

유역의 최적 용수배분계획 수립을 위한 Network 모형의 적용

An Application of River Basin Network Flow Model for Optimum Water Allocation Planning

안상진*, 최병만**, 곽현구***, 김혁호****

Sang Jin Ahn, Byung Man Choi, Hyun Gu Kwark, Hyuk Ho Kim

요 지

MODSIM 모형은 하천유역 네트워크 모형으로 최신의 네트워크 최적화 알고리즘을 적용함으로써 유역내에서 물리적·수문학적으로 그리고 수리권과 같은 제도적인 면을 동시에 고려한 물 배분이 가능하며, 네트워크 흐름 최적화 기법은 복잡한 유역 시스템의 모의 능력을 증대시켜 준다. 모형을 이용하여 링크와 노드 및 우선순위를 토대로 금강유역을 대상으로 3개의 저류노드, 57개의 비저류노드, 72개의 수요노드 및 127개의 링크로 구성된 네트워크를 구축하였다. 개발된 네트워크 모형의 적용성 평가를 위해 충청지역의 행정중심복합도시 건설전·후의 용수수급에 대해서 분석하였으며, 네트워크 설계, 우선순위의 설정, 모의운영의 시나리오 분석 등에 있어서 만족할만한 성과를 도출하였다.

핵심용어 : MODSIM, 노드, 링크, 네트워크 최적화 알고리즘, 통합 의사결정지원시스템

1. 서 론

네트워크 모형은 복잡한 유역과 용수공급 시스템을 노드와 링크로 구성되는 네트워크로 도식화하고 네트워크 알고리즘으로 최적화함으로써 수자원계획에 필요한 하천수 공급량, 소유역별 물 부족량 계산과 이를 이용하여 용수공급 우선순위 조정, 신규 수자원개발 규모를 결정할 수 있다. 최근 복잡해지는 유역의 상황을 고려해 미국을 비롯한 외국에서는 적용의 편리성을 증진하고 다양한 조건을 반영해야 한다는 점을 고려해 용수수급 계획시 네트워크 모형의 적용이 보편화되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 수자원개발이 한계에 이르고 있는 상황에서 기 개발되어 있는 가용 수자원의 효율적인 이용 및 합리적인 배분을 위하여 용수공급 우선순위 및 수리권 등을 반영하는 MODSIM 모형을 이용하여 금강 유역의 수자원시스템을 대표하는 네트워크를 개발하고 시스템화함으로써 장래 유역의 용수수급 환경변화에 능동적으로 대처하고 신속한 의사결정을 지원할 수 있도록 하였다.

* 정회원·충북대학교 토목공학과 교수-E-mail : hydrosys@chungbuk.ac.kr
** 정회원·한국수자원공사 동남아시아팀장-E-mail : bmchoi@kowaco.or.kr
*** 정회원·충북대학교 토목공학과 박사과정 수료-E-mail : hgmook@empal.com
**** 정회원·한국수자원공사 굴포천건설단 건설관리과장-E-mail : hhoasis@kowaco.or.kr

2. 모형의 적용

2.1 모형의 개요

네트워크 최적화 알고리즘을 채택하고 있는 MODSIM 모형은 복잡한 유역의 수자원시스템을 노드와 링크로 구성되는 네트워크 구축을 통해 한정된 수자원을 전 유역을 통해서 일관성 있게 배분할 수 있으며, 일반적인 모의 모형에서 필수적으로 나타나는 시행착오 과정을 피할 수 있는 특징을 갖고 있다. 시스템의 물리적인 구성 요소 중 노드는 저수지, 지하수, 저류권 등을 나타내는 저류 노드와 하천 합류점, 취수지점, 물 수요처와 같은 비저류노드로 구분되며, 링크는 노드와 노드를 연결해주는 하천수로, 광역상수도의 송수관로 등을 나타낸다. 유역의 수자원시스템의 물의 흐름을 용량화된 흐름으로 변환할 수 있는데, 이는 가용 수자원의 배분을 위한 모의를 수행하기 위하여 유역의 실질적인 수자원시스템을 나타내는 실제 노드와 링크 이외에 가상의 성분으로서 여러가지 부가적인 계산 노드와 링크가 필요하다. 이들 계산노드와 링크는 시스템 내부에서 자동적으로 생성되어 전체 시스템의 흐름 질량보존을 맞추는 역할을 수행하게 된다. Fig. 1은 간단한 네트워크 구성을 보여주는 것으로서 실질적인 구성요소인 i, j, k 노드와 이들을 연결하는 링크가 있고, 가상의 성분으로서 D 계산노드가 있고 이를 연결하는 계산링크로 구성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 2는 유역전체의 수자원시스템을 대표하는 완전 순환 네트워크의 구성을 보여주고 있다.

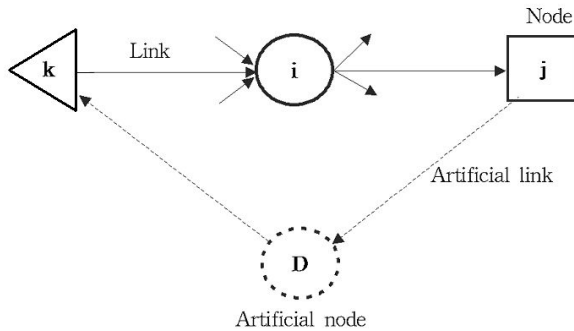


Fig. 1 Simple capacitated network flow configuration

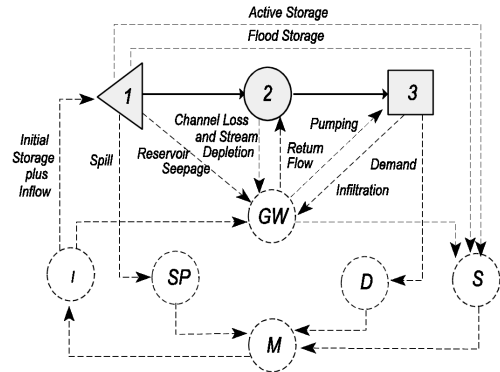


Fig. 2 Network structure for MODSIM with accounting nodes and links

식 (1)은 네트워크 흐름 계획법의 기본이론을 이용하여 MODSIM 모형에서 정의하고 있는 네트워크 흐름의 목적함수이며, 네트워크 시스템 내에서 각 노드간의 총 흐름비용을 최소화하는 것으로서 각 용수 수요처별, 용수 목적별 중요도를 나타내는 우선순위를 고려하여 전체 유역 시스템에 대한 최적의 용수배분을 나타낸다. 식 (2)는 식 (1)에 대한 제약조건으로 가상의 노드를 포함한 모든 노드에서의 질량보존을 나타내며, 네트워크 내의 흐름이 연속적으로 순환하고 있음을 뜻한다. 식 (3)는 네트워크의 모든 링크를 통과하는 유량은 최대유량보다 작거나 같고, 최소유량보다는 크거나 같아야 한다는 상한값과 하한값을 나타내는 제약조건이다.

<목적함수>

$$\min \sum_{l \in A} c_l q_l \quad (1)$$

<제약조건>

$$\sum_{j \in O_i} q_j - \sum_{k \in I_i} q_k = 0 \text{ for all } i \in N \quad (2)$$

$$l_l \leq q_l \leq u_l \text{ for all } l \in A \quad (3)$$

여기서, q_l : 링크 l 에서의 유량비(정수값), c_l : 링크 l 에서의 비용

A : 네트워크내의 모든 링크의 집합, N : 네트워크내의 모든 노드의 집합

O_i : node i 에서 시작되는 모든 링크의 집합(유출 링크)

I_i : node i 로 들어오는 모든 링크의 집합(유입 링크)

l_l : 링크 l 내 유량의 하한값, u_l : 링크 l 내 유량의 상한값

2.2 네트워크 개발

네트워크 최적화 알고리즘에 의해 유역의 수자원시스템을 평가하는데 있어서 가장 중요한 것은 유역을 대표할 수 있는 네트워크를 어떻게 이상적으로 개발하는가에 달려 있다. Fig. 3의 금강 유역의 네트워크는 12개의 소유역과 대청댐과 용담댐 등 용수 공급원과 대전, 공주, 전주 등 주요 용수 수요처, 본류와 지류 합류점, 수위관측소 지점 등의 주요 노드와 링크 토대로 개발하였다. 초기의 네트워크는 용담댐의 전주권 용수 공급을 통한 발전 부분을 고려하기 위하여 가상 저수지 도입, 모형의 검정을 위한 오차 보정 노드 등을 감안하였고, 수요 노드에는 회귀율 및 회귀지점을 설정하였다. 모형의 검보정이 이루어지는 9개의 수위관측소 중에 수통, 호탄 옥천, 공주, 규암 등 5개의 수위관측소 지점에 통과유량을 설정했다. 네트워크 개발시 각 노드의 우선순위는 대청댐에 대해서는 저류량과 방류량 자료중 저류량에 우선순위를 설정하였고, 수위관측소 지점 중에서는 공주에 가장 높은 순위를 부여하였다. 하천유지유량은 용담댐 직하류와 공주 수위관측소에 우선순위를 설정하였고 용수공급은 생활용수, 공업용수, 농업용수 순으로, 그리고 하천 상류에서부터 하류로 우선순위를 부여하였다. 이와 같이 링크와 노드 및 우선순위를 토대로 개발한 금강유역 전체의 초기 네트워크를 구축하였으며, 시스템 내 물수지를 보정하고 입력자료의 신뢰성을 평가하는 수문학적 검정, 물 부족분 공급 노드 및 잉여량 처리 노드 추가 및 노드 우선순위 조정 등의 과정을 거쳐 Fig. 4와 같이 3개의 저류노드(▲), 57개의 비저류노드(●), 72개의 수요노드(■), 127개의 링크(→)로 구성된 최종의 네트워크를 구축하였다.

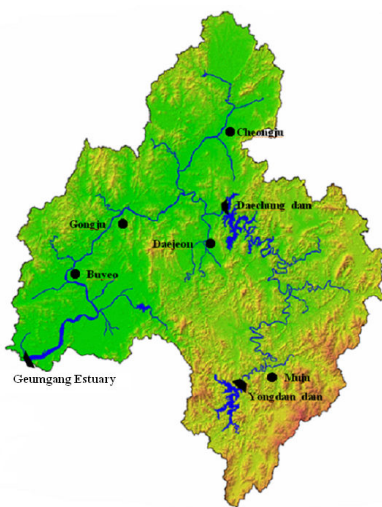


Fig. 3 Geum river basin

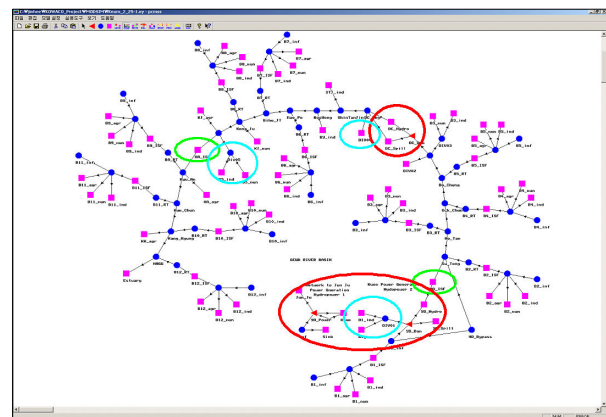


Fig. 4 Geum river network showing sub-basin multi-link constructs

2.3 신도시 건설의 용수수급 분석

정부에서는 수도권 집중 완화와 지역 균형발전의 일환으로 2005년 5월 24일 충남 연기군 남면, 금남면, 동면 및 공주시 장기면 일대 약 73km²(2,210만평)에 행정중심복합도시 건설 계획을 확정, 발표하였다. 이에 따라 신도시 건설이 완료되면 이 지역에 20~50만 명의 인구가 유입될 것으로 전망하고 있다. 신도시 건설에 따른 유입인구 발생으로 인하여 생활용수를 포함한 각종 용수수요도 증가하는 것이 필연적이라고 하겠다. 금번에 개발한 네트워크를 이용하여 인구가 20만명에서 50만명으로 증가하는 시나리오별로 행정중심복합도시 건설 전·후에 대한 용수수급의 변화를 비교, 분석해 보았다. 현 시점에서 행정중심복합도시 건설로 인해 증가되는 용수수요를 정확히 파악할 수는 없으나 신도시가 다기능, 복합형 자족도시로 개발을 추진하고 있음을 감안할 때 유입인구의 생활수준이 대도시 수준에 이를 것이라는 가정 하에 1인 1일당 물 사용량을 400ℓ 정도로 추정하였다. 이에 따른 용수수요는 인구가 20만명, 30만명 및 50만명으로 증가할 경우 Table 1과 같이 생활용수는 각각 29.2백만m³/년, 43.8백만m³/년 및 73.0백만m³/년 정도로 증가하는 것으로 예상된다.

Table 1. 행정중심복합도시의 생활용수 수요 전망

인 구 (명)	200,000	300,000	500,000
1인 1일 물 사용량 (ℓpcd)	400	400	400
용수 수요량 (10 ⁶ m ³ /year)	29.2	43.8	73.0

Fig. 5와 Fig. 6은 행정중심복합도시에 인구 20만명과 50만명이 각각 유입될 경우의 물 부족을 분석한 것이다. 행정중심복합도시 건설 전·후의 분석 결과를 비교해 보면 인구 20만명이 유입할 경우에는 건설전에 비해 물 부족 발생에 있어서 큰 차이가 없었으나, Table 2와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 인구 50만명 유입시에는 물 부족기간이 32개월, 물 부족량은 108,700m³/월 정도가 발생함으로써 별도의 신규 용수 공급원이 필요한 것으로 분석되었다.

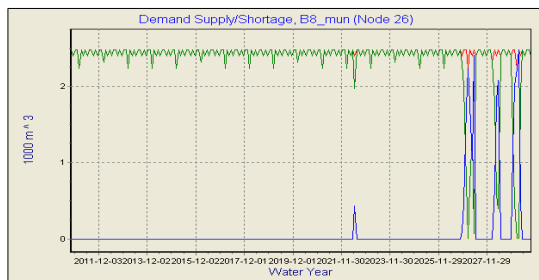


Fig. 5 Demand, supply and shortage of municipal water (인구 200,000명)

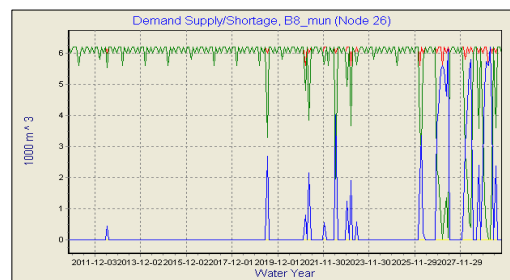


Fig. 6 Demand, supply and shortage of municipal water (인구 500,000명)

그러나 행정중심복합도시에 인구 50만 명이 유입되는 시점을 2030년으로 전망하고 있고, 또한 과거 20년간의 수문상황이 기후변화나 신규 수자원개발 및 용수공급체계 변경 등과 같은 여러 요인으로 인하여 변동될 수 있다는 점을 감안하면 이와 같은 분석결과를 토대로 물 부족 발생여부의 판단하는 것은 적정하지 않을 수도 있다. 그러나 금번에 개발된 네트워크를 금강 유역내에서

이루어지는 각종 개발계획, 용수수급 상황의 변동요인 발생, 인구의 증감 등을 시기적절하게 반영하여 모의를 함으로써 신속한 의사결정을 하는데 충분히 활용할 수 있음을 보여 주었다.

Table 2. 유입인구별 물부족 발생 전망

인구(명)	200,000	300,000	500,000
물 부족 발생 기간 (개월)	6	16	32
물 부족량 (1,000m ³ /월)	5.1	23.2	108.7

3. 결 론

수자원시스템의 변화에 신속히 대응하고, 복잡하고 다원화되어 있는 용수수급의 문제에 대한 합리적인 해결방안을 제시하는데 우월성이 있는 네트워크 최적화 알고리즘을 이용한 MODSIM 모형은 수자원계획에 필요한 하천수 공급량, 물 부족량을 소유역별로 계산할 수 있으며, 이를 이용해 신규 수자원개발 규모의 결정, 용수공급 우선순위 등을 고려해 주면서 모형을 탄력적으로 운영할 수 있다. 중장기 용수공급 개발계획, 특히 가뭄에 대비한 계절별 용수관리, 월 및 주 단위와 더 나아가서 일 단위 실시간 조작까지도 가능한 장점도 갖고 있어 유역 전체의 수자원시스템에 많은 변화인자를 갖고 있는 국내 환경에 매우 적합하다. MODSIM 모형을 장래 용수수급계획 수립시의 적용 여부를 검토하기 위하여 신도시 건설로 인한 용수수급 수급상의 영향을 분석하였으며, 유입인구가 20만명 정도에 이를 때까지는 용수수급상 부족이 없었으나, 50만명이 유입되는 경우에는 물 부족이 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 유역내에서 대규모 신규 용수수요 요인이 발생했을 때 금번에 개발한 네트워크를 적절히 수정, 보완하면 쉽게 용수수급상의 변동 여부를 파악할 수 있으며, 이를 보다 확대한다면 국가 수자원장기종합개발계획, 유역종합개발계획 또는 지방자치단체의 유역종합관리대책 수립 등에 광범위하게 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 고익환, 박상근, 박명기, “저수지군 운영을 고려한 네트워크 모의모형 개발”, 한국수자원학회 학술 발표회논문집(1), pp.226-229, 2003.
2. 이광만, 이재응, 심상준, 고석구, “Network Optimization Model을 이용한 수자원 평가”, 한국수자원학회 논문집, 제32권, 제2호, pp.143-152, 1999.
3. 윤용남, 김중훈, 김태균, “최적화모형을 이용한 수자원의 적정 배분” 대한토목학회논문집, 제15권 제4호, pp.855-864, 1995.
4. Bertsekas, D. P., Linear Network Optimization, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
5. Dai, T. and J. Labadie, "River Basin Network Model for Integrated Water Quantity/Quality Management," *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 295-305, Sep/Oct 2001.
6. Labadie, J. and R. Larson, "MODSIM: Decision Support System for River Basin Management: Documentation and User Manual," Colorado State University and U.S. Bureau of Reclamation, Ft. Collins, CO, 2000.