

# Network Flow Model을 이용한 유역 물 수지 해석

이 광 만\*, 윤 석 영\*\*, 김 현 준\*\*

## 1. 서 론

우리나라 수자원 시스템은 날로 복잡해지고 있을 뿐만 아니라, 용수공급체계도 급변하고 있다. 또한 한정된 수계내에서 가용 수자원을 최대로 이용하는 수자원 개발정책에 바탕을 두고있어 적든 크든 기간에 새로운 수자원 계획수립에서는 유역 전체를 대상으로 수자원 부존량을 평가하고 배분하는 문제가 대부분이다. 이와같은 문제는 대규모 다목적 저수지 시스템을 통한 광역체계의 수자원 시스템 운영 및 배분 계획을 더욱 어렵게 만들고 있다. 따라서 시스템의 동적 특성을 반영하면서 수리권(혹은 용수공급 우선순위)을 고려할 수 있는 수자원 평가방법이 필요하다.

유역개념의 복잡한 수자원 시스템 평가를 위하여 저수지 운영 방법에 의한 물 수지 해석을 수행할 경우 시스템의 복잡성을 고려하여 시스템 해석 기법을 이용할 수 있다. 이들 방법으로 모의기법과 최적화기법을 적용할 수 있는데 수리권(혹은 용수배분 우선순위)을 고려하기 위해서는 모의기법보다 최적화기법이 합리적일 것이다. 최적화 기법으로는 이순탁(1990)이 낙동강 수계의 4차원 저수지 문제에 DDDP를 적용한 경우가 있으며, 고석구 등(1993)은 IDP를 이용하여 한강수계 저수지 시스템을 3차원 문제로 해석하는 등 많은 연구가 있다. 저수지 운영기법을 이용한 물 수지 분석 방법으로는 윤용남과 김태균(1993)이 외부로부터의 물 공급을 고려하였고, 이광만과 이재용(1997)은 10개 저수지군으로 구성된 한강유역을 대상으로 분석하였다.

그러나 단순히 최적화 알고리즘에 의한 물 수지 분석 모형은 수자원 시설물(저수지 혹은 용수공급지점) 운영에 중점을 두게되며, 복잡한 용수공급체계에서는 용수배분 우선순위의 고려와 수자원 시설물이 없는 지역에 대한 상세한 물 수지 분석에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 Network Flow Model을 이용하여 수자원 계획과 운영에서 빈번하게 행해지고 있는 유역 물 수지 분석을 한강수계를 대상으로 시험적으로 적용하였다. 적용 방법은 팔당에서 수도권지역의 용수수요 증가를 시나리오를 하여 용수부족 추세를 분석하였다.

---

\* 한국수자원공사 조사처

\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실

## 2. Network Flow Model (MODSIM)

오늘날 하천유역관리는 높은 수자원 이용상태에서 시스템도 매우 복잡할 뿐만 아니라 규모도 커서 물 이용의 합리화가 쉽지 않은 실정이다. 또한 행정적, 법적 제약조건이나 수리권 혹은 용수배분 우선순위 등을 합리적으로 고려해야 하며, 지표수-지하수 연계 및 수량-수질 연계 등 물의 종합적 관리 정책이 필요하다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Fredericks과 Labadie (1995)는 Lagrangian Relaxation 알고리즘을 이용하여 Network Flow Model (MODSIM)을 개발하였다. 이 모형은 기존의 LP나 Out-of-Kilter 알고리즘에 비하여 계산시간을 단축시키고 대규모 수자원 시스템을 해석하는데 매우 유리하다.

Bertsekas와 Tseng(1994)이 Minimum Cost Flow (MCF) Problem의 해석을 위해 RELAX Code를 개발하였으며, 현재 Network Flow Model의 알고리즘으로 많이 쓰이고 있다. 그림-1의 예와 같은 MCF 문제에서 노드(node)의 집합  $N$ 과 아크(arc)의 집합  $A \in N \times N$ 이 주어졌을 때, 각각의  $(i, j) \in A$ 에 대한 비용을 정수  $a_{ij}$ 로, 아크  $(i, j)$ 의 통과 수량을 양의 정수  $c_{ij}$ 로, 그리고  $(i, j) \in N$ 에 대해 노드  $i$ 의 외부 공급을 정수  $s_i$ 로 정의하면, 모든  $(i, j) \in A$ 의 아크 흐름  $x_{ij}$ 를 최소화하는 목적함수는 다음 식(1)과 같이 정의할 수 있으며, 각각의 노드에서 유량 보존의 법칙과 아크의 흐름 제약조건은 식(2) 및 (3)과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{(i,j) \in A} a_{ij}x_{ij}, \quad (1)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{ji} - \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} = s_i \quad \forall i \in N, \quad (2)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq c_{ij}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (3)$$

여기서, 아크의 흐름( $x_{ij}, (i, j) \in A$ )을 구성하는 유량벡터를  $x$ 로 정의할 때, 유량벡터  $x$ 는 제약조건 (2)과 (3)식을 만족하면 타당해라 할 수 있으며, MCF 문제를 풀면 최적해를 구할 수 있다. 또한 노드  $i$ 에서 유량보존의 제약조건과 연관되는 쌍대변수  $p_i$ 를 각각의 노드  $i$ 에 대해 도입하면,  $p_i, i \in N$ 를 가격벡터  $p$ 로 정의할 수 있다. 여기서 유량벡터  $x$ 가 아크의 흐름 제약조건 (2)을 만족하면 가격벡터  $p$ 와 유량벡터  $x$ 는 Complementary Slackness (CS)를 만족한다 할 수 있으며, 다음과 같은 유량-가격 추적이 가능하다.

$$x_{ij} < c_{ij} \rightarrow p_i \leq a_{ij} + p_j \quad \forall (i,j) \in A \quad (4)$$

$$0 < x_{ji} \rightarrow p_i \leq p_j - a_{ji} \quad \forall (j,i) \in A \quad (5)$$

여기서,  $x$ 가 타당해(feasible)이고  $(x, p)$ 가 (CS)를 만족하면,  $x$ 는 (MCF)에 대하여 최적해(optimal)이며,  $p$ 는 쌍대해(corresponding dual problem)의 최적해라 할 수 있다.

### 3. 문제의 구성

#### 3.1 적용 대상 유역

한강유역의 수자원 평가를 위해 용수공급 및 수문학적 특성을 고려한 물 수지 분석 체계를 그림-2와 같이 15개의 소유역으로 구분할 수 있다. 이들 유역에서 장래 수자원 평가를 위한 저수지 시스템은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 우선, 한강수계에는 현재 총 저수용량이 10억<sup>m<sup>3</sup></sup>이상인 다목적 저수지가 2개 있으며, 건설중에 있는 영월댐의 경우 768백만<sup>m<sup>3</sup></sup>의 총 저수용량 규모를 가지고 있다. 이밖에도 한전에서 수력발전용으로 운영하고 있는 대규모 댐으로는 화천댐이 있으며, 유로댐(flow-through-reservoir)이 북한강 본류에 4개 있다. 또한, 적은 규모의 다목적 댐으로는 현재 건설중인 횡성댐이 원주일원의 용수공급을 목표로 하고 있으며, 영월댐은 한강수계의 유량증대 및 홍수조절을 목표로 건설 시작단계에 있다. 따라서 기존 시스템과 현재 건설중인 수자원 시스템만으로도 한강수계의 수자원 개발 및 관리체계는 매우 복잡하다.

#### 3.2 물 수지 시스템 구성

한강유역의 용수공급 시스템은 강원도 및 충청도를 포함하여 수도권을 중심으로 하는 경기 중·북부 일원과 서해안 일원을 포함하고 있는 우리나라 최대 규모의 용수이용지역이라 할 수 있다. 또한 장래에는 금강유역이나 동해안 지역으로의 도수계획도 포함될 수 있어 한강유역을 중심으로 하는 한강권역 용수공급 체계는 지금보다 더욱 복잡해 질 것으로 예상된다. 이와같이 장래 복잡한 용수공급 상황이 예상되는 한강유역의 물 수지 분석 체계를 그림-2에 기초하여 Network으로 구성하면 그림-3과 같이 묘사할 수 있다. 이 시스템은 전체 6개의 저수지로 구성되어 있으며, 한전에서 발전 전용으로 운영하고 있는 춘천, 의암 및 청평댐은 수량조절기능이나 용수공급 능력이 미미하여 시스템에서 제외하였으나 팔당댐은 한강 하류부 용수공급 기준지점으로 고려하였다.

물 수지 분석 단위는 주요 수자원 시설물, 배수구역 그리고 용수공급체계를 고려하여 그림-2의 15개 소유역을 그대로 적용하였다. 임진강 유역의 용수공급체계는 현재의 용수이용현황을 그대로 적용하여 한강유역과는 별도의 시스템으로 모의하였다. 경기도 서해안일원으로서의 도수계획은 114번 소유역에 포함하였다. 회귀수에 대해서는 농업용수(IRR)의 경우는 순물소모량으로 적용하고 생·공용수(DEM)에 대하여 공급량의 65%가 직하류 유역단위로 유입되는 것으로 고려하였다.

### 4. 분석 방법

유역단위의 대규모 저수지 시스템 운영을 포함하는 수자원 평가를 위한 물 수지 분석을 수행하기 위해 제2장에서 제시하고 있는 방법을 적용하기 위한 조건들은 다음과

같다. 우선 유입량 자료계열은 수자원장기종합계획(1997)의 물 수지 분석에 이용했던 30년간('64~'93)의 월별자료를 한강 유역의 15개 소유역에 대하여 개별적으로 적용하였다. 용수공급 평가지점은 그림-2에서 알 수 있듯이 남·북한강 본류구간 6개 소유역 (B-103, B-105, B-107, B-110, B-112, B-113)과 팔당댐 하류 서울, 인천 및 경기일원의 수요를 총괄하는 114번 소유역 등 7개 지점을 대상으로 하였다.

그외 상류 소유역에 대해서는 자연유량으로 용수공급을 평가하고 댐하류 지점은 자체 유역의 자연유량과 본류의 유량을 이용하여 용수공급하는 형태로 고려하였다. 용수수요량은 생·공용수와 농업용수로 구분하고 월단위로 배분하여 적용하였다. 하천유지용수는 한강 하류부 인도교를 기준지점(53번 노드)으로 수자원장기종합계획(1990)에서 제시한 장래 목표유량으로 적용하였다. 분석 방법은 수도권을 포함하는 팔당하류에서의 2001년 생·공용수(45번 노드)를 기준으로 일정비율 증가에 따른 공급달성도를 그림-4와 같이 평가하였다.

## 5. 결 론

본 연구는 Network Flow Model을 이용하여 한강 수계를 대상으로 수자원 평가 체계를 구성한 후 장래 용수공급 능력을 평가하기 위한 물 수지 분석을 실시하였다. 우리나라와 같이 용수공급체계가 복잡하고 용수이용도가 높은 지역의 수자원 평가는 댐을 중심으로 상·하류간의 수문조건만이 아니라 인위적 물 이용을 고려한 종합적 수자원 평가가 이루어져야 한다. Network Flow Model은 이와같은 목적을 달성하는데 하나의 좋은 방법으로 확인되었다.

## 참고문헌

- 건설교통부 (1997). 수자원 장기 종합 계획.
- 윤용남, 김태균 (1993). “외부공급을 공간적으로 고려한 물 수지 분석”, 대한토목학회 논문집, 제13권 제1호, pp.89-96.
- 이순탁 (1990). 낙동강수계 다목적댐 연계 운영 방안, 한국수자원공사.
- 고석구, 김수삼, 이광만, 이기종 (1993) “수량 및 수질을 고려한 저수지군의 종합 관리,” 대한토목학회 논문집 제12권 제1호, pp.123-130.
- 이광만, 이재웅 (1997) “물수지 분석을 위한 대규모 저수지 시스템 해석”, 한국수자원학회 논문집, 제30권, 제6호, pp.629-639.
- Jeffrey W. Fredericks and John W. Labadie (1995), DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONJUNCTIVE STREAM-AQUIFER MANAGEMENT, COLORADO WATER RESOURCES RESEARCH INSTITUTE.
- Bertsekas, D.P., and Tseng, P., “RELAX: A Computer Code for Minimum Cost Network Flow Problems,” Annals of Operations Research, Vol.13, 1988, pp.127-190.

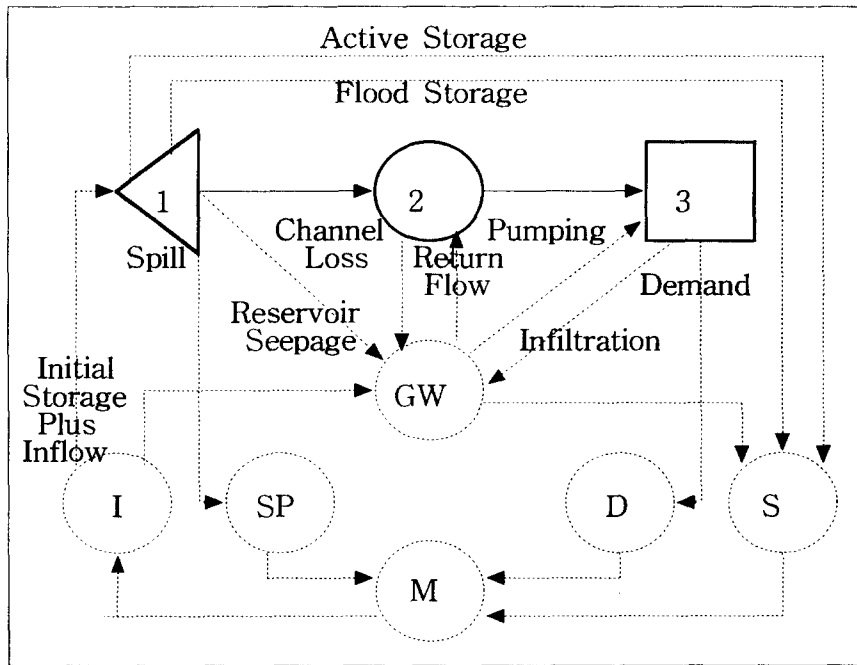


Figure-1 Network Structure for MODSIM with Accounting Nodes and Links

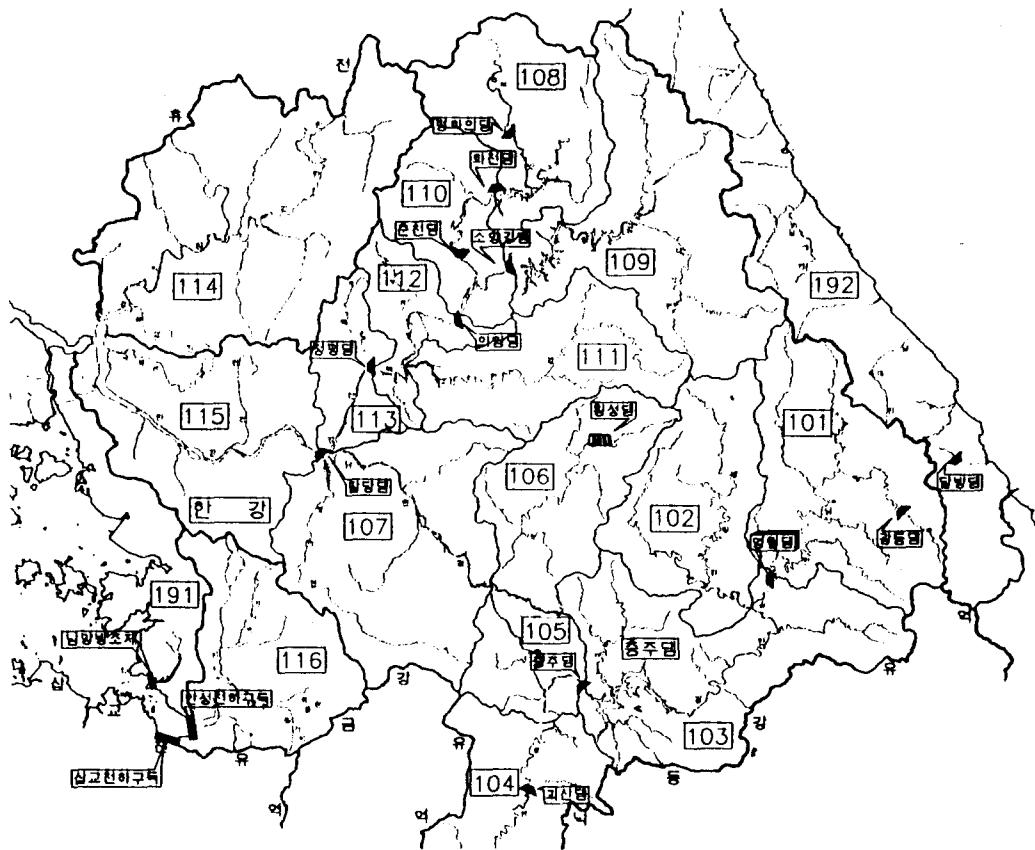


Figure-2 Water Accounting Units of Han River Basin for Network Flow Model

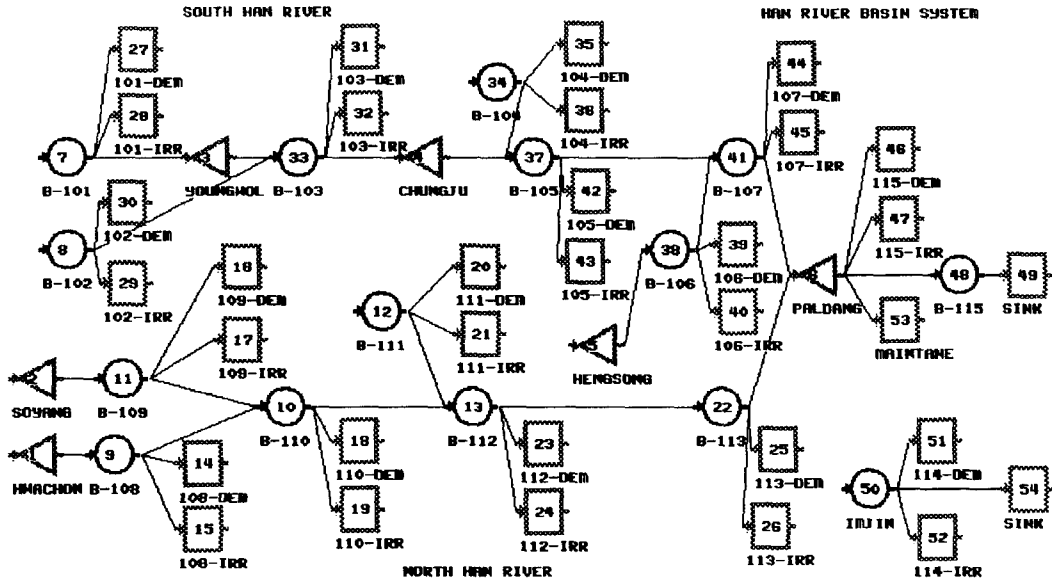
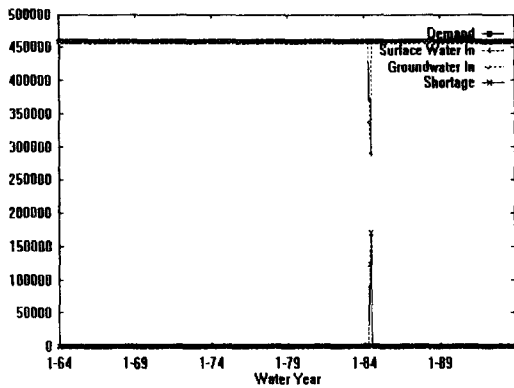
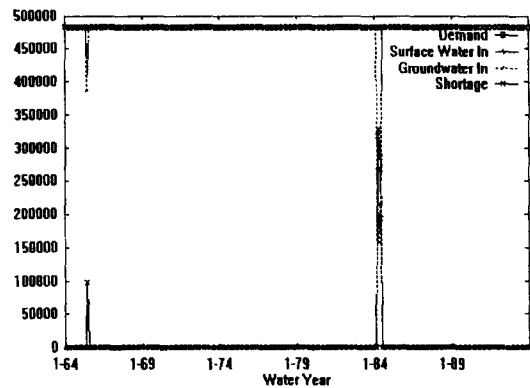


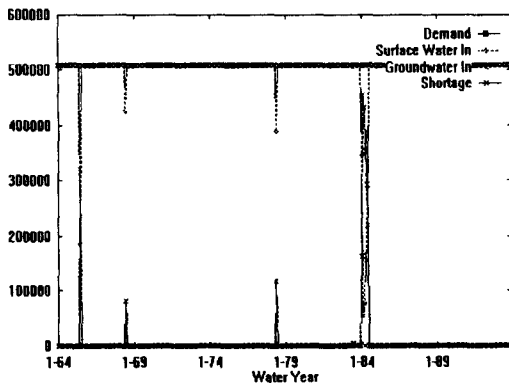
Figure-3 Schematic Diagram of Han River Basin Network System



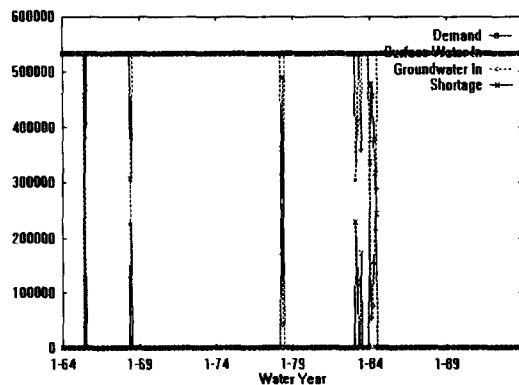
(a) 25 million m<sup>3</sup>/month increasing



(b) 50 million m<sup>3</sup>/month increasing



(c) 75 million m<sup>3</sup>/month increasing



(d) 100 million m<sup>3</sup>/month increasing

Figure-4 Comparison of Water Shortage Pattern According to Water Demand Increasing at Node 46