韓國水資源學會論文集
第44卷 第12號·2011年 12月
pp. 1001~1013

http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2011.44.12.1001

다수원 상수도시스템 연계운영을 위한 최적 네트워크 모형 구축

Development of Optimal Network Model for Conjunctive Operation of Water Supply System with Multiple Sources

유 태 상* / 하 성 룡** / 정 태 성***
Ryu, Tae Sang / Ha, Sung Ryong / Cheong, Tae Sung

Abstract

Development of an optimal water supply system considering water quantity, quality, and economical efficiency is needed to decide optimal available area by combine water supply systems in overlapped area where are more than 2 water sources. The EPAnet and the KModSim were coupled to develop optimal network model. The developed network model was calibrated by measured data from water supply system in Geoje City, Korea in 2007 which have three water sources such as Sadeong booster pumping station, Guchun dam reservoir and Yoncho dam reservoir. The optimum network model was validated by operating results of 2011 to assess the economically optimized service area and optimal pump combination under the given hydraulic operating rules developed in this study. The developed model can be applied into designing water supply systems and operating rules for the conjunctive operation since the model can give the optimal solution satisfied with water quantity, economical efficiency and quality.

Keywords : conjunctive operation, multiple sources, water supply system, optimal network model

요 지

이웃한 상수도시스템의 공급 가능지역이 중첩될 경우, 이들 시스템을 연계함으로써 경제성과 수질 조건을 만족시키는 조건별 용수공급체계를 구축하는 것이 필요하다. 용수수요 조건별 경제적 급수구역과 최적 펌프운영율을 산정하기 위하여 관망수리해석 모형(EPAnet)과 네트워크 최적화 모형(KModSim)을 연계 하는 최적 네트워크 모형을 개발하였다. 개발된 최적 네트워크 모형을 사등가압장, 구천댐 그리고 연초댐의 3개 상수원이 존재하는 거제지역 상수도시스템에 적용하고 2007년 운영 결과와 비교하는 방법으로 모형을 검정하였다. 최적 네트워크 모형의 적용성을 검토하기 위하여, 2011년 용수자료를 이용하여 경제적 급수구역 변경에 따른 펌프운영 및 수질의 적정성을 평가 하였다. 평가 결과 본 모형은 수량, 경제성 그리고 수질을 모두 만족하는 최적해를 구하는 것으로 나타나 송배수계통간의 최적 설계 혹은 최적연계운영율을 구하기 위한 모형으로 활용이 가능하다.

핵심용어 : 연계운영, 다수원, 상수도시스템, 최적 네트워크 모형

* 한국수자원공사 임진강 건설단 건설관리팀장 (e-mail: ryuts@kwater.or.kr)
Head of constuction Management, Korea Water Resources Cooperation, Daejeon 306-711, Korea
** 충북대학교 공과대학 도시공학과 교수 (e-mail: simplet@chungbuk.ac.kr)
Professor, Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea
*** 교신저자, 국립방재연구원, 대외협력팀장 (e-mail: bangjaeman@korea.kr)
Corresponding Author, Head fo External Affairs, National Disaster Management Institute, 135 Mapo-daero, Mapo-gu, Seoul 121-719, Korea

1. 서 론

우리나라의 수도시설은 한정된 수자원으로 인하여 단일 취수원의 급수지역을 확대하는 방법으로 여러 도시에 용수를 공급하고 있으며, 취수원의 공급 능력을 초과하는 수요량이 발생하면 다른 수원을 개발하는 공급 형태를 반복하여 왔다. 그 결과 한 도시에 다수의 상수도시스템이 존재하여 이들 시스템의 용수공급 가능지역이 중복됨에도 불구하고 개별적으로 시스템을 운영하고 있는 실정이다. 현재 우리나라 대부분의 광역상수도 관망 형태는 순수 수지상 연계 방법으로 이루어져 있어 인접 상수도 시스템을 연계하는 급수체계구축 사업이 진행되면 복합형(수지상+고리형) 연계 형태로 발전할 것으로 전망된다. 이러한 복합형 연계 형태를 가진 광역상수도 시스템은 현재 충남 중부와 서부 지역 그리고 전북지역에 구축되어 있다(한국수자원공사, 2001). 최근의 급격한 도시확장 및 인구증가는 기존 용수공급체계의 변화를 요구한다. 용수증가에 대처하는 방안으로는 새로운 상수원을 개발하거나 기존의 용수공급망을 연계하는 광역연계공급체계를 구축하는 방안이 있다. 최근 들어 새로운 상수원을 개발하는 것이 어려워짐에 따라 광역연계공급체계를 구축함으로써 용수부족을 해결하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 특히 하나의 상수원을 확장하여 공급하는 것이 어려울 경우 주변의 상수원을 연계하여 공급하는 것이 필요한데, 이 경우에는 운영비용을 최소화 하면서 수요처에 적정의 용수를 공급할 수 있도록 최적 연계운영하는 것이 필요하다. 연계운영을 위해 수원을 달리하는 2개 이상의 상수도시스템으로부터 용수를 공급하는 경우, 수요량을 충족하는 측면에서 단순 밸브개폐 만으로도 연계운영이 가능하나, 수원별로 수처리비용과 운송경비로 인해 발생하는 운영비용이 다를 경우, 이를 고려하여 비용을 최소화하는 운영이 필요하다. 본 연구에서는 수원을 달리하는 2개 이상의 상수도시스템이 하나의 도시에 존재하여 용수공급 가능지역이 중복되는 경우 최소의 비용으로 중복지역에 용수를 공급하기 위한 네트워크 최적화 모형을 개발한다.

최근 들어 우리나라에서도 발달된 정보통신기술을 기반으로 수도시설 운영체계를 통합하여 운영함으로써 비용을 절감하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 주로 펌프 운영 시간과 운영대수의 경제적 조합을 찾아 에너지비용을 줄이는데 집중하고 있다. 초기의 상수도시스템 최적운영 연구는 운영비용을 일정하다고 가정하고 최적배분경로를 결정하는 연구가 주로 수행되었다. Stephenson (1969)은 비용단가를 가정한 다수의 연계저수지의 비용을 최소화하는 최적배분경로를 결정하기 위하여 교통운송이론(transportation theory)을 적용하였고, Clark et al. (1986)은 물공급시스템에서의 경제성을 평가하기 위해 EPA(미 환경청)에서 구축한 Water Supply Simulation Model (WSSM) 모형에 관망 시뮬레이션 모델을 적용하였다. Randall et al. (1984, 1986, 1990)은 선형계획법(LP)을 적용하여 상수도시스템 운영을 통한 수입과 전력비용간의 차이를 목적함수로 수요처별 공급량를 결정하였다. 그는 더불어 본 모형을 적용하여 가뭄기간 중 장기간 물공급계획과 실시간 운영계획 수립연구를 수행하였으며, 1997년에는 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming, MIP)를 사용하여 우선순위를 목적함수에 반영 월단위 물배분계획을 결정하는 연구를 수행한 바 있다(Randall et al., 1997).

수자원배분에 널리 사용되는 최적화모형이 상수도 공급·배분 계획에 사용된 예는, 도시지역의 최적 용수공급계획을 수립하기 위하여 최적 물배분 도구인 MODSIM을 이용한 연구가 다수 있었다(Resource Consultants Inc., 1985, Frick et al., 1990). 송·배수계통의 펌프의 조합 또는 운영스케줄을 찾아 에너지 비용을 줄이는 연구로서 Ormsbee and Lansey (1994)은 적정 펌프의 개수와 펌프장의 개수를 설정하는 방법으로 물리적 시스템 구성 기준을 제시하였고, Boulos et al. (2004)은 시스템 구성이 최적 해에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다. Orr and Bryan (1994)은 배수시스템의 실시간 제어를 위한 통합접근법을 제시하고 비용최소화, 수리적 제약, 수질관리 등이 장래 수도시스템을 다목적으로 운영하는데 있어 가장 중요한 목적함수임을 강조하였다. Sakarya et al. (2000)은 수질과 펌프운전시간, 비용 각각 별도로 목적함수를 구성하여 EPAnet 모형과 비선형 최적화 모형인 GRG2를 연계하는 방법으로 관망의 최적화문제를 해석하였다. 다수원 송배수계통간의 운영 중심 연구로는 Munavalli and Kumar (2003)이 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 기법을 적용하여 다수원의 수질 동적 거동을 모의하고 예측치와 실측치를 비교하는 방법으로 최적 염소 주입률을 구하였다.

국내의 관련 연구로서 한경석(1983)은 다수원 상수도 시스템에 네트워크 이론을 적용하여 최적화 설계를 수행한 바 있고, 고석구 등(1992)은 에너지비용 최소화 그리고 수요부족 최소화 등 다목적 문제를 해결하기 위하여 다목적 분석기법인 DP를 이용하여 최적펌프 운영시간, 총 에너지비용, 배수지의 최적 저류량 등을 결정하였다. 윤재홍 등(1998)의 배수지역내 잔류염소 평활화를 위한 재염소

투입 최적위치 선정 연구를 수행하였다. 하성룡 등(2000)은 GA를 이용하여 다수원에서의 최적 관로노선 선정에 관한 연구를 수행한 바 있다. 강현진 등(2003)은 비용을 최소화하는 방안으로 펌프가동시간을 결정하였으며 이때 체류시간을 최소화하는 방향으로 수질도 함께 고려하였다. 한국수자원공사(2001, 2003)는 체류시간을 최소화하기 위하여 최적 네트워크 모형을 이용하여 최단 수송거리를 구하였다. 박희경 등(2004) 그리고 최승일(2006)은 선진국 대도시 사례 조사를 통해 공급시스템의 에너지 비용은 공급량, 송수거리, 급수구역의 지형적 조건에 영향을 받으므로 다수의 수원에서 동일한 에너지 비용으로 어느 지역까지 공급하는 것이 최적인지를 결정하고 그에 따라 급수구역과 공급량을 결정하는 것이 중요하다고 발표하였다.

본 연구의 목적은 이웃한 송배수계통간의 연계운영을 통해 경제성과 수질 조건을 만족하면서 용수수요 조건별 경제적 급수구역, 최적 펌프운영을 구하기 위한 네트워크 최적기법을 개발하는 것으로서 Boulos et al.(2004)의 분류에 따르면 LP 또는 NLP 기법에 해당된다. 네트워크 최적기법을 개발하기 위한 시범도시로 3개의 각기 다른 수원을 가진 송·배수계통이 급수구역 경계에서 만나는 거제시 상수도시스템을 선정하였다. 거제시 상수도시스템은 취수 또는 송수, 배수 계통상에 모두 가압장이 위치하고 있어 에너지 저감을 고려한 수도시설 운영이 요구되고 있으며, 기 설치된 전체 상수도 시설용량을 대부분 사용하고 있어 향후 증설이 요구됨에 따라 운영의 효율성 향상이 필요하다. 본 연구에서는 관망해석모형인 EPAnet과 네트워크모형인 KModSim을 결합한 네트워크 최적기법을 개발하고 현재 운영 중에 있는 거제시 상수도시스템에 적용하여 최적 네트워크 모형의 적용성을 검토한다. 개발된 네트워크 최적기법은 장래 물수요 증가 발생에 따른 급수구역 분할관리 계획을 수립, 상수도의 시설계획 및 유지관리계획 그리고 경영계획 등의 합리적인 의사결정에 활용 가능할 것으로 기대된다.

2. 연구대상지역 선정

수자원장기종합계획(건교부, 2001) 수립 이후, 거제시의 상수도시스템은 공급을 최대화하기 위하여 권역 간 공급네트워크를 연계하는 방향으로 운영체계를 변화하고 있다. 최근에는 2~3개 광역상수도와 다수의 지방상수도를 포함한 중권역 단위의 수도시설을 통합·운영하려는 노력이 진행 중에 있다. 거제시 지방상수도 운영효율화사업계획(거제시, 2006)에 의하면 도시 발전 등으로 용수수요가 꾸준히 증가되어 3개 수원의 상수시스템이 모두 가동되더라도 2016년에는 일 최대 수요 기준으로 물부족이 전망되고 있다. 특히 거제시 지역은 광역상수도와 지방상수도가 통합 운영되는 지역으로서 지역별로 운영비용의 차이가 크고 인접 수도시설간 급수지역이 중복되는 입지적 조건을 갖추고 있다. 남강광역상수도 II단계가 남강댐으로부터 원거리 송수되어 오는 관계로 전력비가 많이 소요되고, 수질 확보를 위한 약품투입비용이 상대적으로 더 소요되어 거제공업용수(구천댐, 연초댐) 시스템 운영비용이 높다.

본 연구에서는 복합형 급수체계를 가지고 있으면서 안정적인 용수공급과 경제적 비용 최소화를 위해 중권역 단위의 통합 상수도시스템이 필요한 거제시 지역을 연구 대상지역으로 선정하였다. 거제시 상수도는 Fig. 1과 같은 복합형 급수체계로 발전 중에 있는데, 초기에는 연초정수장(16,000 m^3/일) 만을 설치(1979년 12월)하고 상수도시스템을 운영하였으나, 도시구역 확대, 공업단지 개발 그리고 도시화로 인한 생활수준의 향상, 관광인구의 증가 등으로 용수 사용량이 증가함에 따라, 차례로 동부정수장(2,500 m^3/일), 구천정수장(20,000 m^3/일), 둔덕정수장(1,700 m^3/일), 일운정수장(4,000 m^3/일) 그리고 학동정수장(1,500 m^3/일)을 추가 설치·운영 중이다. 이들 취수장과 정수장의 시설용량 및 평균 급수량은 Table 1에 수록하였다.

광역상수도 급수구역은 Fig. 1에서도 알 수 있듯이 구천정수장으로부터 신현읍 일부, 아주배수지, 장승포배수지로 송수된 후 5개 동에 물을 공급하고 있으며, 남강시스템은 사등가압장을 경유 신현통합배수지, 사등2배수지, 옥포통합배수지, 연초배수지, 하청배수지, 장목배수지로 송수된 후 7개 읍면에 공급하고 있다. 그 외 급수구역은 거제시 상수도에서 공급하고 있는데, 구천댐 저류수는 동부·학동·망치 3개의 정수장에서, 소동저수지 저류수는 일운정수장에서 정수처리 후 공급중이다. 사등에 위치한 펌프 시설용량은 22,320 m^3/일, 사등보조 펌프시설용량은 10,080 m^3/일, 구천 펌프시설용량은 11,952 m^3/일 그리고 연초 펌프시설용량은 8,064 m^3/일 이다. 전체 시설용량은 102,200 m^3/일로써 광역상수도가 91,000 m^3/일로 대부분을 차지하고 있으며, 거제시 5개 정수장의 시설용량은 11,200 m^3/일이다. 거제시 상수도시스템은 취수장 2개소, 정수장 5개소, 가압장 10개소, 배수지 18개소를 갖추고 있으며, 광역 포함 하루 평균 80,127 m^3의 물을 정수하여 1읍, 6동, 9면에 수돗물을 공급하고 있다. 1995년 장승포시와 거제군이 거제시로 통합되면서 Table 1과 같은 지금의 상수도시스템이 구축·운영 중이며, 망치정수장(1,500 m^3/일)은 수요 증가를 반영하기 위해 1998년에 추가적으로

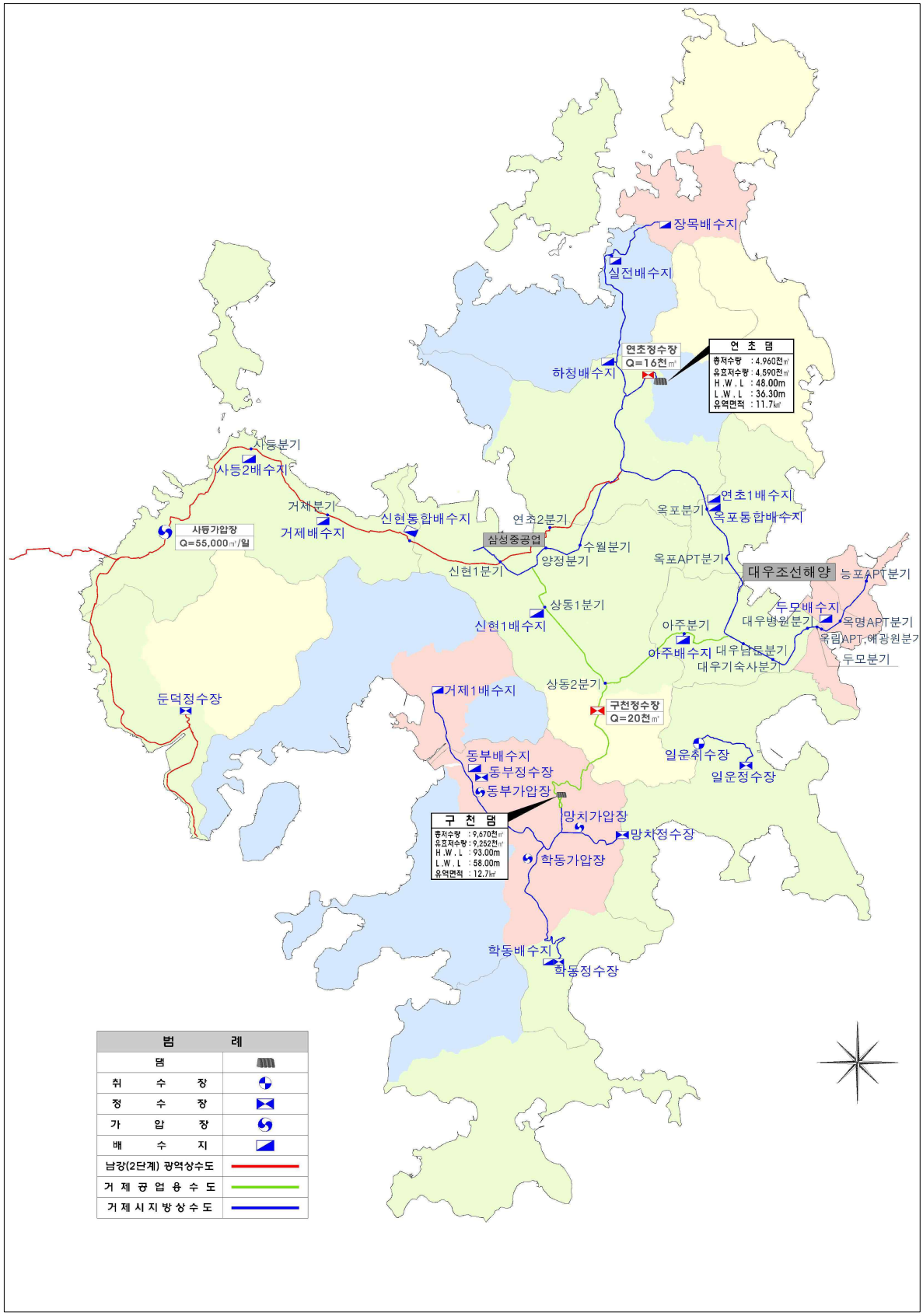

Fig. 1. Inter-regional and Municipal Water System of Geoje City

Table 1. Water Supply System of Geoje City

취수장	정수장	시설용량(m^3/일)	평균급수량(m^3/일)	급수구역
계		102,200	80,127	
광역 상수도시스템		91,000	72,427	
남강댐	사천	55,000	52,754	신현읍, 사등면
연초댐	연초	16,000	운 휴	연초, 하청, 장목면, 옥포1.2동
구천댐	구천	20,000	19,673	신현읍, 장승포, 마전, 능포, 아주동
거제시 상수도시스템		11,200	7,700	
소동저수지	일운	4,000	2,500	일운면
구천댐	동부	2,500	2,300	동부, 거제면
구천댐	학동	1,500	900	동부, 남부면
둔덕천	둔덕	1,700	1,100	둔덕면
구천댐	망치	1,500	900	일운면

Table 2. The Basic Theory of Hydraulic Analysis Model and Optimization Model

구 분	수리해석모형	선형계획모형	KModSim모형
목적함수	-	$\text{Max}\sum_{\ell\in A}(r_\ell - c_\ell)q_\ell$ ℓ=링크; A=네트워크상의 모든 링크; r_ℓ=판매수익;	$\text{Min}\sum_{\ell\in A}c_\ell q_\ell$ c_ℓ=공급비용; q_ℓ=링크 ℓ의 링크유량
연속방정식	$\sum_{k\in O_i}q_k - \sum_{\ell\in I_i}q_\ell = d,\ i\in N$ q_k=노드 i의 유입량; N=노드 총수 q_{dit}=시간 t일 때 노드 i의 수요량	$\sum_{k\in O_i}q_k - \sum_{\ell\in I_i}q_\ell = S,\ i\in N$ S_{it}=시간 t일 때 노드 i의 저류량 O_i=노드 i에서 시작되는 모든 링크	$\sum_{k\in O_i}q_k - \sum_{\ell\in I_i}q_\ell = b,\ i\in N$ b_{it}=시간 t일 때 노드 i의 유입·수요량 I_i=노드 i에서 끝나는 모든 링크
에너지방정식	$\sum_{\ell\in NJ}E_P = \sum_{\ell\in NJ}h_L$ h_L=마찰손실수두; E_P=에너지수두	$E=\lambda Q h_a$ λ=에너지 상수; Q=유량; h_a=펌핑수	$E=\lambda Q h_a$
마찰손실수두	$h_L = YL$ Y=동수경사=$0.887\times10^{-3}\times\frac{Q^{1.852}}{D^{4.870}}$ L=관로연장; D=관경	$\sum F_{It} \le TPS_I$; TPS=정수용량 $F \le \Pi PE_I$; ΠPE=송수용량 $\sum F_{Ot} \le PCAP_I$; $PCAP$=펌핑능력	$l_{\ell t} \le q_\ell \le u_{\ell t}$ $l_{\ell t}$는 시간 t일 때 링크 ℓ에서의 하한치, $u_{\ell t}$는 시간 t일 때 링크 ℓ에서의 상한치
시설제원	펌프특성곡선, 수원지 저수용량, 수위	$S_{\min} \le S_\ell \le S_{\max}$	펌프시설용량, 정수장 시설용량, 펌프대수, 탱크 용량 및 수위, 저수지 용량 및 수위

구축 운영 중에 있다.

3. 최적 네트워크 모형 개발

NJ개의 절점(nodes), NP개의 관로(pipes) 그리고 NF개 고정절점(fixed nodes)을 갖는 복합형 상수도시스템을 해석한다고 할 때, 수리학적으로 모든 절점에서 동시에 용수공급이 가능한 인접 계통간 연계 운영 경우의 수는 관로(nl)의 밸브 개폐 조작에 따른 경우의 수(2^{nl}), 각 계통(nn)의 펌프(np)운영을 위한 펌프조합 경우의 수($nn\times2^{np}$) 그리고 수질까지 고려할 경우에 운영시간(nq)과 수요 패턴(nd)에 따른 경우의 수를 고려하여야 하므로 최대 경우의 수가 $2^{nl}\times nn\times2^{np}\times nq\times nd$이 된다. 따라서 모든 경우의 수에 대해 수치모의를 반복하고 이 결과를 비교한 후 최적해를 찾는 방법은 효율적이지 못하다. 즉, 본 연구와 같이 경제성과 수질 조건을 만족하는 최적 급수구역을 결

정하는 경우, 펌프운영 및 밸브개폐에 따른 경우의 수가 너무 많아져 해석에 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 반복 연산을 최소화하기 위해 최적화 모형 중 선형계획모형과 KModSim 네트워크 모형을 비교·분석하였다(Table 2). 선형계획모형은 고정 수요를 만족시키기 위한 최적공급량을 결정하는데 유리한 방법으로서 본 연구에서와 같이 중복구간에서의 최적수요량을 결정하는 문제를 해결하는 데는 KModSim 네트워크 모형이 유리하다. 본 연구에서는 비교연구를 통하여 EPAnet 모형과 KModSim 네트워크 모형을 연계 결합하는 최적 네트워크 모형을 개발하였다.

최적 급수구역을 구하는 접근법으로 수리적 간섭을 고려한 관망수리해석 모형을 사용할 경우는 여러 번 반복계산으로 상수도시스템 전체의 경제적인 펌프운영조합을 구하는 것은 가능하나, 계통별 경제적 급수 구역을 결정하는 것은 어렵다. 우선순위를 고려한 네트워크 비용 최적화는 거제시와 같이 공급비용에 차이가 있는 경우 비용을 최소화 하는 최적 네트워크 흐름 해석에 있어 유리하다. 본 연구에서는 시스템운영에 따른 각 계통별 용수공급가능 지역을 결정하기 위하여 Fig. 2에 제시된 바와 같이 EPAnet 관망 흐름해석을 수행하고, 용수공급 가능지역이 중복되는 지역에 대해서는 수원의 공급비용별로 우선순위를 부여하고 비용을 최소화하는 최적모의를 수행하였다. KModSim은 통수능을 고려하기 위하여 제약조건만을 설정할 수 있으므로, EPAnet 관망수리해석 결과인 수두손실과 통수능을 설정하고 관망 연계운영모의를 수행한다. 즉, 통수능 제약 조건 부여만으로도 에너지방정식을 따르는 2개 계통간의 수리적 간섭 영향이 반영된 물 공급 및 배분이 가능하므로 경제적 물배분 경로를 찾아 계통별 경제적 급수구역을 결정하는 것이 가능하다.

최적 네트워크 모형을 적용하여 계통별 경제적 급수구역을 찾는 모의 순서를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 3개 수원의 각 단일계통별 상수도 서비스 가능 지역을 확인하여 계통간의 동시 급수 지역을 찾는다. 둘째, 남강, 사등계통과 구천, 연초 계통의 급수구역을 밸브 개폐로서 나누어 운영하는 제한적 연계 운영과 모든 관망을 상호 연계되도록 완전 개방 운영 방식 중 용수수요 조건마다의 경제적인 방식을 찾는다. 셋째, 관망 수리 해석을 반복 시행하여 찾은 용수수요에 맞는 공급량 조건인 펌프운영조합에 대한 비용 최소화 최적화 모형 입력자료 작성 및 모의를 수행한다. 밸브개폐 모델링의 시행 경우의 수를 줄이는 방안이면서, 비용 최소화를 위한 경제적 급수구역을 찾는 1차적인 수단으로 도입한 최적화 모의 수행 후 최적경로를 찾는 분석 과정을 진행한다. 넷째, KModSim 모형을 통수능을 매개변수로 하여 검·보정 한다. 다섯째, 대안마다 통수능 제약조건을 가진 KModSim을 실행하고, 대안별 최적 급수구역과 펌프운영조합을 찾는다. 최적 급수구역이 찾아진 대안별 에너지 비용을 비교하여 1단계로 실용적인 비용 최소인 해를 구한다. 여섯째, 1차 도출된 실용적 해로부터 분석된 급수구역 분할 조건으로 관망수리해석을 실행하여 통수능을 변경한다. 변경된 통수능 조건에서 KModSim을 실행한 결과 에너지 비용 개선 여부를 확인 하는 과정의 반복을 통해 보다 전역의 최적해에 근접한 해를 2단계로 도출하고, 경제성 제고 기대 효과를 평가한다. 일곱째, 2단계 해에 대한 수질 만족 평가 시행 후 주어진 용수수요 조건에 대한 최적해를 결정한다.

EPAnet 관망 흐름해석과 KModSim 네트워크 최적화를 검정하기 위하여 Fig. 2와 같이 거제시 생활용수 수원인 사등가압장, 거제공업용수 수원인 구천댐과 연초댐을 3개의 고정절점(FGN)으로 설정하고 64개 연결점(junction), 81개 관로(pipe), 16개 펌프 그리고 1개 저류지가 포함된 관망을 구성 하였다. KModSim 네트워크 최적화모의를 수행하기 위해서는 관수로 흐름의 수리적 제한 조건이 요구되는데, 관수로 흐름의 수리적 제한조건을 결정하기 위하여 2007년 일 평균 최대수요 자료를 이용하여 시스템의 시간별 공급량, 수두, 압력, 수질, 유량 및 유속을 구하고 실측치와 계산치를 비교하는 방법으로 네트워크 최적화 모형을 검정하였다.

검정을 위하여 Fig. 3에 제시되어 있는 유량 및 압력계 측정지점과 실시간으로 유량을 측정하는 죽도분기, 옥포분기, 신현분기, 아주분기, 장승포분기 5개 지점의 실측자료를 모의결과와 비교하였다.

본 연구는 송수관망시스템의 전력비 절감을 통한 경제적 운영 방안을 찾기 위하여 공급을 위해 전력이 소비되는 남강II단계 광역상수도 사등가압장, 연초정수장, 구천정수장을 경계지점으로 하였다. 2006년 9월 이후 본격적으로 사등가압장에서의 가압을 시작하였으므로 사등가압장 전력원단위(원/m^3)는 2006년 9월 이후 평균치로, 연초 및 구천계통은 남강II(사등)계통에서 공급 받기 이전인 2001~2003년 평균치까지 포함하여 각 계통별 전력원단위를 비교하여 Table 3에 수록하였다. Table 2에 수록되어 있는 원가는 수질관리를 위한 약품비와 전력비만을 고려하여 산정하였다. 경계지점을 시작점으로 본 경우 각 계통별 전력원단위는 구천이 가장 크고 이어 연초, 사등 순이나, 남강계통 정수생산원가를 포함할 경우는 사등 상수도시스템의 운영비용이 가장 큰 것으로 나타났다.

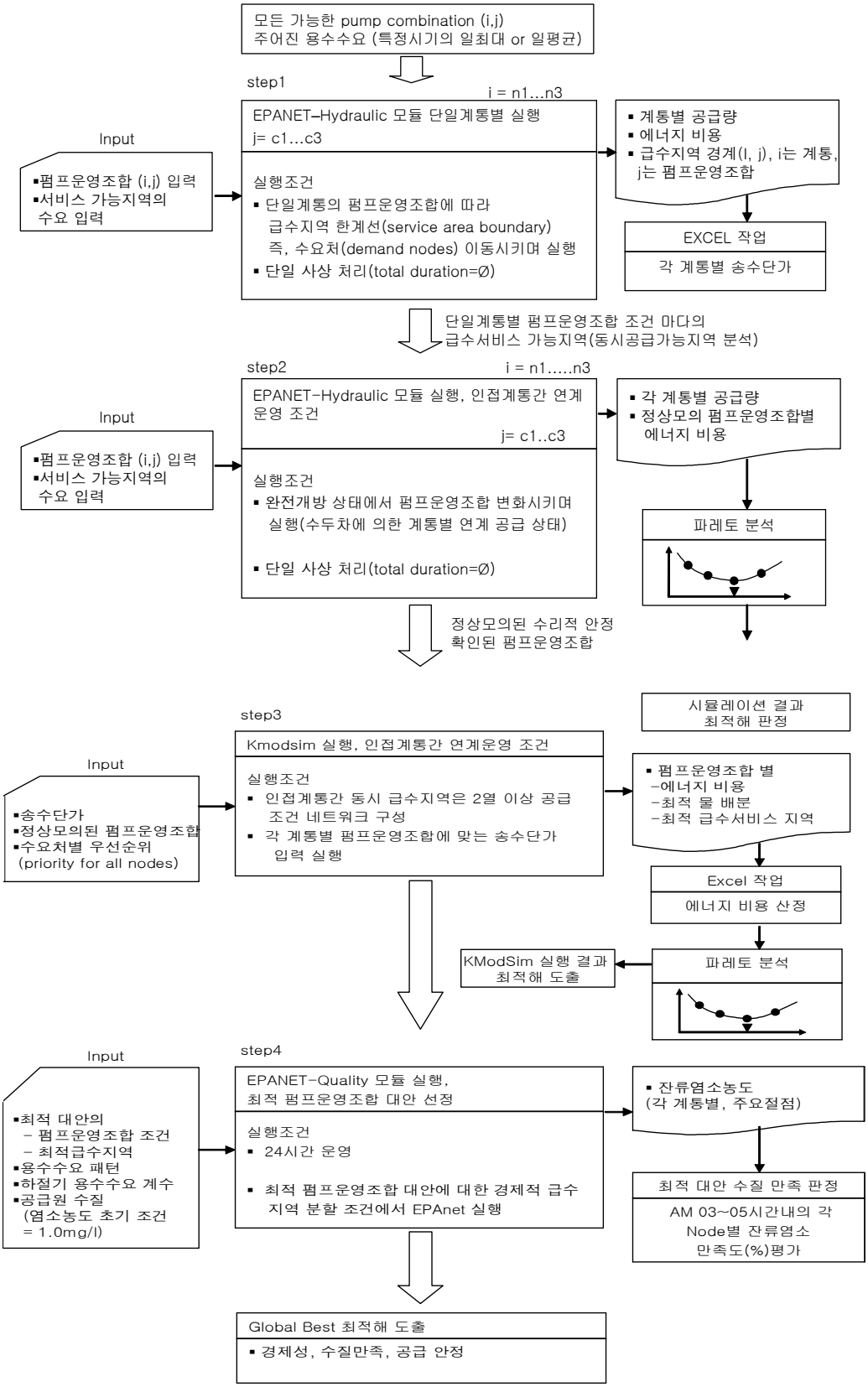

Fig. 2. Proposed Design for the System Solution Approach

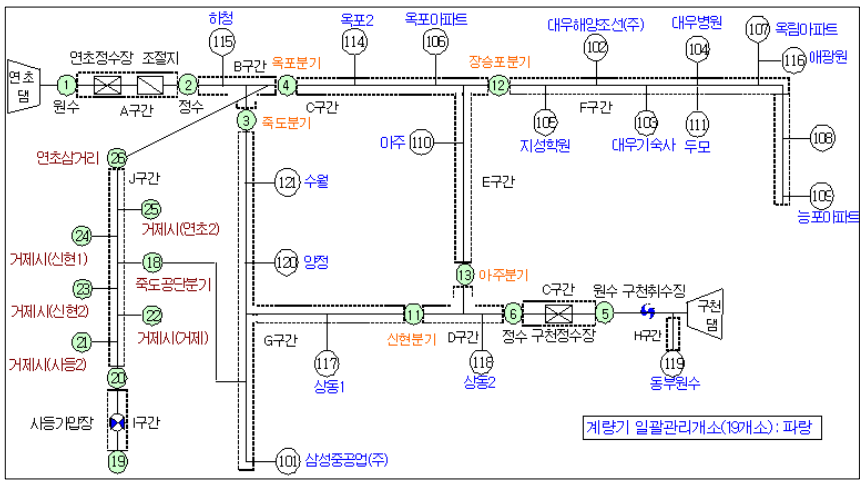

Fig. 3. Water Distribution System of Geoje City

Table 3. Unit Electricity Price (KRW/m³)

구분	연초			구천					사천							
	약품비	전력비	합계	약품비	전력비			합계	약품비	전력비					소계	합계
		정수장			취수장	정수장	소계			취수장	정수장	가압장				
												미가동	가동	적용		
2001	5.13	17.96	23.09	2.96	16.47	2.24	18.71	21.67	3.97	9.83	25.04	-	-	-	34.87	38.84
2002	7.71	19.25	26.96	3.04	15.66	2.28	17.94	20.98	4.08	8.49	30.87	-	-	-	39.36	43.44
2003	4.69	20.99	25.68	3.24	16.55	2.89	19.44	22.68	2.97	6.85	33	3.19	-	-	39.85	42.82
2004	5.45	23.89	29.34	5.27	17.62	3.24	20.86	26.13	4.35	6.07	28.22	2.47	-	-	34.29	38.64
2005	-	-	0	7.41	17.62	3.6	21.22	28.63	4.47	5.83	26.16	0.43	-	-	31.99	36.46
2006	-	-	0	5.34	18.46	3.5	21.96	27.3	4.81	6.37	26.67	0.17	14.97	14.97	48.01	52.82
평균	5.74	20.52	26.26	4.54	17.06	2.95	20.01	24.55	4.10	7.24	28.32	1.56	14.97	14.97	50.53	54.63
	연초 정수생산원가 = 5.74			구천 정수생산원가 = 4.54					정수생산원가 = 4.10+7.24+28.32 = 39.66 (사등까지 도달원가)							

거제시의 정수장과 가압장의 전형적인 펌프 설치는 병렬 방식으로 펌프 공급량이 증가하면 펌프특성곡선 기울기만큼 수두손실이 증가하여 수송거리가 줄어들게 되고, 공급량이 축소되면 수송거리가 늘어나는 특성을 가지고 있다. 펌프운영대수-송수단가-급수서비스지역를 1개 set으로 하는 최적 운영 모형의 운영 조건인 펌프운영조합을 결정하고 2007년의 일 최대 용수수요에 대한 3개 수원(연초정수장, 구천정수장, 사등가압장)의 펌프운영조합에 대해 EPAnet 모형을 이용하여 수리학적 모의를 통해 수리적으로 안정한 펌프운영조합 조건을 구하였다. EPAnet 관망수리해석 결과 2007년 용수수요 조건에서 안정 공급이 가능한 펌프운영조합은 Table 4와 같이 2020, 2120, 3020와 같은 3가지 경우이다. 참고로 펌프운영조합 2020는 사등 2, 사등보조 0, 구천 2, 연초 0을 의미한다.

수리적 안정 즉, 용수수요를 만족하는 펌프운영조합인 대안 마다 경제적 급수구역을 도출하기 위해 KModSim 모형의 송수단가 입력자료는 EPAnet 실행 결과로부터 산정하였다. 비용 산정을 위하여 에너지비용만이 고려된 송수단가에 각 계통별로 정수생산원가를 더한 값을 사용하였다. 2007년 용수수요 조건에서 남강계통과 구천계통을 가동할 경우의 최적 운영 모형 결과는 펌프운영조합 2020인 경우 에너지비용이 1,075,489원/일, 2120인 경우 에너지비용이 1,182,405원/일, 그리고 3020인 경우 에너지비용이 1,261,549원/일로 나타나 펌프운영조합 조건에 따라 에너지 절감에 민감한 지역이 존재함을 확인할 수 있다. 2개 이상 정수관로에서 공급이 가능한 관망 구성을 가진 지역

Table 4. Simulation Cases by EPAnet

펌프 운영 조합	펌프운영대수(대)				실행 여부 (y/n)	모의결과 공급량 (m^3/d)	계통별 공급량(m^3/d)			일 최대 용수수요(2007년도)		
	사등	사등 보조	구천	연초			사등	구천	연초	공급량 (m^3/d)	공급만족도 (%)	에너지비용 (KRW/d)
2020	2	0	2	0	y	86074	53,594	26,845	-	80,443	107	1,075,489
2021	2	0	2	1	y	-	51,097	29,324	9,231	-	-	-
2022	2	0	2	2	y	-	47,529	28,507	13,616	-	-	-
2032	2	0	3	2	n	-	-	-	-	-	-	-
2120	2	1	2	0	y	87224	54,975	25,788	-	80,763	108	1,182,405
2121	2	1	2	1	y	-	53,522	28,565	7,565	-	-	-
3020	3	0	2	0	y	87452	55,967	25,007	-	80,974	108	1,261,549
3031	3	0	3	1	n	-	-	-	-	-	-	-
3032	3	0	3	2	y	-	63,176	32,834	16,243	-	-	-
3121	3	1	2	1	y	-	58,363	25,381	5,908	-	-	-
3122	3	1	2	2	y	-	67,655	28,200	16,398	-	-	-
3132	3	1	3	2	y	-	64,887	32,512	14,855	-	-	-
4022	4	0	2	2	y	-	67,197	30,835	14,222	-	-	-
4031	4	0	3	1	y	-	70,208	32,900	9,145	-	-	-

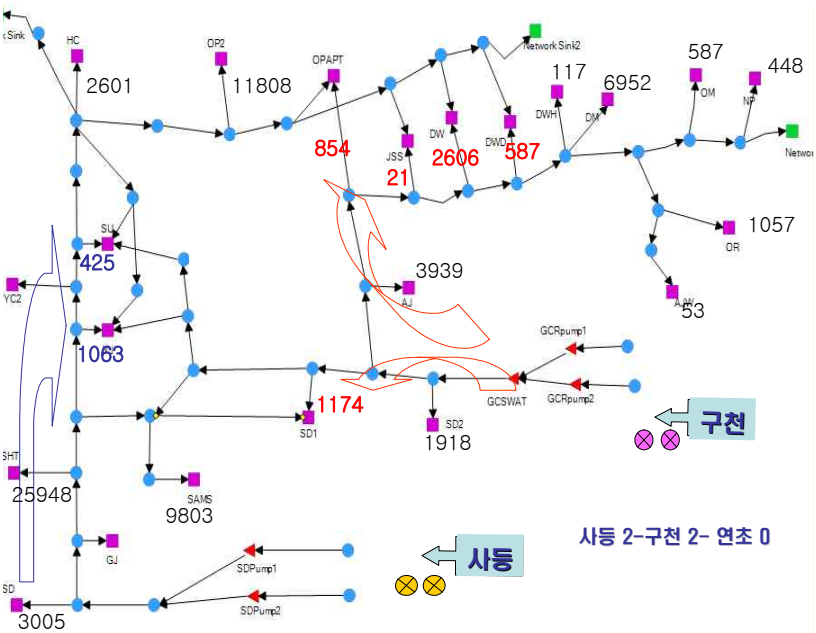

Fig. 4. Economic Service Area and Pump Combination Sadeung 2 (0), Gucheon (2), and Yeoncho (0) on year 2007.

중 펌프운영조합 조건 변경에 따라 변동이 예민한 지역은 상동(SD1), 삼성중공업(SAMS), 양정(YJ), 수월(SU), 대우기숙사(DWD), 대우조선(DW), 옥포아파트(OPAPT) 등이다. 최적모의를 통해서 2007년 용수수요 조건에서의 최적 연계운영은 펌프운영조합 2020으로 구천계통에서 옥포아파트(OPAPT), 수월(SU), 양정(YJ)까지 공급되도록 제한 연계운영하는 방안임을 확인하였다. 밸브 개폐 위치 변경에 따른 에너지비용 변동이 크지 않으며, 최소 에너지비용(1,075,489원/일) 경우인 2020 펌프조합조건의 급수구역이 가장 최적해에 근접한 것으로 판단하고, EPAnet 모형을 다시 실행하는 feedback 과정을 거쳐 KModSim으로 구한 Fig. 4의 경제적인 급수지역 조건이 최적해일 때

조건임을 확인하였다.

송수관망에서의 수질 안정성을 검토하기 위하여 EPAnet 관망해석 모형으로 구한 송수단가와 제약조건을 입력하고 KModSim을 통해 경제적 물배분과 급수서비스지역을 구한 후 잔류염소가 가장 크게 감소되는 구간을 결정하였다. 일평균에 대한 수질 모델링 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 근소한 차이 나마 최적급수구역으로 조정되는 경우가 잔류염소 농도 기준치(0.1 mg/l) 이하 발생되던 곳이 사라지고, 평균치가 상향되는 수질 향상이 예측된다. 공급 계통이 전환되는 수리적 상태에 따라 유속이 달라지고, 체류시간의 변동에 따른 수질 변동을 판단할 수 있었다.

4. 최적 네트워크 모형의 적용성 검토

EPAnet 관망수리해석 결과 Table 5에 제시된 것과 같은 다양한 시나리오 중 2011년 용수수요 조건에서 안정공급이 가능한 펌프운영조합은 4022, 4031, 3032, 3132인 경우 4가지이다. 참고로 펌프운영조합 4022는 사등 4(0), 구천 2, 연초 2를 의미한다.

관망수리해석 모형으로 모의한 결과로부터 최적화 모의 수행을 위한 펌프 유입량 노드 입력자료를 Table 6과 같이 작성하였다. 펌프운영조합 대안별 펌프 유입 node에

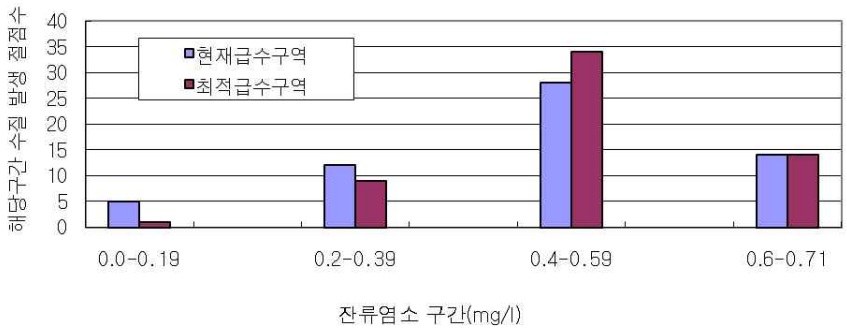

Fig. 5. Variation of Water Quality according to Service Area Change on 2007

Table 5. Simulation Cases by EPAnet

펌프운영조합	펌프운영대수(대)				실행여부(y/n)	모의결과 공급량(m^3/d)	계통별 공급량(m^3/d)			일 최대 용수수요(2011년도)		
	사등	사등 보조	구천	연초			사등	구천	연초	공급량(m^3/d)	공급만족도(%)	에너지비용(KRW/d)
1021	1	0	2	1	n	-	-	-	-	-	-	-
2021	2	0	2	1	n	-	-	-	-	-	-	-
2121	2	1	2	1	n	-	-	-	-	-	-	-
3021	3	0	2	1	n	-	-	-	-	-	-	-
2022	2	0	2	2	n	84,672	-	-	-	55,241	50	-
2122	2	1	2	2	n	94,752	-	-	-	72,781	66	-
3022	3	0	2	2	n	106,992	-	-	-	73,350	66	-
3121	3	1	2	1	n	109,008	-	-	-	72,909	66	-
4022	4	0	2	2	y	129,312	67,197	30,835	14,222	112,254	101	1,796,296
3031	3	0	3	1	n	110,880	-	-	-	104,753	95	-
4031	4	0	3	1	y	133,200	70,208	32,900	9,145	112,253	101	1,851,771
2032	2	0	3	2	n	96,624	-	-	-	55,242	50	-
2132	2	1	3	2	n	106,704	-	-	-	104,753	95	-
3032	3	0	3	2	y	118,944	63,176	32,834	16,243	112,253	101	1,783,040
3132	3	1	3	2	y	129,024	64,887	32,512	14,855	112,254	101	1,838,062

Table 6. Inflow Node Data of Pump for KModSim on 2011

펌프 운영 조합 대안	사등		사등(보조)		구천		연초		에너지비용 (KRW/d)	비 고
	공급 가능량	유입량 (m^3/d)	공급 가능량	유입량 (m^3/d)	공급 가능량	유입량 (m^3/d)	공급 가능량	유입량 (m^3/d)		
4022	65,620	16,400	-	-	28,827	14,500	15,987	8,000	1,716,966	배수지 후단의 에너지 비용 제외
4031	68,999	17,300	-	-	30,910	10,300	10,271	10,300	1,749,729	
3032	61,874	20,600	-	-	30,822	10,300	17,670	8,800	1,688,674	
3132	55,163	18,400	8,304	8,300	30,482	10,100	16,546	8,300	1,743,534	

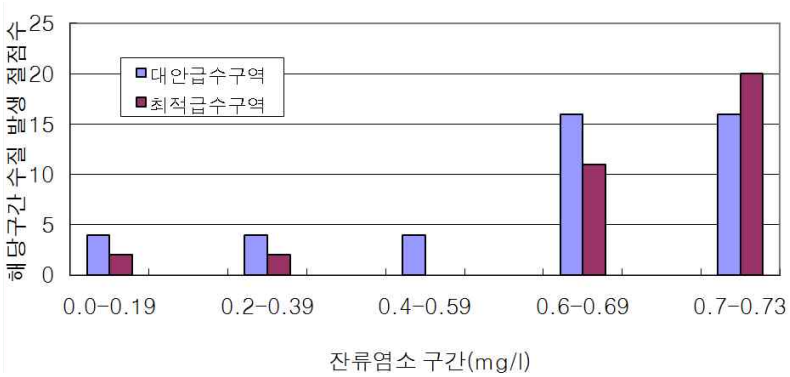

Fig. 6. Variation of the Effect of Free Chlorine according to Service Area Change on Year 2011.

대한 입력자료는 EPAnet 모형 실행 결과와의 비교를 위해 관망 수리해석 모의 결과 1대당 공급량으로 산정하였다. 초기 허용통수능 입력값은 각 계통마다 관망수리해석 모형 시뮬레이션 결과로부터 구한 것으로 남강(사등)계통 통수능 입력한계와 일치한다.

수리적 안정이 확인된 펌프운영조합에 대한 KModSim 최적 배분 수행 결과 에너지비용은 각각 3032 조합운영이 1,631,447원/일, 3132 조합운영이 1,669,033원/일, 4022 조합운영이 1,707,730원/일, 그리고 4031 조합운영이 1,679,007원/일로 나타났다. 분석결과 2011년 용수수요 조건에서는 3032 펌프운영이 가장 경제적인 운영조합인 것으로 나타났다. KModSim 최적 모의 결과는 대우조선(DW)은 남강계통과 구천계통에서 동시 급수되고, 대우기숙사(DWD)는 남강계통에서 공급하고, 구천 계통을 두모(DM) 이후 수요처 공급원으로 전용으로 전환하되, 상동1 (SD1)은 남강과 구천계통에서 동시 공급하는 것이 2011년 용수수요 조건에서 가장 비용이 적게 소요되는 것으로 나타났다.

인접 송배수계통간의 급수구역 중복이 될 경우 경제적인 급수구역을 설정하여 공급하는 운영이 경제성 제고 가능성을 확인할 수 있었다. 계통 전환에 따른 관내 체류시간의 변동으로 인한 수질 영향은 수질 모델링 단계를 거쳐 최종 확인이 필요하다. 2011년 용수수요 조건에서는 최적연계방안이 구천 계통에서 공급하고, 상동1 급수지역은 구천계통에서 남강계통으로 전환되는 급수구역 조정이 이루어지는 방안이므로 비교 대안으로 두 가지 조건에 대한 비교를 통해 2011년 경제적 급수체계조정 방안의 수질 기준 만족과 개선 여부를 판단하고자 하였다.

2011년 일평균 용수조건에 대한 분석 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 근소한 차이 나마 최적급수구역으로 조정되는 경우가 평균치가 상향되는 수질 향상이 예측된다. 공급 계통이 전환되는 수리적 상태에 따라 유속이 달라지고, 체류시간의 변동에 따른 수질 변동을 판단할 수 있었다.

용수수요 조건마다 경제적 관점에서 최적이라 판단된 펌프운영조합 및 급수구역이 수질 관점에서의 기준에 항상 만족 하지는 않지만 거제시의 경우는 경제성과 수질 측면에서 모두 양호한 결과를 예측할 수 있었다. 2011년의 경우는 구천계통에서의 물 사용량이 커지는 만큼 공급속도 증가로 인한 잔류염소 감소 둔화에 따른 초기 염소농도를 줄일 필요성이 예측되었다. 2011년 용수수요 조건 경제적 관점에서 최적이라 판단된 펌프운영의 경우는 잔류염소농도가 낮은 지역이 발생되는 점이 발생하나 수질 기준에 만족하지 않는 경우는 없었다.

5. 결 론

상수도시스템을 단계별로 확대함으로 인해 도시지역에서는 상수도시스템이 중복되는 지역이 존재한다. 이러한 중복지역에는 비용이 상대적으로 적은 시스템망을 활용하여 공급하는 것이 비용절감 측면에서 효율적이다. 본 연구에서는 안정적 수량 확보 및 수질을 동시에 만족하는 최적 배분경로를 결정함으로써 중복지역의 송·배수시스템 운영 관리에 활용가능한 최적 네트워크모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 최적 네트워크 모형은 (i) 펌프 에너지 비용 최소화, (ii) 용수수요 충족, (iii) 수질 만족 등 3가지 조건에 대한 최적해를 제시하는 모형으로써 3개의 다른 수원으로부터 공급 받고 있는 경상남도, 거제시 상수도시스템에 개발한 모형을 적용하였다.

개발한 모형을 2007년 용수수요조건에 대한 모의결과는 남강시스템에서 사등~대우조선 구간을 구천시스템에서 대우기숙사~신현1 구간을 배분하고 그 외 지역에 대해서는 구천시스템에서 공급하는 것이 비용과 수질면에서 최적의 방안인 것으로 나타났다. 2011년 용수수요 조건에서의 최적배분 경로는 남강시스템에서 사등~대우조선, 구천시스템에서 구천~대우기숙사 구간을 공급하는 것이 경제성에서 유리한 것으로 분석되었다. 최적 네트워크 모형을 활용하여 결정한 최적배분경로를 통한 운영결과는 기존의 운영방안에 비해 3~5% 에너지 절감이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 송, 배수과정에서의 경제적인 급수구역을 결정하는 것과 더불어 최적 연계운영 방안으로 도출된 경제적 급수구역과 펌프운영조합 조정에 따른 물이동거리 변화가 관내 수질에 미치는 영향을 평가 하였다. 물이동거리 변화에 따른 수질 영향을 분석한 결과 상수도시스템이 저류시간 증가 등으로 항상 수질조건을 만족하지는 않는 것으로 나타나 최적경로 결정에 있어 수질을 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서 개발한 최적 네트워크모형은 장래 물수요 증가 발생에 따른 급수구역 분할관리계획을 수립하거나 상수도의 시설계획 및 유지관리계획 그리고 경영계획 등의 합리적인 의사결정에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

강현진, 구윤희, 구자용, 유명진 (2003). "에너지와 수질을 고려한 배수지 최적 운영." **대한상하수도학회·한국물환경학회 2003 공동 추계학술발표회 논문집**, 2003년 11월, pp. 13-14.

거제시 (2006). 거제시 지방상수도 운영효율화사업 계획.

건설교통부 (2001). 수자원장기종합계획.

고석구, 오민환, 안두수 (1992). "다목적 분석 기법을 이용한 상수도 송수계의 펌프와 배수지의 연계 최적 운영." **한국상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제1호, pp. 8-18.

박희경, 최동진, 윤여천, 이상은 (2004). 미국과 일본 미국도관리체계 미분석, 한국상하수도협회 용역보고서.

윤재홍, 오정우, 최영송 (1998). "배수관망의 잔류염소 평활화를 위한 최적 재염소 처리." **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제12권, 제2호, pp. 90-99.

최승일 (2006). "해외의 수도비전과 국내 수도의 운영관리." **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제20권, 제4호, pp. 475-485.

하성룡, 성노성, 이병호 (2000). "유전자 알고리즘을 이용한 광역상수도 관로노선 선정기법 개발." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제3호, pp. 429-439.

한경석 (1983). 네트워크 모형을 사용한 급수관리 체계화 연구, 석시학위논문, 서울대학교.

한국수자원공사 (2001). 수도시설 최적 연계 계획 및 설계 활용을 위한 평가 기준 개발 보고서. 한국수자원공사.

한국수자원공사 (2003). 수도권 상수관망 최적 운영시스템 구축. 한국수자원공사.

Boulos, P.F., Lansey, K.E., and Karney, B.W. (2004). Comprehensive water distribution systems analysis handbook for engineers and planners, MWH soft Inc.

Clark Robert M., and Richard M. Males (1986). "Developing and applying the water supply simulation model." *Journal AWWA,* Vol. 78, Iss. 8, August 1986, Page (s) 61-65.

Frick, D.M., Bode, D., and Salas, J.D. (1990), "Effect of drought on urban water supplies. II : Water supply analysis." *Journal of Hydraulic engineering*, Vol. 116, No. 6, pp. 754-764.

Munavalli, G.R., and Kumar, M.M.S. (2003). "Optimal Scheduling of Multiple Chlorine Sources in Water Distribution Systems." *Journal of Water Resources Planing and Management,* Vol. 129, No. 6, pp. 493-504.

Ormsbee, L.E., and Lansey, K.E. (1994). "Optimal Control of water supply pumping systems." *Journal of Water Resources Planing and Management,* ASCE, Vol.

120, No. 2, pp. 237-252.

Orr, C., and Coulbeck, B. (1994). "An Integrated Approach to the real-time control of Water Supply and Distribution systems." *Proceeding of the annual Conference, Water Resources Planning and Management Division of the ASCE,* Vol. 21, pp. 850-854.

Randall, D. (1984). Operation of a metropolitan water supply system during drought (linear programming, multiobjectives, simulation). Ph.D. dissertination, Purdue University.

Randall, D., Cleland, L., Catharine, S.K., George, W., Buzz, L., and Sheer, D.P. (1997). "Water Supply Planning Simulation Model Using Mixed-Integer Linear Programming Engine." *Journal of Water Resources Planning and Management,* Vol. 123, No. 2, pp. 116-124.

Randall, D., Houck, M.H., and Wright, J.R. (1986). "Simulating water system operation during periods of drought." *Journal AWWA*, Vol. 78, No. 8, pp. 53-60.

Randall, D., Houck, M.H., and Wright, J.R. (1990). "Drought management of existing water supply system." *Journal of Water Resources Planning and Management,* Vol. 116, No. 1, pp. 1-20.

Resources Consultants, Inc. (1985). Drought and their effect on the water supplies for the city of FORT COLLINS, Colorado.

Sakarya, A. Altan, B., and Mays, L.W. (2000). "Optimal Operation of water Distribution Pumps Considering Water Quality." *Journal of Water Resources Planning and Management,* Vol. 126, No. 4, pp. 210-220.

Stephenson, D. (1969). "Optimal allocation of water resources by mathematical programming." *Journal of Hydrology,* Vol. 9, pp. 20-33.

논문번호: 11-098	접수: 2011.08.25
수정일자: 2011.10.21/11.02	심사완료: 2011.11.02