

## 장기 용수 공급계획 수립을 위한 스프레드 쉬트 모형

### A Spread Sheet Model for a Long Range Water Supply Planning

김 승 권\*

Kim, Sheung Kown

#### Abstract

A mathematical model for a long range water supply planning is developed as a dynamic capacitated facility location problem, in which operating costs and two types of fixed costs are considered. The fixed costs are for water supply systems such as dams and reservoirs and for water conveyance systems of waterways or conduits from each water supply points. A spreadsheet model is developed to support the efficiency of user interface and to implement a heuristic solution procedure. The proposed solution procedure utilizes SOLVER tool and it has been applied to a system with fictitious data but with reality and applicability in mind. As a result of the mathematical analysis, not only the most economic construction timings of surface water facilities and distribution systems but also the most economical water supply operating patterns are identified.

#### 요 지

시스템 분석에 의한 합리적인 長期 用水供給 計劃의 수립을 위하여 動的 立地選定問題의 유형으로 수학적 모형을 정립하였고, 복잡한 혼합 정수계획 문제를 푸는 대신에 스프레드 쉬트를 이용한 간단한 계산모형으로 실제적인 해를 구할 수 있음을 보였다. 분석의 결과로서는 용수 공급시설 및 용수로의 최적의 건설 시기와 기간별 최적 용수공급 운영 양상이 정해진다. 시스템 분석을 통한 합리적인 용수공급 계획의 수립이 주먹 구구식의 계획수립에 비하여 약 15% 정도의 예산 節減 效果가 있을 수도 있음을 사례분석을 통하여 간접적으로 보여준다.

#### 1. 서 론

우리나라가 처해 있는 수자원의 상황은 지속적인 산업발전에 따른 오염원의 증가로 양질의 수자원은 감소하는 반면, 용수 수요의 급격한 증가로 국지별로 심각한 용수난에 직면하고 있다. 또한 유역별로 수

자원의 부존량에 심각한 차이가 있어서 용수 공급 능력의 유역별 불균형이 내재해 있다. 이런 상황에서 적절한 용수의 확보는 절실한 문제이며 다목적 댐과 하구언의 적지를 최대한으로 개발함으로써 용수 공급능력을 제고시키고 유역간의 유로 변경을 통하여 비교적 수자원이 부족한 지역으로 물을 공급할 수 있는 광역 수자원 개발 계획의 필요성이 중요한 과제로 대두되고 있다. 훌륭한 수자원 공급

\*正會員 · 고려대학교 산업공학과 교수

계획은 단위 유역별로는 효율적이고 타당한 용수 공급계획이 되도록 하고 시스템 전체로서는 경제적인 계획이 되도록 하는 것으로서, 시스템 분석을 통한 합리적인 용수 공급계획의 수립은 주먹 구구식의 계획 수립에 비하여 통상 5%로부터 20% 정도의 예산 절약효과가 있다고 알려져 있으므로, 예산의 효율적인 집행이라는 측면과 정보의 가공 활용에 의한 효용의 창출이라는 측면에서도 시스템 분석을 통한 공급계획이 이루어져야 할 것으로 생각한다.

우선 기술하고자 하는 문제의 관점을 보다 명확히, 구체적으로 하기 위하여 고려하여야 할 대상 문제를 정의하여 보자. 시간이 지남에 따라 인구가 증가하고 산업 및 문화의 발달로 물 수요는 여러 곳에서 발생하며 그 수요는 점진적으로 증가할 것으로 생각된다. 현재까지는 기존의 용수 공급량으로부터 각 지역의 용수 수요를 만족시키고 있지만 각 지역별로 증가하는 용수 수요를 충족시키기 위하여 새로운 저수지와 각 저수지로부터 수요지까지의 용수로 건설이 필요하게 된다. 점진적인 수요 증가에 부응하기 위하여 댐 및 용수로의 건설 또는 여유지역으로부터 용수의 차입 등을 고려하여야 하는데, 어떻게 하여야 최소의 비용으로 수요를 만족시킬 수 있는 시설 확장계획을 수립할 수 있는가가 관심의 대상이 된다. 즉, 기존의 용수 공급능력을 확장시키는데 소요되는 고정 비용과 Network으로 표현되는 용수 공급시스템의 운영비용의 합을 최소화시키는 용수 공급계획 수립은 어떻게 하여야 하는가? 장래에 예견되는 용수 부족에 효과적으로 대처하기 위하여는 개발 및 계획 단계에서부터 효율적인 계획이 수립되어야 한다.

본 연구에서는 이 문제를 장기 투자의 관점에서 고찰해 보고 이의 해결을 위한 필수적인 수학적 모형의 수립과 해를 구하기 위한 실용적인 방법에 대하여 기술한다.

## 2. 시설 확장계획 문제의 특성

본 연구의 대상문제는 시설확장문제의 하나로서, 주어진 계획 기간동안 최소비용으로 수요를 만족시키면서 공급지의 용량 확장규모를 결정하는 문제이

며 Manne<sup>(1)</sup> 이래로 Jacobsen,<sup>(2)</sup> Van Roy,<sup>(3)</sup> Erlenkotter,<sup>(4)</sup> Kim,<sup>(5,6,7,9)</sup> Fong과 Srinivasan,<sup>(8)</sup> Song 등,<sup>(9)</sup> Shulman<sup>(10)</sup> 등에 의하여 연구되어 왔다. 시설확장 문제는 동적입지 선정문제로 분류될 수 있다. 동적입지 선정문제는 정적입지 선정문제에 시간적인 고려가 첨가된 문제로서 정적인 문제에 비하여 더욱 문제가 복잡해진다. 일반적인 설비의 입지 선정문제가 혼합정수 계획 모형으로 표현됨을 생각할 때 동적인 문제는 이항 정수 변수의 수가 고려되는 기간수의 배수로 증가하게 되어 계산 수고가 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 일반적인 정수 계획 해법으로는 정해진 시간내에 해를 구하기가 불가능하다. 더우기 수자원 시스템과 같은 현실적인 문제는 수요지와 공급지의 사이를 연결짓는 용수로의 건설이 고려되어 고정비용 부분이 또하나 추가되므로 기존의 입지 선정문제의 모형을 그대로 활용할 수도 없다. 본 문제는 서로 종속적일 수 있는 두 가지 유형의 고정투자비용 요소를 고려해야 한다는 점에서 기존의 연구와 차이가 있으며, 어떤 연구의 결과도 직접적인 적용이 불가능하다.

우선 본 연구의 주제가 되는 최적 시설확장 문제의 특성은 두 가지의 관점에서 파악된다. 첫째는 수요지와 공급지 사이의 물 수송과 그에 따른 서비스를 제공하는데 소요되는 운영비용과 그를 위하여 투자해야 되는 고정 투자비용과의 사이에서 경제적 균형을 찾는 관점이고, 둘째는 규모의 경제성(economies of scale)의 관점에서 한번 투자시 크게 투자하는 것과 자본의 시간적 가치를 보존하고자 투자시기를 최대한 늦추도록 필요한만큼 조금씩 나누어 투자하고자 하는 것과 사이의 균형을 찾는 문제로 파악될 수 있다. 본 연구에서는 이같은 특성을 이용하여 스프레드 슈트를 활용한 시스템 분석방법을 제시한다.

## 3. 수자원 종합개발 장기계획 수립을 위한 계산 사례

수자원 종합개발 장기계획 모형수립 문제는 농어촌진흥공사<sup>(11)</sup>가 수행한 서해안 새만금 지역 수자원 개발과 이용에 관한 연구에도 적용시킬 수 있으며 시스템 분석방법의 설명을 용이하게 하기 위하여

다음과 같이 간략화시킨 가상의 문제를 생각해 본다. 어떻게 개발계획을 세우는 것이 비용을 최소로 하는 계획이 될 것인가? 편의상 단위 계획년을 5년 단위로, 단위기간당 연간 할인율은 10%로 한다.

하천 유역의 용수 수급 계산은 유역의 용수 공급원의 댐저수지 하류의 순 물 소모량에서 그 유역으로부터 공급 가능한 자연 유출량을 제함으로서 계산되며 저수지 운영 조작방법에 의하여 비교적 정확하게 산정될 수 있다<sup>(11)</sup>. 우선 지역별 물 수지 분석을 통하여 각 계획 단위 유역별로 산정된 물 소요량이 표 1과 같다고 한다(단위는 편의상 천만 톤으로 한다).

위의 소요량을 충족시키기 위하여 인근 4개 유역에 용수 공급용 댐 또는 대규모 지하수 취수시설 등을 추가로 건설하고 필요시 각 댐으로부터 수요지까지 용수로도 추가하고자 한다. 이를 위하여 각

유역에서의 연간 물 수지분석과 중 소규모의 용수 공급용 댐건설 후보지들에 대한 저수지 시뮬레이션 모형을 통한 용수공급 가능량을 산정하고 이를 계획기간별로 환산한 결과와 고정 투자비용이 표 2와 같이 산출되었다고 한다. 여기서 확장 가능 단위용량이란 용량 확장시에 확장시켜야할 단위 확장크기로서 실제로 1단위 용량 추가만 필요할 경우라도 확장시켜야할 크기를 말하며(실제로 계획 수립시는 이 크기도 결정되어야 할 것임), 이것은 용수로의

표 1. 단위 유역별로 추정된 물 소요량

유역명	기간	계 획 기 간				
	현재	5	10	15	20	
Ⓐ	15	20	28	28	34	
Ⓑ	15	19	25	33	40	
Ⓒ	15	18	22	24	26	

표 2. 기존 및 추가시설의 용수공급 가능량과 시설별 고정 투자비용

항목 공급지	기존 공급시설로 공급가능한 양	추가 공급시 확장 가능 단위용량	고정투자비 (현재가)
① 공급시설	20	10	800
② 공급시설	15	10	1700
③ 공급시설	5	20	1000
④ 공급시설	5	15	700

표 3. 최대 공급 용량과 단위 공급량 당 운영비 및 고정 투자비용

용수로구간마디 (Arc)	용수로공급용량			단위공급량 당 보수운용유지비 (현재가)	고정투자비 (현재가)
	기존	확장	최대		
①-Ⓐ	0	25	25	60	1000
①-Ⓑ	15	10	25	50	500
①-Ⓒ	5	20	25	70	700
②-Ⓐ	15	5	20	40	900
②-Ⓑ	0	25	25	80	800
②-Ⓒ	0	25	25	60	600
③-Ⓐ	0	20	20	60	600
③-Ⓑ	0	25	25	60	600
③-Ⓒ	5	20	25	30	300
④-Ⓐ	0	20	20	80	800
④-Ⓑ	0	20	20	100	1000
④-Ⓒ	5	20	25	70	700

경우도 마찬가지로 적용된다. 따라서 고정 투자비용은 용량 확충이 필요할 경우 한번에 소요되는 총 건설비로 정의된다(비용 단위도 편의상 천만원으로 한다).

수요지까지의 용수로의 경우, 대체로 용수 공급은 용수로의 최대통수 가능 용량보다는 댐저수지의 공급가능 용량의 제약을 받는다. 하지만 통상 용수 공급계약에 따른 최대 공급가능 용량의 제약이 있으며, 경우에 따라서는 tunnel이나 수로의 크기, 펌프용량 또는 저류지의 크기 등등에 따른 물리적인 제약이 있을 수도 있다. 따라서 용수 공급지로부터 수요지 사이의 통수가능 용량 제약도 고려되어야 한다. 수리 분석결과 얻어진 공급시설의 최대 공급가능용량과 비용분석을 통하여 단위 용수 공급량 당 용수로 보수 및 운영 유지비와 고정시설 투자비용을 산정한 결과가 표 3과 같다고 하자. 여기서 용수로 보수 및 운영유지비는 계산 편의상, 5년 단위기간 동안의 총 비용으로 간주한다.

이제 이같은 문제에 대한 장기 용수공급 계획을 세우고자 할 때 그를 위한 수학적 모형은 어떠한 형태이며 이 문제를 풀고자 할 때 어떤 문제점이 있으며 어떻게 이 문제를 풀어갈 것인가에 대하여 살펴보고자 한다.

#### 4. 수학적 모형의 구성

##### 4.1 기본 가정 및 수학적 모형

본 연구의 모형은 댐의 확장, 건설 또는 새로운 용수로를 설치할 때 고정비가 발생하는 동적 입지 선정 문제 형태로 최소비용 Network flow 문제를 하부문제로 포함하며 다음과 같은 가정을 한다. (1) 각 공급지의 최대공급량, 각 수요지의 수요량, 댐의 확장 및 건설비용, 용수로 설치 비용, 단위운반 및 운영비용은 주어지고, 새로운 댐의 확장규모와 용수로 확장규모는 정해진 범위(확장가능 단위용량)로 이루어진다. (2) 새로운 용수로를 설치하였을시 단위당 운반 및 운영비용은 공급지와 수요지 사이의 용수 공급량에 비례한다. (3) 계획 기간들은 離散的이며 건설에 소요되는 시간은 離散化시킨 범위내에 있다고 보고 무시한다. (4) 계획 기간은 유한하며 설비 및 수요지의 갯수도 한정되어 있다. (5) 수요는 반드시 만족되어야 한다.

이상과 같은 가정하에 본 연구에서 다루어질 문제를 일반적인 수학적 모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$(P) \text{ Minimize } \sum_{i,j,t} C_{ijt} D_{jt} X_{ijt} + \sum_{i,t} f_{it} Y_{it} \quad (1)$$

$$\text{S.T. } \sum_i X_{ijt} = 1, \forall i, t \quad (2)$$

$$\sum_j D_{jt} X_{ijt} \leq E_i Y_{it} + S_i, \forall i, t \quad (3)$$

$$D_{jt} X_{ijt} \leq B_{ijt} + F_{ijt} Z_{ijt}, \forall i, j, t \quad (4)$$

$$Y_{it-1} \leq Y_{it}, \forall i, t \quad (5)$$

$$Z_{ijt-1} \leq Z_{ijt}, \forall i, j, t \quad (6)$$

$$Z_{ijt} \leq Y_{it}, \text{ if } D_{jt} X_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i, j, t, t \neq 0 \quad (7)$$

##### 4.2 변수 정의 및 제약식 설명

$X_{ijt}$  : 계획기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 공급되는 양의  $D_{jt}$ 에 대한 비율

$C_{ijt}$  : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j의 수요를 만족시킨다고 가정할 때 현재가로 계산된 단위 공급량당 총 운반 및 운영비

$D_{jt}$  : 기간 t에서 수요지 j에서의 용수 수요량

$f_{it}$  : t시점에서 댐을 확장 또는 건설할 때 현재가로 할인된 고정비용의 기간 t와 t+1의 차액

$Y_{it} = 1$  : 계획기간 t에서 공급지 i를 확장 또는 건설할 때

0 : 그렇지 않을 때

$g_{ijt}$  : t시점에서 용수로를 설치할 때 현재가로 할인된 고정비용의 기간 t와 t+1의 차액

$Z_{ijt} = 1$  : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 용수로를 설치할 때

0 : 그렇지 않을 때

$E_i$  : 공급지 i에서 댐의 확장가능 단위용량

$S_i$  : 공급지 i에서 기존 댐의 공급용량

$B_{ijt}$  : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 통수기 위한 기존 용수로의 통수 가능 총용량

$F_{ijt}$  : 기간 t에서 공급지 i에서 수요지 j로 통수시 단위기간내 용수로 확장가능 단위용량

문제의 제약식을 살펴보면; (2)는 수요를 반드시 만족시켜야 한다는 조건이고, (3)은 수요지의 수요를 만족시키기 위해서 기존 공급량으로 부족할 때는 새로운 댐의 건설을 고려해야 됨을 보이며 (4)는 수요를 만족시키기 위해서 새로운 용수로의 건설이나 확장을 해야됨을 의미한다. (5)와 (6)은 한번 건설된 설비는 폐기되지 않음을 보여주는 제약식이다. 이 식들로 목적함수의 비용계수를 단위 계획기간 사이의 증분 할인비용으로 처리한 이유가 설명될 수 있다. 즉 한번 선택된 공급시설은 계획기간 말까지 계속 유지된다고 가정하므로써 계획 연도마다 할인된 증분비용을 합산하게 되면 결과적으로는 고정투자의 총합인 비용을 계산한 것으로 된다. (7)번 제약식은 기존 용수로 용량이 서비스 요구량을 감당하지 못할 경우, 새로운 용수로의 건설은 새로운 용수 공급시설 건설이 되어야 가능하다는 것이다.

본 모형은 김승권 등<sup>(7)</sup>의 기존의 용량한계가 있는 동적입지 선정문제와는 두 가지 유형의 이항변수 (Y, Z)가 고려된다는 점에서 서로 다르다. 기존의 연구에서는 공급설비가 세워져야만 공급이 가능했지만 ( $X_{ijk} \leq Y_{ik}$  제약식), 본 연구에서는 기존의 공급 설비만으로 수요를 충족시킬 수 있을 때는 설비를 세우지 않고 용수로의 추가 설립만으로도 가능하다. 즉, 공급설비가 세워지지 않더라도 고정비는 발생할 수 있다. 이것은 제약식 (7)이 조건부적으로 적용되는 것을 의미하며 이의 해결은 보편적인 해법의 고안을 어렵게 하는 요소로 작용한다. 역설적으로 이것은 스프레드 슈트에 의한 계산모형의 이점일 수도 있다.

## 5. 스프레드 슈트에 의한 해법

제 4절의 수학적 모형은 상당한 양의 이항변수들 ( $ixjxt + ixt$ 개)이 있어서 일반적인 정수계획법을 위한 computer software로는 아마도 오랜시간의 계산으로도 해를 얻기가 쉽지 않은 복잡한 정수계획 문제이다. 따라서 이 문제에 맞는 적합한 해법의 고안이 필수적인데, 실제로 문제의 특성에 맞는 신뢰성 있는 해법을 고안하고, 이용하여 실질적인 해를 구할 수 있을 때까지 소요되는 시간과 노력은 해법에 대한 이해가 부족한 계획 실무자에게 부담을 주어서 기피되고 있는 실정이다. 따라서 비록 최적해는 아닐

지라도 계산과정이 한눈에 파악될 수 있는 스프레드 슈트에 의한 모형은 우선 누구에게도 이해가 쉽고 원하는대로 다양한 대안을 제시해 줄 수 있다는 점에서 바람직한 계산방법이라고 할 수 있다. 더우기 이같은 모형은 마치 모의실험 모형들과 마찬가지로 난해한 수학적기법을 이용하여 얻은 최적해의 적합성 여부를 확인 해주고 스프레드 슈트 모형의 특징인 "What if" 계산 특성을 활용하여 쉽게 다른 대안을 도출할 수 있게 해주는 장점이 있다. 그런 점에서 최적화 계산을 위한 모의실험 모형으로 간주될 수도 있다.

### 5.1 스프레드 슈트의 특성

스프레드 슈트에 의한 계산방식은 마치 연습지에 필요한 계산을 위한 수식을 적어놓고 그에 따른 계산후 다시 그 결과를 바탕으로 다음 계산을 이어가는 종래의 연습장에 의한 계산 방식과 크게 다를 바가 없다. 다만 그런 계산을 연습지가 아닌 전산기 memory 내에서 한다는 것이 다르다. 전산기에서 하기 때문에 전산기의 활용 이점을 극대화시키기 위하여 도표로의 표현기능을 위시하여 자료관리 등 여러 가지 편리한 함수들이 내재되어 있다. Hancock 등<sup>(12)</sup>은 수자원 분석에 스프레드 슈트를 이용할 것을 제안했지만 스프레드 슈트 활용은 훨씬 전(1983년)부터 이미 미국의 HARZA와 같은 용역회사 및 정부기관 등에서도 널리 애용되던 잘 알려진 계산 방식이므로 더 이상의 소개는 생략한다. 다만 본 연구에서 활용하는 SOLVER<sup>(13,14)</sup>는 사용자 편의를 고려하여 최근에 개발된, 최적화 계산을 가능하게 해주는 함수로서, 이길성<sup>(15)</sup>이 제안한 용수 배분 문제의 민감도 분석도 가능하게 해줄 것으로 기대되며, Fylstra<sup>(16)</sup>가 지적한대로 곧 최적화 기법의 응용을 촉진하는 역할을 할 것이므로 주목해 둘 필요가 있다고 본다. 다만 아직은 초기단계라서 software 상의 문제점이 없는 것은 아니나, 지극히 고무적인 현상이라 생각된다.

### 5.2 스프레드 슈트 모형에 의한 계산 절차

스프레드 슈트를 이용한 실제적인 해를 구하는 방법을 요약하면 다음과 같다. 우선 공급가능 대상지와 각 수요지에서 시간에 따른 수요량의 변화가



주어질 때 공급과 수요사이의 기간별 할인 운영비용 및 고정 투자비용을 계산하고 합계를 낼 수 있는 스프레드 시트 모형을 세운다(그림 1은 작성된 스프레드 시트 모형의 일부를 보여준다). 이때 공급 용량과 용수 수요량, 각 용수로의 최대 통수능력 등의 제약이 있으며 수요와 공급의 균형을 위하여 수요지 편에 여유 변수를 도입시켜 Network flow 모형을 기간별로 펼쳐 수립한다.

#### 단계 (1) (초기 가능해 설정)

우선 가능 후보공급지의 공급설비 및 수송을 위한 모든 설비가 건설되었다고 가정한다. 즉 모든 이항 변수 값이 1이 되도록 한다.

#### 단계 (2) (기간별 최적 운영 방안 도출)

매 계획 期間別로 또는 通時的으로 스프레드 시트의 SOLVER를 활용하여 주어진 제약조건과 수요를 만족시키며 최소의 운영비용으로 공급할 수 있는 최적 운영패턴을 찾아낸다(최초의 반복단계일 때는 용수로 건설에 따르는 고정비의 역할을 최대한 반영시키기 위하여 수요지까지 수송 단위당 실제 운영비에 용수 수요단위당 용수로건설 고정비용 값을 더하여 주고 최적 계산한다. 그러나 실제의 운영비는 원래의 단위운영비로 계산한다).

#### 단계 (3) (공급 설비 입지시기 결정)

단계 (2)에서의 계산 결과, 매단위 계획 기간별로 여유 변수값이 확장가능 단위용량보다 큰 공급지가 있을 경우, 그 설비의 확장을 지체시키므로써 공급 과잉상태를 해소시키고 댐설립 이항변수를 잠정적으로 확정짓는다. 이때 시설확장은 정해진 용량단위로 이루어지므로 대개는 확장직후 설비의 잉여용량이 남아 있게되며 그 잉여분들의 총합을 기간별로 계산하고 총 잉여분값이 擴張可能容量보다 크면 단계 (4)로 간다. 아니면 단계 (6)까지 최소한 한번의 반복후에 계산을 종료한다. 그리고 한번 설립된 설비는 계획 기말까지 계속 유지시킨다.

#### 단계 (4) (고정 투자비용과 운영비용 사이의 타협조정)

확장가능 단위 용량이 총 공급 잉여분 범위내에 있는 설비 중에서 고정 투자비용이 가장 큰 공급 설비를 단위 기간동안 제외시키고 SOLVER를 이용하여 새로운 분배 양상과 그에 따른 운영비용을 얻는다. 이때 야기되는 고정비의 절약이 운영비용의

증가보다 큰가를 살피고 비용의 감소를 야기하면 한 단위기간씩 설비확장을 지체시켜 간다.

단계 (5) 단계 (4)의 과정을 총 공급 잉여분이 최소의 확장가능 단위용량보다 적어질 때까지, 고정투자 비용이 큰 순서로 모든 가능 공급시설에 대하여 계획기간 말까지 반복 수행후 단계 (6)으로 간다.

#### 단계 (6) (용수로 확장설비의 투자조정)

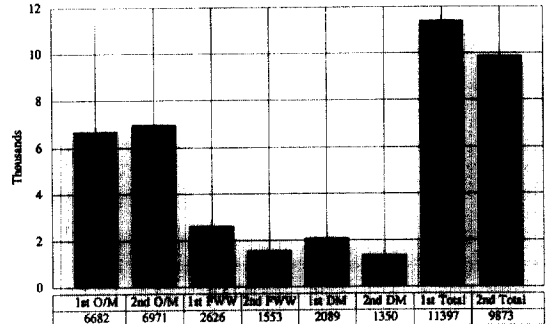
계획기간 말로부터 시작하여 시간을 거꾸로 거슬러 올라가며 가능하면 수요공급 운영패턴이 일정하게 유지되도록(한번 설립된 용수로를 계획기간 말까지 계속 유지되어야 하므로) 용수로 확장 투자조정에 따른 고정비용의 증가가 운영비용의 증가보다 적게되도록 최적 운영패턴을 조정한다(단계 (5)의 결과로 나타난 최적 운영패턴을 기준으로 하여 Network simplex에서 closed circuit을 통하여 다른 가능해를 찾는 과정에 해당하며 SOLVER를 활용해도 된다). 결과로서 확인된 불필요한 용수로는 제거하고 단계 (2)로 간다. 즉 용수로 건설을 의미하는 이항 변수값이 되도록 이면 많은 0값을 갖도록 한다.

### 5.3 스프레드 시트에 의한 계산 결과

그림 2는 고정비용과 운영비용 사이의 타협 조정관계를 보여주는 것으로서 운영비용의 증가를 감소하고도 고정비용의 조정에 의하여(1차 계산과 2차

## Trade Off Analysis

(Between Operating & Fixed Costs)

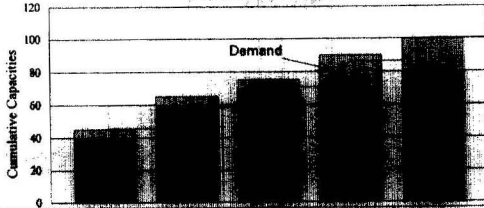


DM : Fixed Cost for Dams FFW : Fixed Cost for Waterways  
O/M: Operation and Maintenance Cost

그림 2. 고정비와 운영비용 사이의 조정이 총비용에 미치는 영향

# Capacity Expansion

(Water Supply Facilities)



Supply Cap. Exp.	Present	T=5	T=10	T=15	T=20
S1	20	20	30	50	50
S2	15	15	15	15	25
S3	5	25	25	25	25
S4	5	5	5	20	20

그림 3. 스프레드 시트 분석에 의한 시설용량 확장계획

계산에 의한 비교) 총합인 비용을 약 15% 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다. 1차 계산은 기간별로 SO-LVER에 의한 최적 운영방안을 도출하여 운영비의 최소화만을 고려하여 얻은 결과이고 2차 계산결과는 본 연구에서 제시한 방안에 따른 최종 계산결과이다.

그림 3은 기간별 총 수요와 매 기간 건설되어야 할 최적 공급용량의 증가추세를 보여주는 것으로서 항상 수요의 증가를 만족시키고 있음을 볼 수 있다.

그림 4는 스프레드 시트 모형에 의한 최종적인

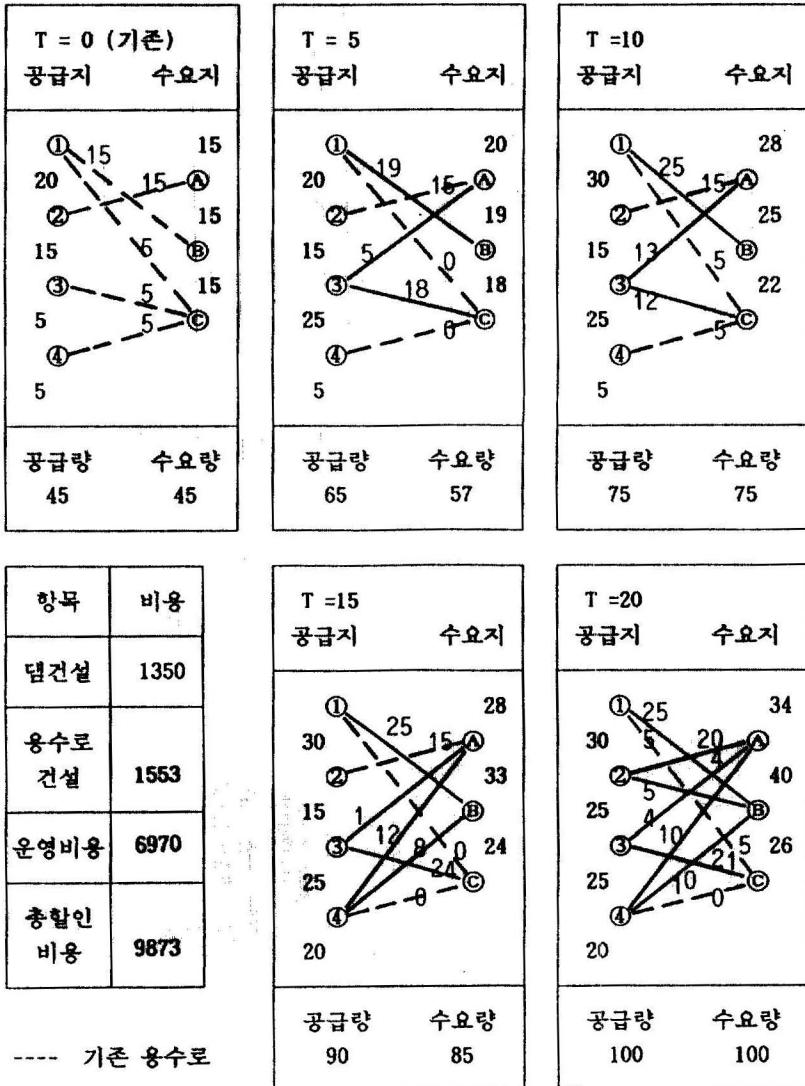


그림 4. 스프레드 시트 계산에 의한 용량확장 양상



해를 한 눈에 보여주는 그림으로써 수요지와 공급지 사이의 기간별 최적 용수공급 패턴과 공급지 시설 용량의 증가 양상을 보여준다. 용수 공급지와 수요지 간의 용수로 건설 시기는 용수공급이 이루어지는 시기에 나타나는 것으로 간주할 수 있다.

특기할만한 사실은 공급지 ①과 ③ 사이와 ④와 ③ 사이의 기존 용수로를 통한 용수 공급이 이루어지지 않고 있어서, 공급지 ④와 수요지 ③ 사이 그리고 공급지 ①과 수요지 ③ 사이의 기존 용수로 건설이 비경제적이었음을 알려주고 있는 사실이다. 기존의 투자를 합리화 하기 위하여 ④-③ 용수로의 사용을 굳이 고집한다면 그렇게 할 수도 있으나 그때는 전체적인 비용의 증가를 가져올 해를 얻을 것이다. 또 한 가지 재미있는 사실은 T=15 시점에서 ④-① 용수로는 건설되자. 단위당 운영비가 ③-①보다 더 많이 소요되는 데도 불구하고 ③-① 용수로를 통하여 공급하던 양이 줄고 ④-① 용수로를 운반되는데 이는 ④-① 용수로를 이용함으로써 ③-①에 공급하던 양을 운영비용이 절반 이하인 ③-③을 더 많이 이용케하여 전체적인 시스템 비용의 절약을 유도하고 있는 사실이다. 즉 최적 분배양상이 부분 보다는 시스템 전체의 관점에서 이루어지고 있음을 분명히 보여주는 것으로서 시스템 분석의 중요성을 상징적으로 보여주고 있다고 할 수 있을 것이다.

시스템 분석을 통하여 계획을 세운다는 것은 우리가 여기서 풀고자 하는 문제의 최적해는 말할 것도 없고 문제 자체도 정의해 가는 과정이라고 말할 수 있다. 따라서 실제 적용시에는 본 모형이 기초하고 있는 여러 가정들을(예를 들면 용량증가는 미리 정해진 크기로만 확정된다는 것 같은) 완화시키거나 감도분석을 통하여 최종대안들을 생성(스프레드 시트모델의 장점)해 내어야 한다. 다시 말하면 본 연구의 결과는 시스템 분석을 위한 도구를 제공하는 것일 뿐, 단 한번의 분석결과로 곧바로 원하는 시설확충 계획을 세울 수 있다는 것은 아니라는 사실을 인지하여야 할 것이다.

## 6. 결 론

장기 용수 공급계획 수립을 위한 완벽한 전산

분석 모형의 구축은 상당한 시간과 노력이 소요되는 과정이다. 반면에 본 연구에서 제시하는 스프레드 시트에 의한 전산모형은 "What if" 계산을 용이하게 해주는 스프레드 시트 모형의 장점으로 인하여 즉각적인 解의 調整이 쉽게 이루어진다. 따라서 짧은 시간에 소기의 성과를 달성할 수 있는 實際的인 방법으로서 代案 생성이 손쉽고, 사용자나 계획 입안자의 대상 문제에 대한 경험과 洞察力을 적극 활용할 수 있으므로, 종래의 black box로 여겨지던 수학적 모형의 운용개념으로부터 逸脫하여 보다 사용자의 경험과 감각을 중시하려는 새로운 추세에 부응하는 접근방법이라 할 수 있을 것이다. 다만 이 방법은 부분적으로는 SOLVER를 이용한 최적화 기법이 활용되기는 하지만 전체적으로 볼때 최적해의 도달 여부를 판정할 수 없어서 최상의 해를 구하는 방법일 수는 없고 최적해에 근접한 最善의 解로 만족하고자 하는 방법이라고 볼 수 있다. 궁극적으로는 최적해를 구해줄 수 있는 완벽한 수학적 모형의 구축이 있어야 할 것으로 생각된다.

마지막으로, 주먹구구에 의한 계산이 통상 수요와 공급의 균형을 맞추는데 급급한 방안임을 상기할 때, 그림 2의 결과에서 1차 계산 결과는 수요와 공급의 균형만을 고려한 방안중 최소비용 방안이므로 주먹구구식의 방법 중에서도 우수한 방안이라 볼 수 있다. 그런데 이 방안은 2차 계산으로 나타낸, 본 연구에서 제시하는 시설확충 계획에 비하여 열등한 방안이다. 즉, 일반적인 시설확충 계획 수립시에 통상적인 계획수립 방법에만 의존하면, 본 연구의 사례에서 보여주는 것처럼 자칫하면 총 소요예산의 15% 이상의 經濟的 損失을 야기하게 될 수도 있으리라는 것을 미루어 짐작할 수 있을 것이다.

## 감사의 말

스프레드 시트를 이용한 계산 시도는 저자가 미국의 Cornell 대학에 객원교수로 체류시 구상해본 것들 중의 하나로써 Cornell 대학의 Daniel P. Loucks 교수의 도움과 일년간 체류비를 지원한 문교부에 감사의 뜻을 표합니다. 그리고 세심한 심사를 해주신 익명의 심사위원들께 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. Manne, A.S., *Investments for Capacity Expansion: Size, Location and Time-Phasing*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1967.
2. Jacobsen, S., "Heuristic Procedure for Dynamic Plant Location", The Institute of Mathematical Statistics and Operation Research, the Technical University of Demark DK-2800 Lyugby, Demark, Working Paper 1977.
3. Van Roy, T.J. and Erlenkotter, D., "A Dual-Based Procedure for Dynamic Facility Location", *Management Science*, Vol.28, 1982, pp.1091-1105.
4. Erlenkotter, D., "A Comparative Study of Approaches to Dynamic Location Problems", *European Journal of Operational Research* 6, 1981, pp. 133-143.
5. Kim, S.K. and Yeh, W.W., "A Heuristic Solution Procedure for Expansion Sequencing Problems", *Water Resources Research*, Vol.22, No.8, 1986, pp. 1197-1206.
6. Kim, S.K., "A Shortest Path Dynamic Programming for Expansion Sequencing Problems," *J. of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 12, No.1, June 1986, pp.81-94.
7. 김승권, 김선오, "Application of the Cross Decomposition Method for a Dynamic Facility Location Problem," *한국경영과학회지*, 제 15권, 제 1호, 1990, pp.23-36.
8. Fong, C.O. and Srinivasan, V., "The Multiregion Dynamic Capacity Expansion Problem: An Improved Heuristic", *Management Science*, Vol.32, No.9, 1986, pp.1140-1152.
9. Song, J.W. and S.K. Kim, "An Application of Lagrangian Relaxation and Subgradient Method for a Dynamic Uncapacitated Facility Location Problem", *J. of Korean OR/MS Society*, Vol.13, No.2, Dec. 1988, pp.47-58.
10. Shulman, A., "An Algorithm for Solving Dynamic Capacitated Plant Location Problems with Discrete Expansion Sizes", *Operations Research*, Vol. 39, No.3, May-June 1991, pp.423-436.
11. 농어촌 진흥공사, *서해안 수자원의 개발과 이용에 관한 연구*, 농림수산부, 1991.
12. Hancock and James, P. Heaney, "Water Resources Analysis Using Electronic Spreadsheets.", *J. of Water Resources Planning and Management*, Vol.113, No.5, Sept. 1987, pp.639-658.
13. Lotus, *Solver Guide Lotus 1-2-3 for Windows Release 1.0*, 1991.
14. Microsoft, *Microsoft Excel Solver User's Guide*, 1991.
15. Lee, Kilseong, "Sensitivity Analysis of Water Supply-Waste Water Allocation Model" *J. of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol.16, No.1, pp.41-48, 1983.
16. Fylstra, D., "Democratization of Operations Research", *OR/MS Today*, August 1991, pp.12-13.

(接受 : 1992. 6. 13)