

Network Optimization Model을 이용한 수자원 평가 Water Resources Evaluation using a Network Optimization Model

이 광 만* / 이 재 응** / 심 상 준*** / 고 석 구****

Lee, Gwang Man / Yi, Jae Eung / Shim, Sang Jun / Ko, Seok Ku

Abstract

South-eastern part of Kyungbuk Province is suffering from lack of suitable water development sources due to geographic condition and insufficient water sources condition. In order to find an appropriate solution, extensive studies are carried out such as investigation of new dam sites, regional water supply system, modification of existing water supply system, rehabilitation of old water resources structures and development of off-stream reservoirs. The network optimization model is applied for evaluation of the newly suggested water development alternatives. The results show that if water supply system is constructed until 2011, the reliability of water supply to Pohang and Kyungju region will be more than 95% and the network optimization model can be used to analyse the management of water resources system considering water rights or priority orders.

Keywords: regional water supply system, rehabilitation of old water resources structures, network optimization model, water right

요 지

우리나라 경북 동·남부지역은 지형조건과 원래 부족한 수자원으로 용수개발에 어려움을 겪는 지역이다. 이와 같은 물 문제를 완화시키기 위해 새로운 댐의 개발과 광역용수공급, 기존 용수공급 시스템의 조정, 오래된 댐의 개·중축 그리고 저류용댐의 건설 방안이 검토되었다. 새롭게 제시된 수자원 개발 대안의 평가는 수자원 시스템의 의사 결정 도구로 많이 이용되고 있는 수학적 모형의 하나인 네트워크 최적화 모형을 이용하였다. 연구결과 용수공급 시스템이 2011년까지 건설된다면 포항 및 경주권의 용수공급 신뢰도는 95% 이상을 확보할 수 있을 것으로 분석되었으며 네트워크 최적화 모형이 수리권 혹은 용수공급 우선 순위를 고려한 수자원 시설물의 운영을 분석하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 지역용수공급체계, 기존 수자원 시스템의 개·중축, 네트워크 최적화 모형, 수리권

* 국무총리실 수질개선기획단 전문위원

Technical Expert, Office of the Prime Minister of Korea Government, Seoul 110-760, Korea

** 아주대학교 환경도시공학부 조교수

Assistant Prof., School of Environmental and Urban System Engineering, Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 442-749, Korea

*** (주)유신 코퍼레이션 이사

Director, Yooshin Engineering Corporation, Seoul 135-080, Korea

*** 한국수자원공사 수도권본부장

Executive Director, Korea Water Resources Corporation, Taejeon, 306-711, Korea

1. 서론

우리나라의 수자원 시스템은 물 부족지대로의 대규모 도수 및 한정된 수자원의 고도이용으로 인하여 날로 복잡해지고 있을 뿐만 아니라, 용수공급체계도 급변하고 있다. 또한 우리나라의 수자원 공급정책은 가능한 한 동일 수계내에서 가용 수자원을 최대한으로 이용하는 수자원 개발정책을 추진하고 있기 때문에 적든 크든 기간에 새로운 수자원 개발 계획 수립에서는 유역 전체를 대상으로 수자원 부존량을 평가하고 배분하는 문제가 대두수를 차지하고 있다. 그러나 이와 같은 접근 방법은 대규모 다목적 저수지 시스템을 통한 광역체계의 수자원 시스템 운영 및 배분 계획을 더욱 어렵게 만들기 때문에 최적 용수이용을 위한 시스템의 운영 특성을 반영하면서 용수공급 우선 순위를 고려할 수 있는 수요-공급의 평가 방법이 필요하다.

유역개념의 수자원 시스템 평가를 위하여 물 수지 해석을 수행할 경우 문제의 복잡성을 고려하여 시스템 해석 기법을 적용할 수 있다. 이들 방법으로 모의기법과 최적화기법을 적용할 수 있는데 수리권이나 용수배분 우선 순위를 고려하기 위해서는 입력조건에 따라 시스템을 분석한 후 결과를 출력하는 모의기법보다 주어진 용수배분 조건에 따라 최적대안을 찾는 최적화기법이 보다 효율적일 것이다. 특히 유역개념의 운영 및 관리 모형에 대해서는 Yeh(1985)가 정의하고 있듯이 특별한 운영율이나 용수공급 우선 순위에 따라 물의 배분을 가능하게 하는 방법으로, 최적화 알고리즘을 이용한 네트워크 모의모형이나 준(quasi)모의 모형과 탐색기법을 이용하여 용수공급이나 저류량 기준에 근거한 운영율에 따라 방류량을 찾는 네트워크 모의모형(HEC, 1991; Loucks와 Salewicz, 1989; USBR, 1991)이 많이 이용되고 있다.

최적화 알고리즘을 이용하는 전자에 대해서는 Texas Water Development Board(1972)를 필두로 많은 모형이 개발되어 개선되어 왔다. Shafer(1979)는 수리권에 근거한 용수전환이나 저류 우선 순위를 고려하는데 준모의모형이 장점이 있음을 주장하였고, 유역의 물리적 특성을 고려하는 데는 다소 미흡하였으나 수리권을 고려할 수 모형들이 다수 개발되었다(Bethel, 1986; Rau, 1987; Wurbs와 Walls, 1989). 보다 개선된 방법으로 Out-of-Kilter(OKM) 알고리즘을 이용한 예로는 Labadie와 Sullivan(1986)이 MODSIM을 개발하여 미국 콜로라도 지역의 수자원 해석에 이

용하였고, Chung 등(1989)은 DWRSIM을 California 지역의 용수배분 모형으로 적용하였다. 또한 Acres International Model (Bridgeman 등, 1989)도 OKM을 채용한 대표적 네트워크 모형이다. Fredericks와 Labadie 등(1995)은 OKM 대신에 Lagrangian Relaxation 알고리즘(Bertsekas와 Tseng, 1994)을 이용하여 지하수를 포함하는 복잡한 물 이동 문제에서 계산시간 및 문제의 크기를 획기적으로 개선시켰다. 국내에서는 연규방과 심순보(1994)가 OKM을 금강유역 수자원 배분에 적용한 예가 있다.

실제 최적화 알고리즘에 의한 수자원 평가 모형은 운영목적 개선시키기 위해 수자원 시설물(저수지 혹은 용수공급지점)의 운영에 중점을 두게 되기 때문에, 복잡한 용수공급체계에서는 용수배분 우선 순위의 고려와 수자원 시설물이 없는 지역에 대한 상세한 물 수지 분석에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 네트워크 모형을 이용하여 수자원 계획과 운영문제에서 빈번하게 행해지고 있는 물 수지 분석에 기반을 둔 수자원 평가를 우리나라의 대표적 물 부족 지역이라 할 수 있는 경상북도 포항 및 경주지역의 용수공급 시스템을 대상으로 적용하였다.

연구대상 지역의 장래 용수수요에 대한 공급계획을 수립하기 위해 지표수 취수, 신규댐, 저류댐, 지하수 그리고 공급체계의 조정 등 가능한 모든 대안에 대하여 시나리오를 개발하였다. 대안별 수자원 공급평가는 가용 수자원의 한계를 고려하여 용수공급 목적별 우선 순위와 지역별 중요도를 결정하고, 이의 배분에 따른 장래 목표년도의 공급 신뢰도와 임하댐으로부터 포함 지역으로의 추가 배분에 따른 낙동강 본류유역의 공급 위험도, 그리고 저류용댐 개발을 위한 형산강으로부터의 양수 가능량과 양수 가능 일수를 평가하였다.

2. 네트워크(network) 최적화 문제

오늘날 하천 유역관리는 높은 수자원 이용상태에서 시스템도 매우 복잡해졌을 뿐만 아니라 규모도 확대되어 효율적인 물 이용이 쉽지 않은 실정이다. 또한 증가하는 용수수요에 대해 기존 시스템의 재평가와 행정적, 법적 제약조건이나 수리권 혹은 한정된 자원의 배분 우선 순위 등을 합리적으로 고려해야 할 상황에 이르렀다. 지표수-지하수의 연계 이용 및 수량-수질 연계 등 물의 종합적 관리 정책도 유역 개념의 물 수지 분석을 필요로 하고 있다.

일반적으로 네트워크 최적화 문제는 물 이동을 저장

과 이용, 증발, 침투, 회귀 및 유량 유입 등을 나타낼 수 있는 노드(node)와 노드를 연결하여 물 이동과정을 나타내는 링크(link)로 구성된다. 최소비용흐름 문제에서 노드의 집합 N 과 링크의 집합 $A \in N \times N$ 이 주어졌을 때, 각각의 $(i, j) \in A$ 에 대한 비용을 정수 c_{ij} 로, 링크 (i, j) 의 이동 수량을 양의 정수 x_{ij} 로 정의하면, 모든 $(i, j) \in A$ 의 링크 흐름 x_{ij} 에 대한 비용을 최소화하는 목적함수는 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있으며, 각각의 노드에서 유량 보존의 법칙과 링크의 흐름 제약조건은 식 (2)와 (3)과 같다.

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

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{ji} - \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} = 0 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

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

여기서, l_{ij} 는 링크 (i, j) 의 최소흐름 제약조건이고 u_{ij} 는 링크 (i, j) 의 최대흐름 제약조건이다. c_{ij} 는 링크 (i, j) 의 단위 유량 비용이 될 수도 있으며, 용수 공급의 가중치 및 우선 순위가 될 수도 있다. 식 (2)은 어떤 노드에서 이 노드로 들어오는 총 유량과 나가는 총 유량은 같다는 노드 제약조건이라 할 수 있으며, 식 (3)은 각각의 링크에서 이동유량을 한정하는 링크 제약조건이라 할 수 있다.

이와 같은 문제의 해석방법으로는 링크의 흐름 $\{x_{ij}, (i, j) \in A\}$ 을 구성하는 유량벡터를 x 라 할 때, 유량벡터 x 는 제약조건식 (2)와 (3)을 만족하면 타당해라 할 수 있어 최소비용흐름 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 링크제약조건식 (3)을 만족시키면 가격벡터 p 와 유량벡터 x 는 상보여유정리(complementary slackness, CS)를 만족한다 할 수 있으며, 다음과 같은 유량-가격 추적이 가능하다.

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

$$l_{ij} < x_{ij} \rightarrow p_i \leq p_j + c_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (5)$$

x 가 타당해이고 (x, p) 가 상보여유정리를 만족하면, x 는 최소비용문제에 대하여 최적해이며, p 는 쌍대문제(corresponding dual problem)의 최적해라 할 수 있다. 이와 같은 최소비용흐름 문제는 Lagrangian Relaxation에 기초를 둔 쌍대좌표상승기법(dual coordinate ascent procedure)을 이용하여 효과적으로 풀 수 있다(Bertsekas과 Tseng, 1988a; Bertsekas과 Tseng, 1988b). 식 (2)는 전체 시스템의 수문학적 유량보존의 법칙을 나타내며, 식 (3)은 각 링크의 유량을 물리적 조건에 적합하도록 제약시키는 역할을 한다.

이와 같은 해석법을 이용하여 개발된 유역 네트워크 모형인 MODSIM (Labadie, 1994)은 그림 1과 같은 구조로 지표수 및 지하수가 연계된 물 수지 분석을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 최적화 알고리즘을 이용하여 수리권이나 용수배분 우선 순위에 따른 물 배분 문제의 해석이 가능하다. 그림에서와 같이 유역 물 수지는 저수지 및 공급시설의 운영방안을 포함하여 저수지 및 하도에서의 침투손실과 손실된 물의 지하수로의 충전, 다시 하천으로의 회귀 등 물 순환의 전 과정을 정량적으로 모의할 수 있다. 즉, 물의 재이용(renewable water)을 고려함으로써 보다 합리적으로 유역 개념의 수자원 이용방안을 모색할 수 있을 뿐만 아니라 실질적인 유역 물 이동실태를 모형에서 직접 고려할 수 있다.

그림 1에서 굵은 선의 표식(R, C, W)들은 저수지, 하천 및 취수 등 실제 시스템 구성 요소를 나타내며, I는 유입량 계산 노드(accounting inflow node)로 유입량 및 초기 저류량과 같이 시스템에 제공되는 총 유입량을 계산하고, D는 수요량 계산 노드(accounting demand node)로 시스템으로의 공급량을 계산하며, S는 저류량 계산 노드(accounting storage node)로 다음 단계로 이월되는 말기 저류량을 계산하고, SP는 여수로 방류 계산 노드(accounting spill node)로 충전치 못한 저수지 용량에 의해 조절이 불가능한 방류량을 계산하며, GW는 지하수 계산 노드(accounting groundwater node)로 지하수의 지표수간의 물 이동을 계산하고, 마지막으로 M은 물 수지 노드(accounting mass balance node)로서 시스템 전체의 물 수지를 유지시켜 준다.

3. 문제의 구성

본 연구의 목적은 우리나라의 대표적 물 부족 지역

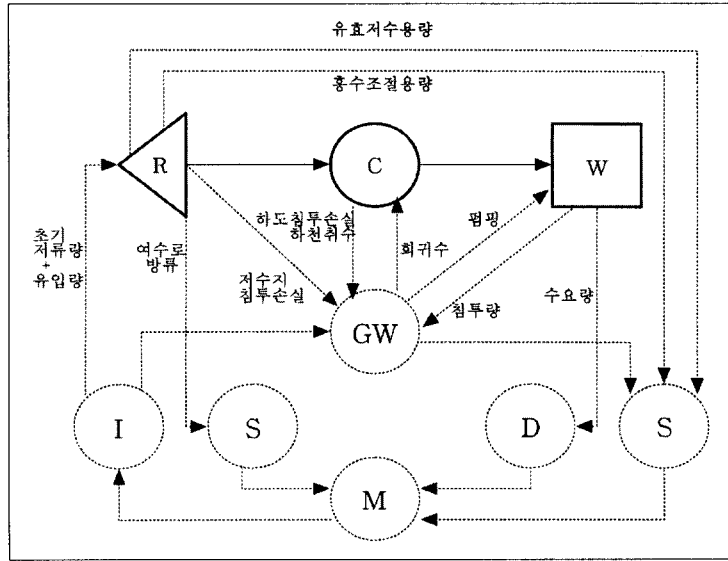


그림 1. 네트워크 모형의 물 수지 분석 체계

이라 할 수 있는 경북 동·남부지역의 수자원 공급문제를 분석하고 그 해결 대안을 찾는 데 있다. 이 문제는 현재 진행되고 있는 수자원 개발 전략과 일맥상통하며, 우리나라 수자원 공급과정에서의 문제점들을 상징적으로 가장 잘 보여주고 있다고 할 수 있다. 또한 이를 통하여 검토된 내용들은 다른 지역의 유사한 문제에도 우선적으로 고려할 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 생각되어 가능한 모든 수자원 개발 대안을 검토의 대상으로 삼았다.

이 지역은 근대화 사업의 일환으로 건설된 세계적 규모의 포항제철이 있으며, 여기에 용수공급을 위하여 다른 유역으로부터 대규모 도수가 이루어지고 있다. 또한 천년 고도의 경주가 인근에 위치하고 있어 관광용수의 증가와 관련 산업이 급속히 발전하고 있는 반면에 지형적 특성 및 기상기후조건, 유역 규모 등이 수자원 부존에 매우 열악한 상태로 급증하는 용수수요에 대처하기 어려운 실정이다. 이 지역이 위치하고 있는 낙동강 수계는 물이 풍족하지 못한 지역으로 상·하류간의 물 분쟁이 심하고 내륙 수계에서 임해공업단지용수공급을 전담하고 있어 수자원 이용 및 개발 등 모든 면에서 열악한 실정이다.

3.1 적용 대상 유역

대상 유역에는 그림 2와 같이 형산강이 위치하고 있고 주 수요처인 포항시가 하구에 위치하고 있다. 현재

용수공급체계는 낙동강 수계의 영천댐으로부터 도수되는 220.0천m³/일, 형산강 부조 취수장 100.0천m³/일을 수원으로 하는 포항공업용수도가 있으며, 낙동강 상류의 임하댐을 수원으로 하는 시설용량 136.2천m³/일의 포항권 광역상수도가 건설 중에 있다. 이 지역의 수자원 시설물은 영천댐 도수로의 조절지인 안계제와 형산강 하류에 위치한 부조 취수장 등이다.

이들 지역은 자체 유역의 수자원 부족량 때문에 외부 유역으로부터 용수를 도수하여 이용하고 있으며, 날로 증가하는 용수수요는 물 부족을 더욱 심화시키고 있다. 이 지역에서 가장 큰 용수수요처는 포항제철로 약 200천m³/일의 공업용수를 이용하고 있다. 이에 필요한 수자원은 대부분 인근유역의 영천댐으로부터 공급받고 있고 신규 수요량 증대에 따른 수자원 개발이 어려운 형편이다.

3.2 신규 수자원 개발 계획

용수공급 체계중 우리나라에서 가장 복잡하고 대안 개발이 어려운 지역중 하나인 경북 동·남부지역의 장래 용수수요를 해결하기 위한 방안들을 여러 측면에서 검토하였다. 이들 지역에서의 수자원 증대는 수문 및 지형조건, 용수수요와 공급 체계, 지표수 및 지하수등 가용 수자원에 대한 현장 조사와 중앙정부와 지방자치단체의 장래 수자원 개발 계획(건설교통부, 1997)을 모두 검토한 후 다음과 같은 개발 방안이 검토되었다.

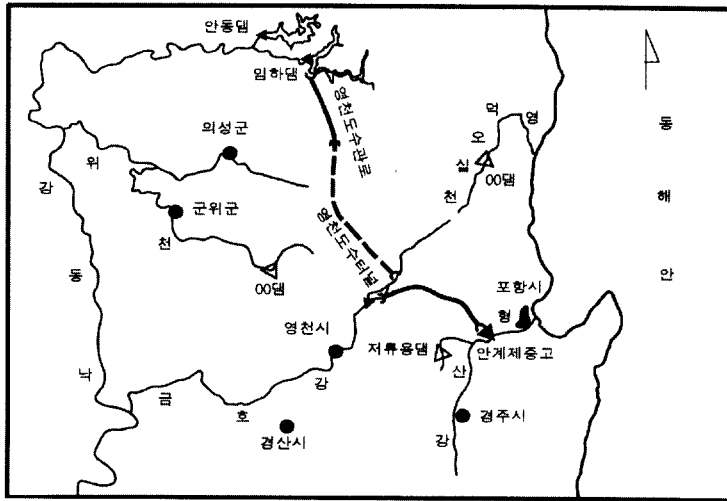


그림 2. 연구 대상 유역도

표 1. 제시된 대안의 장·단점 및 사업 가능성 평가

대안개발	대안의 장·단점	사업의 가능성
1. 신규 지표수 개발	개발이 용이하나 환경단체의 반대와 건설비 과다 소요	장기적 수자원 문제해결방안으로 최선의 대안
2. 기존 시스템 조정	포항제철의 재이용수 개발계획과 수질상태를 고려한 용수배분 계획 재조정	신규 수자원이 개발될 경우 전반적인 재조정 필요
3. 저류용댐	신규 수량 확보 측면에서 권장되나 대규모 입지가 적고 양수비용이 과다	하절기 잉여수량을 확보할 수 있어 유량증대 방안의 최우선 고려 대상
4. 기존댐 증고 방안	대규모(사업비) 및 추가 개발량(신규 개발량)에 따라 용수개발단가등 경제성이 결정됨	홍수시 무효방류되는 잉여유량을 조절하기 위한 증고로 수자원부존 및 수자원 개발 적지가 매우 열악한 지역에서의 차선의 수자원 개발 대안

신규 수자원 개발은 2개의 중·소규모 댐의 개발이 검토되었는데 동해로 흘러드는 오십천 유역에 댐을 개발하는 방안과 낙동강 상류 지류에 댐을 건설하는 대안이 제시되었다. 신규 지하수 개발 대안으로 부족한 지표수를 형산강에서 복류수를 개발하여 공급하는 방안이 검토되었으며, 형산강으로부터 풍수시 잉여 수량을 양수하여 저류한 후 갈수기에 공급하는 방안이 제시되었다. 또한 기존의 안계제를 증고, 저수용량을 증대시켜 형산강으로부터 양수한 후 이를 조절하여 공급하는 방안이 포함되었다. 기존 공급체계를 재조정하는 방안은 포항제철의 재이용시설 확장에 따른 잉여수량의 재배분과 수질이 비교적 떨어지는 형산강의 취수수를 공업용수로 대체하는 방안이 검토되었다. 따라서 연구 대상지역의 수자원 증대를 위하여 개발 가능한 모든 대안을 포함시켜 장래 수자원 개발 계획의 장단점

을 표 1과 같이 평가하였다.

3.3 수자원 평가 시스템 구성

포항 및 경주권 용수공급 시스템은 낙동강 상류지역인 임하댐과 영천댐 유역을 포함하여 경상북도 동·남부지역 및 형산강 일원을 포함하는 광역 수자원 시스템이라 할 수 있다. 이 지역의 장래 수자원 개발계획은 앞절에서 언급하고 있듯이 소규모 다수의 시설물에 의한 용수공급 대안이 주종을 이루고 있어 용수공급체계가 더욱 복잡해질 것으로 예상된다.

수자원 평가를 위한 시스템 구성은 이들 지역의 주 용수공급원이라 할 수 있는 영천댐과 형산강 그리고 이를 기반으로 하는 공급체계, 영천댐으로 도수공사가 진행되고 있는 임하댐, 그리고 신규댐 및 저류용댐이 포함되어 있다. 이와 같이 장래 복잡한 용수공급 상황

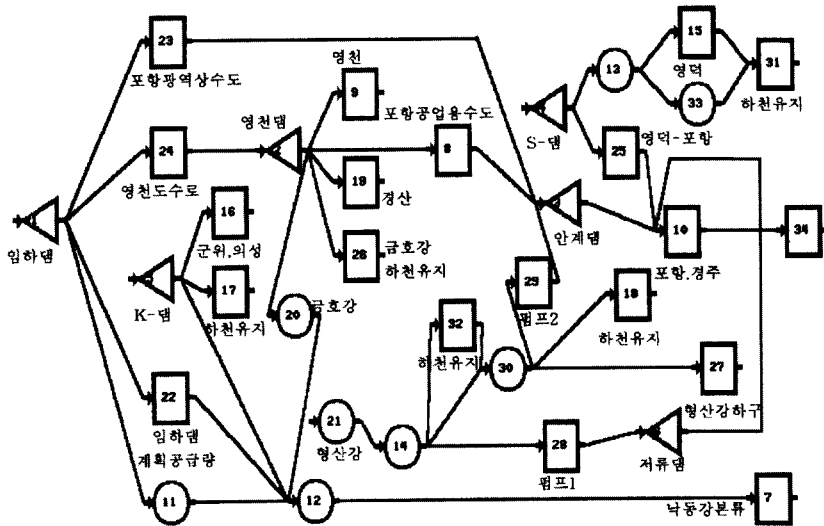


그림 3. 대안 평가를 위한 네트워크 모형의 구성

이 예상되는 대상지역의 물 수지 분석 체계를 네트워크 모형을 구성하면 그림 3과 같이 구성할 수 있다. 이 시스템은 전체 6개의 저수지로 구성되어 있으며, 19개의 수요노드와 유입량 노드로 구성되었다.

물 수지 분석 단위는 주요 수자원 시설물, 배수구역, 용수공급체계를 고려하여 이하댐에 의한 낙동강 본류 유역, 영천댐 하류, 형산강 유역, 그리고 K-댐 및 S-댐 유역으로 구분하고 K-댐과 영천댐 하류는 낙동강 본류에 합류시켰다. 이들 중 사용된 후 본류구간으로 회귀되는 경우에 대해서 농업용수의 경우는 35%, 생활 및 공업용수의 경우 공급량의 65%가 직하류 유역으로 회귀되는 것으로 고려하였다.

4. 수자원 평가

4.1 수자원 평가 시나리오 구성

해당유역의 대규모 수자원 시스템을 대상으로 수자원 평가를 위한 물 수지 분석을 수행하기 위해 제2장

에서 제시하고 있는 해석방법을 적용하기 위한 조건들은 다음과 같다. 우선 유입량 자료계열은 연구대상 지역의 수문관측 기록 중 시스템을 구성하는 모든 지점의 관측기록이 공유되는 20년간('73~'92)의 월별자료를 이용하였다. 용수공급 평가지점은 그림 3을 통하여 알 수 있듯이 포항 및 경주권의 용수공급상황은 10, 25, 28, 29번 노드를 통하여, 이하댐으로부터 포항권 광역상수도는 23번 노드로, 금호강 수질개선을 위한 영천댐으로의 도수는 24번 노드를, 영천댐으로부터 안계제로 도수되는 포항권 공업용수도는 8번 노드를 이용하여 평가하였다.

이하댐으로부터의 낙동강 본류 공급량은 22번 노드를, 형산강 유역의 하천유지유량은 18번과 32번 노드를 이용하였으며, 신규댐인 S-댐의 경우는 15번 노드를 통하여 영덕지역 생활용수와 오십천의 하천유지유량을 평가하였다. 한편 저류댐으로의 양수실적은 28번 노드와 안계제로의 양수실적은 29번 노드를 통하여 분석하였다. 기타 노드는 유역 전반적인 수자원 시스템의

표 2. 장래 용수공급량 및 예상 부족량

단위 : 천m³/일

구 분	1996	2001	2006	2011	2016	2021
수요량	575	750	850	1,008	1,084	1,151
공급량	594	749	749	749	749	749
부족량	-	1	101	259	335	402

표 3. 신규 수자원 개발 계획

개발대안	개발기간	개발량(천m ³ /일)	공급지역(천m ³ /일)
K-댐 개발	2000~2004	79.7	Node 16 경산 (58.7) Node 16 군위 (15.0) Node 16 의성 (6.0)
S-댐 개발	2000~2004	93.4	Node 25 포항 (81.4) Node 15 영덕 (12.0)
안계제 증고	2004~2008	40.0	Node 10 포항 (25.0) Node 19 영천 (15.0)
저류용댐	2000~2004	50.0	Node 10 경주 (23.0) Node 19 경산 (27.0)

요소로 작용하고 있으나 분석의 편의를 위하여 추가된 것들이다.

용수수요량은 생활·공업용수와 농업용수로 구분하고 월 단위로 배분하여 적용하였다. 이 지역의 생활·공업용수는 2011년 기준으로 1일 1,008천m³의 수요와 2021년에는 1,151천m³의 수요가 전망된다. 하천유지용수는 임하댐의 경우 계획공급량을, 형산강, 오십천 및 위천 유역은 평균갈수량을 목표유량으로 적용하였다.

4.2 수자원 평가

개발된 물 수지 모형을 이용하여 각각의 대안을 고려한 수자원 평가는 크게 몇 가지로 나누어 분석할 수 있다. 우선 이 지역의 특성상 지하수 개발이 어려우므로 지표수 개발을 중심으로 신규 중형·소규모 댐을 계획하고 하천유지 및 생태계의 피해가 없는 범위 내에서 잉여 수량을 취수하여 저류할 수 있는 저류용댐의 개발과 기존 저류댐을 증고하여 침투 유입량의 조절효과를 높이기 위한 기존댐 증고 방안이 수자원 개발의 핵심이다. 이와 아울러 기존 용수공급 체계를 각 대안으로부터의 공급능력을 고려하여 재조정하는 것이다.

이를 위한 용수공급 평가는 분야별 용수공급 우선 순위를 결정할 수 있는데 현재 특별히 정해진 기준은 없으나 통상적으로 생활용수와 공업용수를 같은 비중으로 하여 최우선적으로 고려할 수 있고, 다음은 농업용수를, 마지막으로 하천유지유량증대를 고려할 수 있다. 지역적으로는 포항과 경주를 제외한 모든 지역에서의 용수수요를 우선적으로 공급하고 포항·경주지역의 생활 및 공업용수를 다음 순위로 고려하였고, 임하댐으로부터 낙동강 하류로의 용수공급은 포항지역 추가 도수를 감안하여 최하순위로 고려하였다. 낙동강 본류를

제외한 기타 하천의 하천유지유량은 생활·공업수와 같은 수준으로 최우선적으로 공급하는 것으로 하였다. 이와 같은 용수공급 우선 순위를 식 (1)의 비용변수에 적용하면 순위에 따라 용수배분이 가능하며, 표 3에서 제시된 신규 수자원 개발 대안을 기존 시스템에 추가하여 네트워크 모형에 의한 수자원 평가를 수행하였다.

우선 본 연구의 목적인 포항 및 경주권의 용수공급은 제시된 신규 수자원 시설물이 모두 완성될 경우 과거 20년간의 수문조건에서 2011년 목표의 용수공급은 기타 지역의 생활·공업수 및 농업용수와 하천유지용수를 충족시키면서 그림 4와 같이 98%의 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 분석되었다. 이때 신뢰도 평가는 전체 기간중 월별 용수수요를 충족시키는 확률로 평가하였다. 즉, 수자원 계획에서 생활용수 및 공업용수 보장을 90%이상으로 결정할 때 안정적인 용수공급이 기대된다. 이와 같은 결과는 오십천과 형산강의 하천유지용수를 만족하고 영덕과 금호강 유역으로 계획된 일부 지역의 공급량을 충족시키는 조건으로 분석된 것으로 2011년까지 이들 지역에 계획된 용수공급이 가능함을 보여준다.

한편, 이와 같은 공급계획에 따라 현재 임하댐으로부터 낙동강 하류에 계획된 공급량중 일부가 포항권으로 추가 도수됨에 따라 임하댐으로부터 낙동강 하류에 계획된 공급량의 위험도는 그림 5와 같이 11%에 이르는 것으로 분석되었다. 위험도 평가는 임하댐으로부터 낙동강 하류에 계획된 월별 공급량을 달성하지 못하는 부족량 발생횟수를 초과확률로 계산하였다. 이는 저류용댐의 개발 등 자체유역으로부터 최대한의 용수공급 방안을 마련하였음에도 발생한 것으로 연구대상지역의 신규 수요를 우선적으로 고려한 결과에 기인한다. 이 부족량 중에는 낙동강 하류로의 생활 및 공업용수도

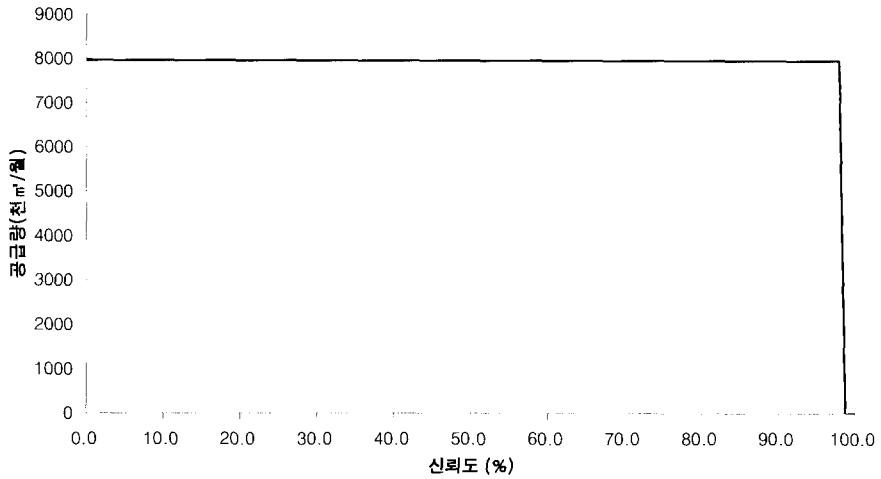


그림 4. 포항 및 경주 지역 용수공급 신뢰도 분석

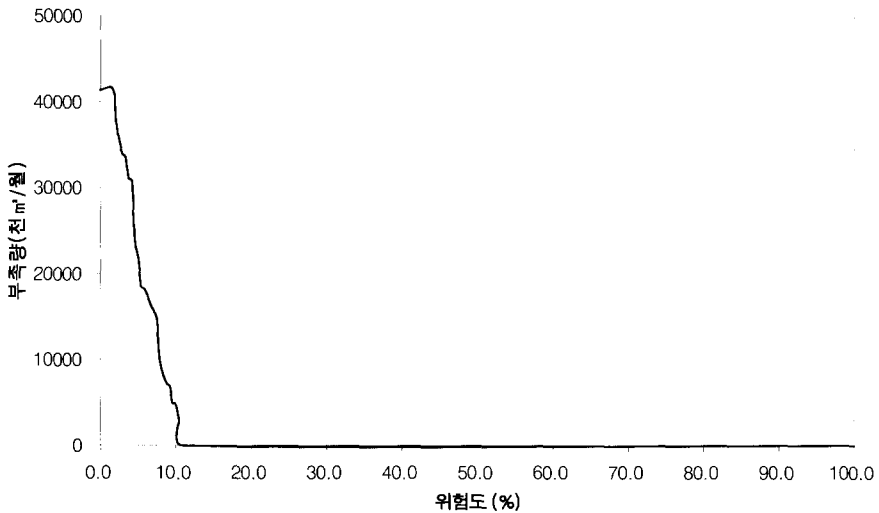


그림 5. 임하댐으로부터 낙동강 본류 계획공급량 위험도 분석

포함하고 있어 낙동강 하류에 대한 추가적 용수공급계획이 마련되어야 할 것이다.

이와 아울러 형산강 본류에서 저류용댐과 연계제로 양수하는 경우 형산강 하류의 하천 유지 유량을 충족시키면서 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 연평균 양수 가능일수는 169일, 208일로 계산되었다. 여기서 양수 가능일수는 하천유지용수나 하류 취수량을 보장하고 남은 수량을 저류댐으로 양수하는 것으로 여러 대의 펌프가 설치될 계획으로 있어 월별 총 양수량을 1일 계획양수량으로 환산한 것이다. 이렇게 계산된 두 지점

에서의 양수 가능량은 연간 84,797천m³ 및 62,138천m³으로 나타나 400천m³/일의 수자원 증대에 상당한 효과를 볼 수 있을 것으로 분석되었다. 즉, 저류용댐의 개발과 연계제의 증고는 자체 유역에서의 수량확보 측면에서 가장 바람직한 대안이 될 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 네트워크 모형을 이용하여 우리나라 경상북도 동항·남부 지역의 수자원 공급 시스템을 구성한 후 장래 용수공급 능력을 평가하기 위한 물 수지 분석

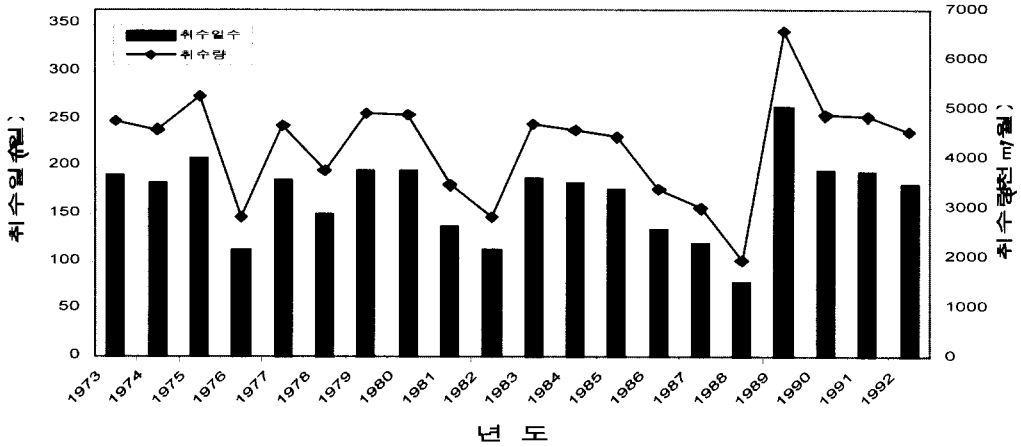


그림 6. 저류댐으로의 월평균 양수 가능량과 양수 일수

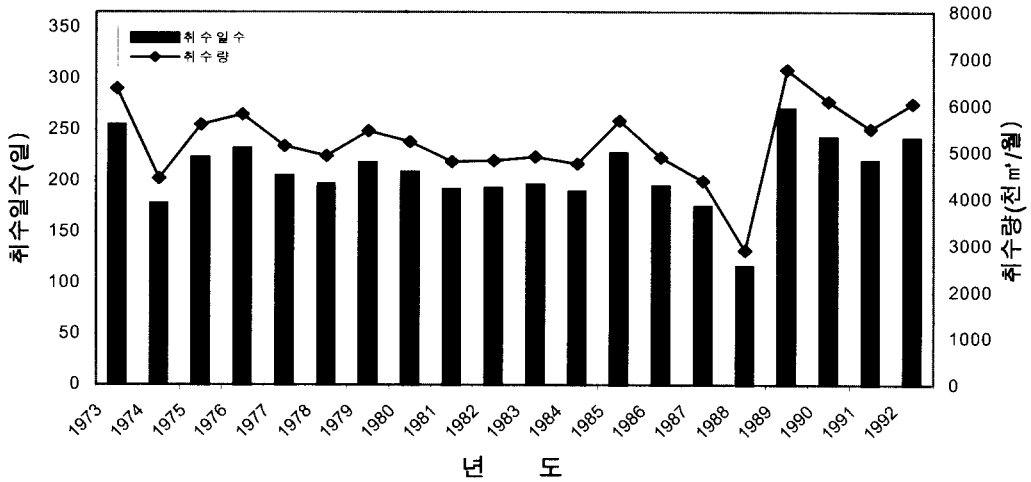


그림 7. 단계제로의 양수 가능량과 양수 일수

을 실시하였다. 이들 지역과 같이 용수공급체계가 복잡하고 용수이용도가 높은 지역의 수자원 평가는 기존법을 포함하여 하천으로부터의 양수 등 인위적 물 이동을 적극 개발하여 가용 수자원을 최대한으로 확보하는 차원에서 이루어져야 한다. 연구결과에 따르면 새롭게 제시된 수자원 개발대안에 따라 용수공급 시스템이 2011년까지 건설된다면 포항 및 경주권의 용수공급 신뢰도는 95% 이상을 확보할 수 있을 것으로 분석되었으며, 입하댐의 하루 계획공급량은 다소 훼손되는 것으로 나타났다. 또한 네트워크 모형은 여러 가지 수자원 시스템과 다양한 수자원 개발 방안을 종합적으로 고려하여 용수공급 우선 순위(수리권 혹은 공급우선순위)에

의한 수량배분과 이와 관계된 수자원 시설물의 운영결과를 분석하는데 하나의 의사결정 도구로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 건설교통부 (1997). 수자원 장기 종합 계획.
- 연구방, 심순보 (1994) "Network 모형에 의한 수자원의 최적 배분." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권, 제1호, pp. 111-121.
- Bertsekas, D. P., and Tseng, P. (1988a). "Relaxation methods for minimum cost ordinary and generalized network flow

- problems." *Operations Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 93-114.
- Bertsekas, D. P., and Tseng, P. (1988b). "RELAX: A computer code for minimum cost network flow problems." *Annals of Operations Research*, Vol. 13, pp. 127-190.
- Bertsekas, D. P., and Tseng, P. (1994). *RELAX-IV: A faster version of the RELAX code for solving minimum cost flow problems*. Completion Report under NSF Grant CCR-9103804, Department of Electrical Engineering and Computer Science, M.I.T., Cambridge, Mass.
- Bethel, R. (1986). *Description of river basin simulation model (RIBSIM)*. Leonard Rice Consulting Water Engineers, Inc., Denver, Colorado.
- Bridgeman, S. G., D. J. W. Norrie, J. J. Cook, and B. Kitchen (1989). "Computerized decision-guidance system for management of the trent river multireservoir system," in *Computerized Decision Support Systems for Water Managers*, J. Labadie, et al. (eds.) ASCE, New York, pp. 280-290.
- Chung, F. I., S. K. Aurora, and M. C. Archer (1989). "Stochastic evaluation of reservoir operation rules," in *Computerized Decision Support Systems for Water Managers*, J. Labadie, et al. (eds.) ASCE, New York, pp. 131-140.
- Fredericks, J. W., and Labadie, J. W. (1995). *Decision support system for conjunctive stream-aquifer management*. Open File Report No. 10, Colorado Water Resources Research Institute, Colo. State Univ., Ft. Collins, Colo.
- Hydrologic Engineering Center (1991). *HEC-5: Simulation of flood control and conservation systems*. User's Manual, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- Labadie, J. W. (1994). *MODSIM: Interactive river basin network flow model*. Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.
- Labadie, J. W. and C. Sullivan (1986). "Computerized decision support systems for water managers," *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp. 299-307.
- Loucks, D. P. and K. A. Salewicz (1989). *IRIS: An interactive river simulation program: General introduction and description*, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- Rau, D. M. (1987). "Water rights accounting program," *Proceedings of the Colorado Water Engineering and Management Conference*, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.
- Shafer, J. M. (1979). *An interactive river basin water management model: synthesis and application*. Technical Report No. 18, Colorado Water Resources Research Institute, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.
- Texas Water Development Board (1972). *Economic optimization and simulation techniques for management of regional systems: River basin simulation Model SIMYLD-II. Program Description*, Systems Engineering Division, Austin Texas.
- U. S. Bureau of Reclamation (1991). *HYDROSS Version 4.3*. Information Resources Division, Billings, Montana.
- Wurbs, R. A. and W. B. Walls (1989). "Water rights modeling and analysis," *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, No. 4, pp. 416-430.
- Yeh, W. (1985). "Reservoir management and operations models: A State-of-the art review," *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.

(논문번호:98-073/접수:1998.11.26/심사완료:1999.02.18)