를 중심으로 기저변수(basic variable)를 선정하여 단위 증가분에 따른 목적함수 값에의 기여도를 산정하고, 목적함수 값에의 기여가 최대로 될 때 까지 증가시켜서 새로운 가능 해를 구하고, 최종적으로 더 이상 증분 편익 (reduced cost)이 발생하지 않을 때까지 기저변수를 바꾸어 가며 최적 해를 구한다. 이런 해법을 단체법(simplex method)이라 하는데, 이 해법의 전개과정이나 선형계획법의 쌍대 최적해 (dual optimal solution)가 의미하는 shadow price와 원 최적해 (primal optimal solution)의 관련성(weak and strong duality condition)에 한계이득이 한계비용과 같아 질 때 최적해가 도출 된다는 한계 비용의 최적화 개념이 숨어 있다. 결국은 증분 투자 분석과 기회비용의 관점에서 최선의 대안이 가장 경제적 효율이 높은 대안이 된다. 그러므로 최적화를 목표로 하는 모든 수학적 기법은 결국은 모형에 의해서 표현될 수 있는 모든 가능해(feasible solution) 중에서 가장 효율적인 해를 구하는 방법이다.

#### 1.4 객관적 평가의 기준과 파레토 최적해

평가 기준에 객관성이 결여 되면 분석의 결과에 신

되를 보낼 수 없다. 따라서 객관적인 분석 및 평가가 되려면, 분석과 평가도 모형을 활용할 당사자가 수궁하는 어휘나 방식으로 표현될 수 있어야 한다. 필자는 UCLA에서 수자원시스템 분석 관련 학위를 마친 후, 미국 시카고에 있는 HARZA 라는 수자원 및 에너지 개발 컨설팅 회사에 근무하며 여러 가지 프로젝트를 수행해 보았다. 그중에서 알제리아의 Beni Harun 수자원 공급 타당성 조사를 위한 소규모 프로젝트에 참여하여 용수 공급을 위한 유효저수용량을 sequent peak 방법으로 산정한 적이 있었다. 지금부터 25년 전 당시에는 컴퓨터 보다는 계산기가 사용되던 시기였다. 그런데 나는 당시로서는 최신인 IBM PC 용 스프레드 시트 소프트웨어인 LOTUS 123에 관심이 많아서 스스로 그 사용법을 익혀 Lotus 123로 유효저수 용량을 계산해서 그 결과를 불란서 출신의 나이가 꽤 많은 시니어 엔지니어에게 보고한 적이 있었다. 사실 스프레드 시트 계산방식은 단위 셀과 셀간의 계산관계식이 정확하지, 그리고 반복되는 식의 상대적 셀 주소와 절대적 셀 주소가 정확하게 표현되었는지만 검증해 보면 전체 계산 결과의 정확성을 담보할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 그 시니어 엔지니어가 내 분석 결과의 정확성을 검증하기 위해서 자신의 방식으로 만들어진 계산용 테이블에 값을 적어 넣고, 다시 계산기로 두두려 가며 일일이 내 결과를 검증하였다. 계산기 두두리는 속도가 엄청 빨라서 놀랍고 신기하기도 했지만, 실소를 금할 수 없었다. 그 당시는 PC가 세상에 처음으로 등장한 시점이고 스프레드 시트 계산 방식이 보편화되기 전이므로 이해는 되었다. 사람은 자신에게 익숙한 계산방식으로 비교해 보지 못하면 그것이 스프레드 시트 처럼 수식 계산이 객관적이고 정확한 것에도 신뢰를 주지 못한다. 분석의 타당성을 평가할 때도 결과를 도출한 방법론의 가설과 결론을 이어주는 논리적인 체계를 이해하고 받아들여서 납득하기 보다는 자신에게 익숙한 사고의 체계라는 프리즘을 통해서 드러나 보고 판단하고자 하는 것이 일반적이다. 그렇게 하지 못하면 불안 해 하고, 분석 결과를 신뢰하지 못한다. 언어가

통하지 않으면 원활한 의사소통이 되지 못하는 것처럼, 분석 방식에 소용된 방법론에 대한 이해가 부족하면 분석의 결과를 납득하는 것도 어렵다. 설사 방법론을 알고 있더라도, 모형 수립 방식에 의견일치를 보지 못하고, 입력 자료에 신뢰를 주지 못하면, 분석 결과를 쉽게 받아드리지 못한다.

최적화의 결과도 누구의 입장에서, 어떻게, 어떤 방식으로 모형이 수립되어서 산출되느냐에 따라서 분석의 결과는 물론 의미가 달라질 수 있다. 최적화 방식으로 구해진 해는 대체로 시뮬레이션 결과에 비해서 부자연스럽고 유연하지 못하다. 그 이유는 단일 목적 최적해의 비타협적 특성과 최적화 선형모형 해법에 내재된 한계에 기인한다. 최적화 모형의 결과는 활용된 목적함수나 제약식이 얼마나 포괄타당성 있게 구성되어 있는가에 영향을 많이 받는다. 특히 목적함수의 계수는 단위 의사결정 요소 당 소요되는 비용 또는 이득이나 경제적인 가치이므로 프로젝트의 한계 비용을 결정짓는데 많은 영향을 미치게 되는데, 개인 별로 또는 의사결정 주체별로 견해가 다를 수 있고 최적해가 목적함수 계수에 대체로 민감하므로 계수 선정에 상당한 주의를 기울여야 한다. 양수 발전의 경우처럼 객관적 입증이 쉬운 분야가 아니면, 효율적인 관리나 운영이란 측면에서 단위결정 요소 당 경제적 가치에 대한 의견 일치를 보기가 쉽지 않다. 따라서 단위 의사결정 요소 당 이득이나 경제적인 가치가 정확하게 산정될 수 없다면, 사후 민감도 분석으로 보완하는 것 보다는 모형 수립 단계에서 모든 사람이 동의할 수 있는 객관적인 시스템 성능이나 기능에 관련된 요소를 중심으로 다중 목적함수를 구성하여 먼저 파레토 최적화한 이후 경제성 평가를 사후에 하는 것도 한 가지 방법이 된다. 사후 경제성 평가를 할 경우는 파레토 최적 (Pareto-optimal) 에서 선택된 해 각각에 대한 경제적 이득을 비교하여 Trade off 분석을 하면 된다. 의사 결정자가 그룹이라면 파레토 최적 (Pareto-optimal) 에서 선택된 해들을 중심으로 여러 사람의 생각을 듣고 동의를 이끌어 낼 수도 있다. 어떤 경우건 각 목적들이 모두 고려된 열등하

지 않는 해 (non-inferior solution), 즉 다른 목적 값을 저하시키지 않고는 어느 하나의 목적 값을 개선시킬 수 없는 파레토 최적 (Pareto-optimal)를 구하여야 한다. 파레토 최적하는 수가 많기 때문에 정해진 평가 기준에 따라 추가로 선별되어야 한다. 평가 기준이 약간 모호하여 “a가 b보다 나쁘지 않다” 등의 유사선호 관계로 나타내어야 한다면, ELECTRE 나 PROMETHEE, 구성 요소 간에 상관관계가 존재할 경우는 AHP보다 ANP를 활용하여 선택한다. 의사결정자들 간에 평가 기준 선택에 의견의 일치를 보기 어려운 경우가 있다면 그룹 의사결정이 필요하게 된다. 그럴 경우는 각 의사결정자들의 주관적인 평가를 효율적으로 수렴시켜 합의안을 찾는 여러 가지 그룹 의사결정 기법을 활용한다. 이 모든 경우의 중심에는 파레토 최적 (Pareto-optimal)해가 있다. 서로 다른 상충되는 목적들 간의 Trade off 분석을 위한 파레토 최적해를 구하는 법에 대한 논의는 뒤로 미룬다.

### 1.5 수자원 시스템과 최적화 모형

수자원 시스템을 개발 또는 운영하기 위해서는 매 단계 마다 많은 의사결정 과정이 필요하다. 운영관리 상에서 접하게 되는 의사결정 문제들은 시스템적 측면에서 의사결정(human decision making) 모델을 수립하여 컴퓨터를 활용한 분석을 한다. 수자원 공급을 위한 물리적 체계나 제도적인 모든 것은 하나의 시스템 또는 체계로 볼 수 있다. 수자원 공급에 지속적으로 관여하여 하나의 목표를 가지고 서로 유기적인 관계를 맺는 모든 요소들과 각 요소를 움직이는 일관된 운영규칙을 수자원 시스템이라고 정의 할 수 있다. 작계는 물을 양수하여 저수조에 담아 일정한 수압을 유지시키고 시간에 따라 균일하게 공급하기 위해서 수도관을 통하여 공급하는 일련의 용수 공급 과정으로부터 크게는 강우로부터 시작하여 하천을 이루고 바다로 수증기로 그리고 다시 강우로 이루어지는 물 순환 체계도 하나의 시스템이다.

수자원 시스템과 관련된 최적화는 의사결정 전 과

정은 물론이고, 매 단계마다 최소한의 비용 또는 노력으로 최대한 효과를 내도록 하는 과정이라고 할 수 있다. 여기서 최적화의 의미는 주어진 목적을 달성하기 위해 가능한 모든 대안들로부터 목적 달성을 가장 잘하는 대안을 선정하는 것이다. 이 때 활용되는 최적화 모형은 그 구성이 아주 단순하다. 최적화를 위한 수학기호를 구성을 하기 위해서는 우선 최적화를 이루어 내려는 목적을 분명히 해야 하고, 그 목적을 달성하기 위해서 무엇을 결정해야 하는지 그리고 정해진 목적을 달성하는 것을 저해하는 제약 요인들이 무엇인지를 파악해야 한다. 구체적으로 무엇이 결정되어야 하는지 결정하고자 하는 의사결정 변수가 정해지면, 구하고자 하는 목적함수의 형태가 정해진다. 그리고 정해진 목적을 달성하는데 시스템 구성 요소들이 어떤 방식으로 목적 달성을 저해를 하게 되는지를 설명하는 제약 식들이 정해진다. 목적을 달성하는데 방해하는 모든 요인들을 피하면서 만들어 낼 수 있는 모든 대안들을 가능해 집합(feasible set)이라고 한다. 최적화를 한다는 것은 얻을 수 있는 모든 가능해 집합에서 목적함수 값을 가장 크게 해주는 결정 요소가 취할 값이 얼마인지를 정하는 것이다. 여기에 목적함수가 하나 이상이 되면 다중 목적을 가진 벡터 최적화 문제가 되며 이 경우의 최적 해는 파레토 최적해가 된다. 개념적으로 파레토 최적해는 다중해의 생성공간 (production frontier)에서 포괄면(data envelopment)을 이루게 된다. 이 같이 계량 분석을 위해 최적화 모형을 세우고 그 모형을 통하여 분석을 하는 것이 구미 선진국에선 컴퓨터가 발달하기 시작한 1970년대 초부터 아주 보편화 되어 있었다.

### 1.6 최적화 모형의 활용 예

다시 25년전 HARZA 라는 수자원 및 에너지 개발 컨설팅 회사에 근무하며 수행했던 프로젝트를 경험을 최적화 모형 활용의 예로서 소개한다. 그 당시의 대개의 분석 업무가 시뮬레이션 위주의 분석 연구였지만, 최적화 모형을 사용하여 수행했던 몇 가지 프로

젝트 예를 들어서 설명하려 한다. 1981년 당시에 미국 알래스카 주는 2012년경엔 지하에 매장된 천연가스가 고갈이 된다는 예측이 있었다. 그래서 Kuskokwim강 유역의 베텔(Bethel) 지역을 중심으로 반경 약 200-300 Km 에 위치한 Tuluksak, Akiak, Eek을 위시한 12개 마을의 난방 및 전기 공급을 위한 전력 에너지 공급 계획 수립을 위한 대안을 제시하는 프로젝트를 수행하게 되었다. 그 프로젝트는 난방을 위한 전력에너지를 안정적으로 공급하기 위해서 어느 지역에 어떤 형태의 전력공급 시설을 언제, 어떤 시설용량으로 건설해서, 어떤 경로에 어떤 용량의 송전 선로를 언제 건설하여 전력을 공급하는 것이 전력 공급의 LOLP(Loss of Load Probability)를 적게 (신뢰성을 높게)하면서도 운영 유지비와 건설비를 최소로 하는 대안 인지를 찾아 제시하는 것이었는데, 이 같은 대안 산정을 위해서 최적화 모형이 사용되었다.

이 같은 문제를 분석하기 위해서는 분석 기간 동안, 각 지역별 인구 및 생활환경의 변화를 예상하여 첨두 전력 및 에너지 (Peak Power & Energy) 수요 변화를 대략적으로 예측하고, 예측된 전력 수요를 만족시키기 위해서 수력발전, Diesel, Fuel Cell, Coal fired steam, Combined Cycle, Wind Energy (핵연료 처리 문제로 Nuclear Plant는 제외됨) 등의 다양한 대체 발전 형식을 고려해서 언제 어느 지역에 어떤 형식의 발전 설비와 송전 선로를 얼마만한 용량으로 건설해서 전력 공급을 해야 각 지역의 난방 에너지 수요를 최소의 할인 비용으로 담당하게 할 수 있는가를 찾아내어야 했다. 이 같은 문제는 전형적인 시설용량 확장문제이다. 건설하느냐 마느냐를 결정하는 결정변수로 혼합정수가 필요하게 되므로 혼합정수 네트워크 흐름 모형을 구축하여 분석하면 된다. 모형이 구축되면 할인율, 인플레이션을 같은 경제적인 변수와 배럴당 원유가격 같은 불확실한 요소들을 감안해서 여러 가지 시나리오별 대안들을 생성해 낼 수 있을 것이다. 물론 이 과정에서 다양한 전력 에너지 공급원들 간의 형태별 조합에서 야기

되는 전력 공급의 신뢰성 문제가 대두된다. 전기 공급의 신뢰성 문제는 전력 수요 변동과 발전설비의 정비 계획과 설비 운영을 위한 연료비의 증분 분석에 따라 정해지는 발전 설비 운영 조합을 고려해야 하고, 발전설비 투입 순서에 따라 산정되는 LOLP를 산정해야 하는 좀 복잡한 시뮬레이션 (convolution) 분석이 소요된다. 따라서 이 부분은 신뢰성 분석 모형의 기술이 필요한 부분으로서 따로 분석을 해야 하는 경우도 있다. 그러나 그 당시는 혼합정수 계획법에 대한 이론만 정립되어 있었을 뿐, 분석을 위해 동원할 수 있는 응용 소프트웨어가 별로 없었고 (현재의 가용한 응용 소프트웨어 수준으로 보면 풀기가 어렵지 않은 문제이지만) 컴퓨터의 성능도 지금에 비하면 별 볼일 없었다. 그 당시에도 이 같은 문제 해석에 동원 될 수 있는 모형으로 WASP(Wien Automatic System Planning Package) 라고 하는 DP 기반 발전 설비 확충 분석 프로그램도 있었지만, 원자력 위주의 프로그램이고, 수력발전 부분을 화력발전과 동일하게 취급하는 단점이 있었고, LOLP 신뢰도 산정 방법의 문제점과, 지역간 송전설비를 고려한 시설 확장 문제를 분석하기 어려웠다. 더욱이 당시 회사의 Harris라는 미니 컴퓨터 하드웨어 능력에도 벽차서 제외시켰다. 또 CERES (Capacity Expansion and Reliability Evaluation System)라고 하는 IDP (Incremental Dynamic Programming) 기반 동적계획 모형이 있었지만, 그 모형은 논문 연구수준의 단순한 모형으로 개략적이고, DP 에 내재된 'curse of dimensionality' 문제와 더불어 자료 관리상 현실성이 떨어져서 포기하였다. 결국, 프로젝트 수행 기간도 짧고, 소프트웨어 동원 능력과 컴퓨터 자원이 한정 되어 있던 당시로서는 달리 방법이 없어서 가장 손쉬운 선형계획을 사용했다. 대신 발전 형태와 송전범위 (local, subregional, central 등)에 따른 지역을 그룹으로 나누고, 여러 가지 난방 수요 변동 가능성 시나리오를 미리 만들어 특정 지역에 같은 대용량 발전 설비를 도입할 경우 Central Diesel Plant가 설치되는 지역으로부터 각 지역을

연결하는 송선 선로 건설비 (cost of interlink) 등을 고려해서 분석했다. 그리고 GE에서 개발한 에너지 공급의 신뢰성을 평가할 수 있는 OGP (Optimized Generation Planning) 라는 최적화 기반 시뮬레이션 프로그램을 반복적으로 사용하는 힘든 작업을 통하여 대략적인 결과를 내는 것으로 만족할 수 밖에 없었다. 최적화 모형을 활용한 분석 방향은 지역적으로 분산되어 투자되는 시설용량의 economies of scale 효과와 그에 따라 정해지는 시설투자비의 시간적인 가치와 연간 운영유지 및 연료비용의 시간적인 가치 사이의 절충점을 찾는 문제로 귀결 되었다. 즉 분석기간 동안 작은 크기의 시설로 여러 번 나누어 지역별로 분산 투자하느냐, 아니면 크게 한꺼번에 서너 곳에 집중해서 시설투자하고 생산되는 전기 에너지를 분배하여 쓰는 것이 유리한가에 대한 것을 정하는 문제가 된다. 이처럼 경제적 효율을 중시하는 하는 최적화 모형은 시 공간 적인 시설투자비와 소요되는 운영비간의 trade-off 분석을 대행해 준다. 이 프로젝트는 얼마 후에 난방 및 전력

에너지 공급을 위하여 앵커리지와 페어뱅크 사이에 위치한 Susitna 강 유역에 Watana 협곡, Devil 협곡, Vee, 그리고 Denali 협곡 등 우리나라 고리 원자력의 1.5배 -2배 정도 용량이 되는 대규모 수력발전 댐 건설을 위한 타당성 조사 용역으로 진화되었다. 그러나 그 프로젝트는 수력 발전시 터빈을 통하여 방류되는 영상의 발전 방류수가 얼음을 녹이고, 얼음 위, 아래로 홍수를 일으켜서 송어 (Salmon)의 휴식 공간을 훼손시키므로 중지 되어야 한다는 환경론자들의 압력으로 댐 건설 계획이 백지화 되었고, 결국 9개월여 동안 많은 인력이 동원되어 분석한 댐운영 시뮬레이션 결과와 OGP (Optimized Generation Planning)를 사용하여 얻은 LOLP를 최소화하는 최적화 기반 시뮬레이션 분석 결과가 소용이 없게 되고 말았다. 그러나 이와 비슷한 문제는 아직도 모형활용의 중요한 대상이며, 과거에 비해서 지금은 컴퓨터 하드웨어는 물론 응용 소프트웨어의 부족이 거의 해소되어서 최적화 모형이 성공적으로 활용되고 있다. 🍀